

Наибольший вклад в активность вносят радионуклиды с периодом полураспада около 70 дней. Это означает, что через  $\sim 2$  года (10 периодов полураспада), общая активность будет снижена до значений близких к  $1 \text{ мкЗв ч}^{-1}$  и может быть рассмотрен вопрос вывода указанных компонент мишени из состава РАО.

#### Литература

1. Папаш, А. И. Коммерческие циклотроны Ч. 1: Коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ для производства изотопов. / А.И.Папаш, Ю.Г.Аленицкий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2008. – Т. 39, № 4. – С. 1150–1214.

2. Позитронно-эмиссионная томография Ч. 1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С. Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 129–137.

3. Brinkevich, S. D. Activation Radionuclides in the Process of Irradiation of a Niobium Target at the Cyclone 18/9 HC Cyclotron / S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, A. N. Kiyko // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83, № 12. – P. 1732–1737.

4. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron / P. Guarino [et al.] // Cyclotrons and Their Applications–2007 : 18-th Int. Conf. Giardini Naxos, Italy. – P. 295–297.

УДК 535.241

### КАЛИБРОВКА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ КОМПАРАТОРОМ SOLAR M150 Бручковский И.И., Гуляева С.И., Литвинович Г.С.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе представлена методика калибровки фотометрической сферы компаратором SOLAR M150, позволяющая скорректировать неточность установки длины волны компаратором, путем регистрации спектров линейчатого источника в каждом положении дифракционной решетки.

**Ключевые слова:** фотометрическая сфера, калибровка, SOLAR M150.

### SPECTRAL RADIANCE CALIBRATION OF PHOTOMETRIC SPHERE WITH THE SOLAR M150 COMPARATOR

**Bruchkouski I., Guliaeva S., Litvinovich H.**

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The paper presents a procedure of photometric sphere calibration with a SOLAR M150 comparator, which allows to correct the inaccuracy of setting the wavelength by the comparator by registering line spectrum at each position of the diffraction grating.

**Key words:** photometric sphere, calibration, SOLAR M150.

*Адрес для переписки: Литвинович Г.С., НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220045, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Фотометрическая сфера (ФС) [1] предназначена для создания диффузного излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм. Источником излучения выступают шесть галогенных ламп накаливания мощностью 250 Вт.

Для калибровки ФС по СПЭЯ применяются:

- Рабочий эталон (РЭ) – фотометрическая сфера с известным СПЭЯ;
- Компаратор SOLAR M150;
- Поворотная платформа Standa 8MR190-90-59;
- Газоразрядные лампы Oriel (#6033, #6030, #6035, #6031) [4] и диффузный отражатель.

Компаратор одновременно регистрирует спектральный диапазон шириной от 120 до 250 нм в зависимости от выбранной решетки.

Поскольку компаратор SOLAR M150 содержит в своем составе подвижную турель с дифракционными решетками, то для исключения ошибки установки длины волны, связанной с неточностью позиционирования турели, необхо-

димо в ходе каждого измерения контролировать правильность калибровки по длинам волн и при необходимости корректировать. Для обеспечения заполнения апертуры компаратора излучением линейчатого спектра, применяемые газоразрядные лампы (Hg, Ar, Na, Kr) устанавливаются в диффузный отражатель. Применение такого подхода позволяет значительно снизить ошибку определения калибруемой длины волны. Схема установки представлена на рис. 1.

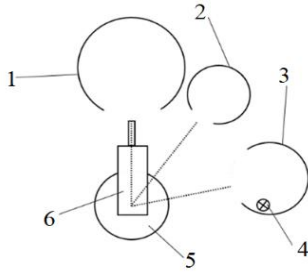
Компаратор имеет встроенную шторку для перекрытия светового пучка, что позволяет снимать темновой сигнал автоматически.

Упрощенно схему измерений можно представить следующим образом:

1. Измерение темнового  $\bar{V}(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{ТЕМН}}$  и полезного  $V(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{СИГН}}$  сигналов от ФС.

2. Измерение темнового  $\bar{V}(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{ТЕМН}}$  и полезного  $V(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{СИГН}}$  сигналов от РЭ.

3. Регистрация спектра излучения линейчатого источника. Источник подбирается в зависимости от регистрируемого диапазона.



1 – ФС; 2 – РЭ СПЭЯ; 3 – диффузный отражатель; 4 – лампа линейчатого спектра; 5 – поворотная платформа; 6 – компаратор

Рисунок 1 – Схема компарирования излучения от ФС и РЭ при помощи поворотной платформы

После регистрации всех спектров при заданном положении турели, производится калибровка каждого состояния компаратора по длинам волн, т.е. ставится в соответствие номер канала длине волны. При этом используется линейная аппроксимация зависимости для остальных каналов. Для повышения точности привязки компаратора по длинам волн желательно зарегистрировать не менее 3 линий излучения для каждого положения дифракционной решетки компаратора.

Итоговая СПЭЯ фотометрической сферы рассчитывается по формуле

$$L^{\Phi C}(\lambda) = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (1)$$

где  $L^{PЭ}(\lambda)$  – известные значения СПЭЯ РЭ.

