

4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015

ENGINEERING AND TECHNOLOGY

Babin G.V., Halimon V.I., Gradusov A.N.

AUTOMATED GAMMA DETECTORS CALIBRATION ALGORITHM FOR HAZARDOUS SUBSTANCE DETECTION SYSTEM BASED ON ASSOCIATED PARTICLE IMAGING NEUTRON TECHNIQUE

Babin G.V. Russia, graduate student of the Department
of Systems Analysis of St. Petersburg State Technological
Institute (technical university)

Halimon V.I. Russia, Professor, doctor of technical
Science of the Department of Systems Analysis of St. Petersburg
State Technological Institute (technical university)

Gradusov A.N. Russia, Engineer of Scientific and
Technical Center RATEC.

Abstract

In this article authors have developed automated LYSO scintillation gamma-detectors calibration algorithm for hazardous substance detection system EDS-1103 based on associated particle imaging neutron technique. They have described two-stage method for adjusting energy scale. The first stage is based on the c^2 criterion. It is approximate calibration. The second stage is need for more accurate adjustment of energy scale. It is based on searching photo-peaks of an a priori known gamma energies. Authors have analyzed several methods of searching photo-peak. The comparison of these methods is made by computer simulation. After that the best algorithm had been choosen.

Tags: Hazardous substances, Pearson criterion, tagged neutrons, characteristic radiation, calibration.

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

Введение

Целью данной статьи является предоставление широкому кругу специалистов проблематики автоматической энергетической калибровки блоков детектирования (БД) в условиях изменения характеристик электронного тракта, например, под воздействием внешних условий. В силу того, что блоки детектирования мобильной установки, в частности измерительные платы, имеют зависимость от ряда природных факторов, в первую очередь температуры и влажности, необходимо калибровать энергетическую шкалу перед каждым измерением и в процессе инспекции. Основными методами калибровки сцинтилляционных блоков — это изменение коэффициента усиления после получения сигнала от ФЭУ (КУ) и добавление к импульсу постоянной составляющей (смещение).

Необходимо отметить, что многие авторы используют декомпозицию спектров как один из этапов алгоритма для принятия решения о наличии опасного вещества. Однако недостаточно точная калибровка энергетической шкалы приводит к непредсказуемым результатам оценки коэффициентов разложения спектров и тем самым повышает вероятность неверно принятых решений в задачах обнаружения опасных веществ [1-5]. На рисунке 1 представлен пример оценки модулей относительных отклонений коэффициентов разложения спектра от идеальных при различных значениях коэффициента усиления (в десятипроцентном интервале). Декомпозиция спектров была выполнена методом наименьших квадратов для комбинации характеристического гамма излучения от углерода, кислорода и азота при облучении быстрыми нейтронами. Из полученного графика можно сделать вывод, что зависимость коэффициентов имеет нелинейный и уникальный характер для каждого элемента, что в сумме не позволяет использовать даже отношения коэффициентов для дальнейшей обработки результатов.

В данной статье авторы предлагают двухступенчатый метод калибровки, суть которого заключается в первоначальной грубой калибровке и последующей более точной.

4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015

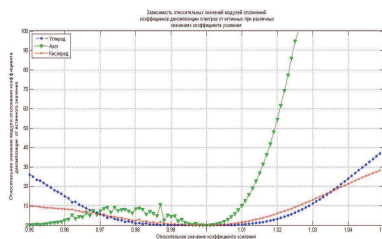


Рис. 1. Зависимость относительных значений модулей отклонений коэффициентов декомпозиции спектров от истинных при различных значениях коэффициента усиления

Необходимость грубой калибровки возникает в случае продолжительного простоя установки. Это связано с тем, что со временем параметры измерительных блоков могут сильно измениться по сравнению с последними используемыми. Как следствие этого необходим алгоритм, который позволит получать стартовые приближенные значения параметров БД для второго этапа калибровки из любого исходного состояния системы.

Особое внимание уделено второй части алгоритма так как точный метод настройки энергетической шкалы должен использоваться не только при первоначальном запуске оборудования, но и в режиме инспекции подозрительного объема, в течение которого параметры БД относительно медленно изменяются.

Калибровка энергетической шкалы. В настоящее время во многих устройствах, работающих с амплитудными спектрами, используется алгоритм калибровки, основанный на поиске спектральных пиков с априорно известными характерными им энергиями. В частности, в системах, которые используют быстрые нейтроны в качестве зондирующего излучения с последующей обработкой спектров гамма излучения, реализация калибровки основана на оценке положения пика полного поглощения гамма квантов от элементов кремния и кислорода (1.779 и 6.13 МэВ соответственно).

Для более стабильной работы установки УВП-1103, разрабатываемой «ОАО НТЦ «РАТЭК», в случае сильного изменения параметров блоков БД, например, при сильных

4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015

перепадах температуры, необходимо использовать алгоритм, основа которого заключается в анализе формы всего спектра. Это позволяет производить настройку энергетической шкалы даже в случаях с сильными изменениями коэффициентов усиления (КУ) или смещения (Смещ). Как показала практика, такие случаи часто встречаются в процессе длительной эксплуатации устройства и не позволяют использовать классический алгоритм поиска пика в заданной области в силу того, что в данном окне каналов может находиться другой пик. Примеры искаженных спектров, нормированных на суммарную счетность при разных значениях КУ и смещения, представлены на рисунке 2.

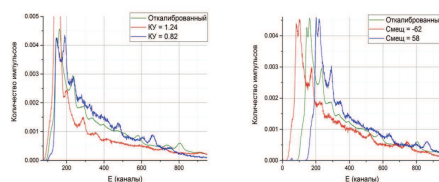


Рис. 2. Пример спектров с относительным изменением КУ и абсолютным изменением смещения. Шкала в 1024 канала в откалиброванном случае лежит в интервале 0–7.8 МэВ.

Анализ формы спектра осуществляется по критерию Хи-квадрат. Фоновый спектр (снятый по умолчанию с правильной энергетической калибровкой) подвергается изменениям масштаба (эквивалентно изменению коэффициента усиления БД) и сдвигается в заданных пределах (изменение смещения). На каждом шаге такой операции эталонный спектр сравнивается с измеренным по критерию Хи-квадрат. Далее из всех полученных значений χ^2_{ij} выбирается наименьшее с его характерными значениями КУ и смещения, где индекс i соответствует КУ, а j — смещению. Пусть наименьшее значение χ^2_{ij} будет при индексах i' и j' , следовательно, известно КУ $K_{i'}$ и смещение $S_{j'}$. Ввиду своей специфики, алгоритм не позволяет определять КУ и смещения с необходимой точностью. Поэтому в окончательном виде энергетическая калибровка должна осуществляться за счет использования данного алгоритма в комбинации со стандартным поиском пика. Первым шагом энергетической калибровки является вышеописанный алгоритм подбора параметров по критерию Хи-квадрат. Если в результате

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

его работы оказывается, что величины K_f и S_f лежат в допустимых пределах для всех БД (пределы определяются эмпирически), то производится переход к алгоритму поиска пиков кремния и кислорода, по которым выставляются значения параметров на измерительных платах. Если же K_f и S_f выходят за рамки допустимых пределов, то производится повторное измерение и повторяется подбор параметров по критерию Хи-квадрат. Во избежание бесконечного цикла в алгоритме предусмотрено конечное число подобных итераций.

Описание методов поиска пика в заданной области каналов. После того как приблизительные стартовые значения коэффициента усиления и смещения были выставлены, происходит более точная калибровка шкалы с помощью поиска определенных пиков. Ниже кратко описаны некоторые методы для реализации второго этапа калибровки.