Квадрат стандартной неопределенности искомой величины равен

$$u_c^2(L^{\Phi C}, \lambda) = C_1^2 \cdot u_1^2 + C_2^2 \cdot (u_2^2 + u_6^2) + C_3^2 \cdot (u_3^2 + u_6^2) + C_4^2 \cdot (u_4^2 + u_6^2) + C_5^2 \cdot (u_5^2 + u_6^2), \quad (2)$$

где  $u_1 = u(L^{PЭ}(\lambda))$  – стандартная неопределенность СПЭЯ РЭ комплекса на длине волны  $\lambda$ , Вт/(м<sup>3</sup>·ср);  $u_2 = u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})$  – стандартная неопределенность значений сигнала, регистрируемого компаратором от ФС, единица АЦП;  $u_3 = u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})$  – стандартная неопределенность значений сигнала, регистрируемого компаратором, от РЭ, единица АЦП;  $u_4 = u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})$  – стандартная неопределенность значений темного сигнала, регистрируемого компаратором от ФС, единица АЦП;  $u_5 = u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})$  – стандартная неопределенность значений темного сигнала, регистрируемого компаратором от РЭ, единица АЦП;  $u_6$  – стандартная неопределенность оцифровки регистрируемого сигнала;  $n$  – количество измерений;  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – коэф-

фициенты чувствительности (частные производные в (1)) рассчитываются следующим образом:

$$C_1 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(L^{PЭ}(\lambda))} = \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})} = \frac{L^{PЭ}(\lambda)}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})} = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН} - V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН}}{(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}, \quad (5)$$

$$C_4 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})} = \frac{L^{PЭ}(\lambda)}{\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{СИГН}}, \quad (6)$$

$$C_5 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})} = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}. \quad (7)$$

Стандартные неопределенности регистрируемых сигналов рассчитываются по формулам:

$$u_2 = u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})^2}, \quad (8)$$

$$u_3 = u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})^2}, \quad (9)$$

$$u_4 = u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{\Phi C}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})^2}, \quad (10)$$

$$u_5 = u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{PЭ}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}, \quad (11)$$

$$u_6 = 0,29. \quad (12)$$

Вклад каждого слагаемого формулы (2) в суммарную стандартную неопределенность представлен в табл. 2.

Таблица 2. Бюджет неопределенностей калибровки ФС для третьей градации яркости

$\lambda$ , нм		350	950	2000
Стандартная неопределенности, %	$u_c(L^{\Phi C}, \lambda)$	3,00	1,25	3,89
Процентный вклад в стандартную неопределенность, %	$u(L^{PЭ}(\lambda))$	99,69	99,54	26,40
	$u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})$	0,17	0,36	4,05
	$u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})$	0,10	0,09	0,28
	$u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})$	0,02	0,01	34,64
	$u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})$	0,02	0,01	34,64

Из табл. 2 видно, что наибольший вклад в стандартную неопределенность в области до 1000 нм вносит неопределенность СПЭЯ рабочего эталона, а собственный шум компаратора составляет лишь малую часть. В то же время в ИК области (1000–2500 нм) шум детектора начинает превалировать, что указывает на неоптимальный режим работы.

Представленные данные показывают, что точность измерительного оборудования в видимой области спектра выше точности используемого эталона. Однако даже первичные эталоны [3] имеют расширенную неопределенность порядка 1 %, что делает невозможным удовлетворение требований метрологического обеспечения о более высокой точности эталона.

Предложенная методика позволяет уменьшить неопределенность измерений СПЭЯ, вызванную особенностями конструкции компаратора и его неточной привязкой по длинам волн, лишь незначительно увеличивая объем измерений.

#### Литература

1. Метрологический комплекс для аттестации спектрометрической и видеоспектральной аппаратуры «Камелия-М» / Беляев Б. И. [и др.] // Приборы для научных исследований : каталог приборов, комплексов, установок, разработанных по ГКНТ «Приборы для научных исследований» ; под. ред. акад. В. С. Буракова. – Минск, 2006. – С. 13–16.
2. Калибровочные лампы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.newport.com/f/pencil-style-calibration-lamps/>. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. Государственный первичный эталон единиц радиометрических и спектрометрических величин в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм (ГЭТ 86-2017) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vniiofi.ru/depart/m4/get86-2017.html>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 621.317.7; 51-74; 519.816

### ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА МОДУЛЬНОМ ПРИНЦИПЕ

Воронова Т.С.<sup>1</sup>, Серенков П.С.<sup>1</sup>, Ермак А.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы проектирования и разработки технологии изготовления сложных электронных устройств, предложен алгоритм выбора компонентов на стадии проектирования, основанный на использовании методов экспертного оценивания. Обоснована необходимость создания сложной специализированной экспертной системы с интегрированной базой готовых конструкционных решений компонентов.

**Ключевые слова:** микроэлектроника, проектирование, экспертная система, экспертные методы, метод альтернатив.

### EXPERT EVALUATION AS A TOOL FOR SUPPORTING DECISION-MAKING IN THE PROCESS OF DESIGNING COMPLEX ELECTRONIC SYSTEMS BASED ON A MODULAR PRINCIPLE

Voronova T.<sup>1</sup>, Serenkov P.<sup>1</sup>, Ermak A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>United Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The problems of designing and developing the technology for manufacturing complex electronic devices are considered, an algorithm of selecting components at the design stage, based on the use of expert evaluation methods, is proposed. The necessity of creating a complex specialized expert system with an integrated base of ready-made design solutions for components has been substantiated.

**Key words:** microelectronics, design, expert system, expert methods, method of alternatives.

Адрес для переписки: Воронова Т.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: voronovats@bntu.by

Процесс проектирования и разработки технологии изготовления сложных электронных устройств представляет собой емкую многоэтапную задачу, результат которой во многом определяется решениями, принятыми на различных стадиях реализации. Часть таких решений принимается разработчиком в условиях полной неопределенности, и часто основано лишь на субъективном опыте разработчика и его компетентности в определенной

области, что не позволяет судить о рациональности и эффективности принятого решения.

Задачей данного исследования являлось повышение качества процесса проектирования и разработки сложных электронных устройств с помощью применения экспертных методов оценки для поддержки решений, принимаемых на различных этапах процесса, а также снижение нагрузки по принятию решений на проектиров-