Метод Марискотти. Авторами в статье [6-9] был предложен метод оценки положения пика с использованием априорной информации что максимум счетности в пике совпадает с его центром, а его форма имеет вид $\sim \exp(-k/M^2)$, где k – номер канала, M – положение центра пика. Если действовать оператором дифференцирования дважды на измеренный спектр, то получим, что минимум второй производной совпадает с его центром. Метод Марискотти основан на этом подходе, но с некоторыми изменениями и модификациями:

1. Усреднение значения второй производной спектра и её знаковая инверсия (формулы 1,2,3).
2. Расчет стандартного отклонения (формулы 4,5).
3. Расчет некоторой величины SS по формуле 6 для нахождения максимума пика, считая, что ее максимум совпадает с максимумом пика полного поглощения.

$$SD|i| = \sum_{k=1}^n c|k| S_{pc}|i|k| \quad (1)$$

$$C|1| = \sum_{k=1}^n c|0| 2.0; c|1| 1.0; \quad (2)$$

$$SD|i| = \sum_{k=1}^m SD|i|k| \quad (3)$$

$$SSD|i| = \sum_{k=1}^m c|k|^2 S_{pc}|i|k| \quad (4)$$

$$SSD|i,m| = \frac{\sum_{k=1}^m SSD|i|k|}{SD|i,m|} \quad (5)$$

$$SS|i,m| = \frac{SD|i,m|}{SSD|i,m|} \quad (6)$$

$S_{pc}|i|k|$ спектр; $i|k|$ индекс канала

Метод Филиппа-Марлова. Филипс и Марлов предложили схожий алгоритм только с тем отличием, что все операции выполняются при любом диапазоне m (формулы 7,8,9).

$$SD|i,m| = \sum_{k=1}^m c|k| S_{pc}|i|k| \quad (7)$$

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

$$SSD[i, m] = \sqrt{\sum_{k=-m}^m c[k]^2 \cdot Spc[i+k]} \quad (8)$$

$m = 2w + 1; w \geq 0; c[k] = 1$ для $k = m$ до $(w + 1)$ и $k = (w + 1)$ до $m; c[k] = 2$ для $k = w$ до w (9)

Определение положения центра пика производится по формуле 6.

Метод Робертсона. Робертсон [7] получил такие же выражения для формулы 6, но с другими коэффициентами и шириной шага.

$m = 5w + 1; w \geq 0; c[k] = 1$ для $k = m$ до $(w + 1)$ и $k = (w + 1)$ до $m; c[k] = 4$ для $k = w$ до w (10)

Метод Ройтти-Пруссина. Из предположения, что форма пика полного поглощения гамма-кванта имеет вид, схожий с нормальным распределением, авторы [10] предложили более сложный и точный расчет коэффициентов $c[k]$:

$$c[k] = \frac{\sigma(i)^2 - k^2}{\sigma(i)^4} \exp\left(-\frac{k^2}{2\sigma(i)^2}\right)$$

для всех $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ пока $c[k + 1] < 0.01$ (11)

$\sigma(i) = \frac{i-0.12}{2.35}$ i - номер канала, при энергетическом разрешении в 12 (12)

$$r = \frac{1}{k+1} \sum_{k=0}^k c[i]; c[k] = c[k] + r; m = k$$
 (13)

После расчета $c[k]$ выполняется метод Марискотти.

Black метод. Похожий подход, но более простой в определении коэффициентов, был предложен авторами [11].

$$c[k] = \exp\left(-\frac{k^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (14)$$

Метод Стерлинского. Другой подход для поиска пика был рассмотрен Стерлинским [12,13]. Он описал метод, основанный на второй производной спектра, с использованием площади пика и стандартного отклонения. Формулы для расчета представлены ниже:

$$L[i, m] = m \cdot N[0] + \sum_{k=1}^m A[m, k] \cdot B[i, k] \cdot C[m] \cdot D[i, m] \quad (15)$$

$$A[m, k] = m \cdot 2 \cdot k + 0.5;$$

$$B[i, k] = Spc[i - k] + Spc[i + k];$$

$$C[m] = m \cdot 0.5;$$

$$D[i, m] = Spc[i - m] + Spc[i + m];$$

$$S[i, m] = \sqrt{m^2 \cdot Spc[0] + \sum_{k=1}^m A[m, k]^2 \cdot B[i, k] - C[m]^2 \cdot D[i, m]} \quad (16)$$

$$SS[i, m] = \frac{i \cdot L[i, m]}{S[i, m]} \quad (17)$$

где m - целое положительное число (ширина), $L[i, m]$ = площадь пика, $S[i, m]$ - стандартное отклонение. Также, как и

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

вышеупомянутых методах, центр пика определяется из максимума функции SS .

Метод Блока. Блок [13 – 14] разработал метод, суть которого основывается на статистической корреляции между измеренной формой пика и его предположительной теоретической формой. Положение пика определяется по максимуму функции $R[i, m]$ с использованием формул 19-22.

$$R[i, m] = \frac{\sum_{k=-m}^m \delta_k \sum_{l=-m}^m (\delta_l c_k \text{Spf}[i + k])}{\sum_{k=-m}^m (\delta_k c_k) \sum_{l=-m}^m \delta_l c_k \text{Spf}[i + k]} \quad (18)$$

$$\Delta h[i, m] = \sqrt{\sum_{k=-m}^m \delta_k (\sum_{l=-m}^m \delta_l c_k^2) \sum_{l=-m}^m \delta_l c_k - (\sum_{k=-m}^m \delta_k c_k)^2} \quad (19)$$

$$R[i, m] = \frac{h[i, m]}{\Delta h[i, m]} \quad (20)$$

$$c_k = \exp\left(-2.773 \left(\frac{k}{FWHM(k)}\right)^2\right) \quad (21)$$

$$\delta_k = \exp\left(-2.0 \left(\frac{k}{FWHM(k)}\right)^2\right) \quad (22)$$

Где $FWHM(k) = 0.12 k$ при 12 относительном энергетическом разрешении, $m = \text{integer}(1.1 * FWHM(k))$, $h[i, m]$ – высота пика, $\Delta h[i, m]$ – стандартное отклонение высоты пика. Сравнение методов поиска пика в заданной области каналов. Для того чтобы определить наиболее подходящий метод для поиска центра фотопика при точной калибровке, был проведен компьютерный эксперимент.

Суть эксперимента заключалась в симуляции изменения КУ и соответствующим ему изменением формы спектра. Изначально считалось, что измеренный спектр имеет КУ равное 1. Далее путем линейной интерполяции были получены различные спектры, каждому из которых соответствует определенное значение КУ из интервала от 0.9 до 1.08. и описанными выше методами были оценены положения пика. В качестве критерия выбора метода для точной энергетической калибровки системы был выбрано среднее относительное квадратичное отклонение найденных положений пиков от их идеальных значений. Все полученные результаты представлены в таблице 1. Как видно из данной таблицы наилучший результат по данному критерию показал метод Блока.

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

Таблица 1. Относительное квадратичное отклонение найденных положений пика от идеального (в процентах).

КУ	Методы поиска пика							
	Поиск максимального значения	Поиск минимального значения в горой производной	Метод Марискоги	Метод Блока	Метод Филиппа-Марлова	Виск метод	Метод Стрелинского	Метод Роутти-Пруссиа
0.9	0.71	1.18	0.71	0.24	0.24	0.71	0.24	0.71
0.91	0.37	3.37	0.84	0.37	0.09	0.84	1.96	0.37
0.92	0.51	0.42	0.97	0.05	0.51	0.51	0.97	0.51
0.93	0.64	2.56	0.18	0.18	0.18	0.64	1.19	0.64
0.94	0.32	5.57	0.77	0.32	0.32	0.77	0.32	0.32
0.95	0.45	1.35	0.45	0.45	0.45	0.90	0.00	0.45
0.96	0.58	4.13	0.58	0.13	0.13	0.58	1.91	0.58
0.97	0.26	0.70	0.70	0.26	0.26	0.70	0.26	0.26
0.98	0.39	6.13	0.39	0.04	0.04	0.83	0.39	0.39
0.99	0.52	0.52	0.52	0.09	0.09	0.52	0.52	0.52
1	0.64	0.64	0.64	0.21	0.21	1.07	0.64	0.64
1.01	0.34	0.34	0.34	0.08	0.08	0.76	0.34	0.34
1.02	0.46	6.65	0.46	0.04	0.04	0.88	0.46	0.46
1.03	0.58	0.17	0.17	0.17	0.17	0.58	0.58	0.17
1.04	0.29	4.39	0.29	0.29	0.12	0.70	0.29	0.29
1.05	0.41	2.85	0.41	0.00	0.41	0.81	4.88	0.41
1.06	0.52	7.13	0.12	0.12	0.12	0.93	0.52	0.12
1.07	0.24	3.75	0.64	0.16	0.24	0.64	5.75	0.24
1.08	0.36	1.62	0.43	0.04	0.43	0.75	0.83	0.36
Среднее значение	0.45	2.81	0.51	0.17	0.22	0.74	1.16	0.41

Заключение

Подводя итоги проведенной работы можно сделать вывод, что комбинированный подход к настройке энергетической шкалы дает возможность использовать БД для установки УВП-1103 в широких рамках внешних условий без подключения специалистов. Другими словами данный этап в инспекции полностью автоматизирован, что дает возможность

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

работы на установке персоналу без глубокой подготовки. Стоит также отметить, что проведенное компьютерное моделирование и сравнение методов оценки положения пиков позволит улучшить вероятности обнаружения опасных веществ и снизить количество ложных тревог в случаях использования декомпозиции спектров на одном из этапов принятия решения при инспекции.

References:

- [1] G.V. Babin, V.I. Halimon Analysis of methods for spectra deconvolution in experiments with tagged neutron use. // Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical university) | Bulletin of St PbSIT (TU) Vol.26(52) 2014, p. 102-108.
- [2] G.V. Babin, V.I. Halimon, Vishnevkin A.B., Ilkuhin N.Y. The algorithm for estimating the ratios of the concentrations of elements of spectral data in the experiments with tagged neutrons. //Defense Engineering Problems Scientific and technical journal. Technical means to combat terrorism. Series 16. Issue 11-12 2014 p. 81-88.
- [3] D.Vakhtin, A.Kuznetsov, et al. "SCENA-portable sensor for explosives detection based on nanosecond neutron analysis". //NATO Security through Science Series –B: Physics and Biophysics, Detection and Disposal of Improvised Explosives – 2005 – Vol.6 –PP. 87-89
- [4] D. Sudac Et al. "Barrel inspection utilizing a 14 MEV neutron beam and associate alpha particle method"// Applied Radiation and Isotopes – V.70-2012-pp. 1070-1074/
- [5] A.A. Ananiev, S.G. Belichenko, E.P. Bogolyubov, O.V. Bochkarev, et al. Development of Decision making algorithm for control of sea cargo containers by "tagged neutron method."// AIP Conference Proceedings, Volume 1194, Int. Conference on Applications of Nuclear Techniques? Create (Greece), 14-20 June 2009, Bharuth-Ram, K.(Ed.) 210 Pp.175-182
- [6] Anonymous, Software for Nuclear Spectrometry, IAEA-TECDOC-1049, IAEA, Vienna (1998)
- [7] M.A. Mariscotti, Nucl. Instrum. Method 50 (1967) p- 309.
- [8] G.W. Phillips and K.W. Marlow, IEEE Transactions on Nuclear Science 24 (1977) p 154 [4] A. Robertson, W.V. Prestwich and T.J. Kennett, Nucl. Instrum. Methods 100 (1972) p 317.
- [9] J.T. Routti and S.G. Prussin, Nucl. Instrum. Methods 72 (1969) p 125

**4th the International Conference
on Social Science and Humanity 2015**

- [10]M. Blaauw, The Holistic Analysis of Gamma Spectra in Instrumental Neutron Activation Analysis, Interfacultair Reactor Instituut van de Technische Universiteit Delft, Holland (1993).
- [11]S. Sterlinski, Anal. Chem. 3 (1968) 1995.
- [12]L. Loska and J. Janczyszyn, Appl. Radiat. Isot. 48 (1997) 127.
- [13]H.P. Blok, J.C. De Lange and J.W. Schotman, Nucl. Instrum. Methods 128 (1975) 545.
- [14]P.I. Yazid Y-Spect: A Multi-Method Gamma Spectrometry Analysis Program, Atom Indonesia Vol. 39 No.1 (2013)