

For automated design of optical lens systems, the appropriate software is to be used. To provide a design process, modern algorithms of global optimization can be incorporated into such specialized software. In this paper, a recently published adaptive Cauchy differential evolution method is numerically studied for the purpose of lens design. This method is characterized by an availability of an internal mechanism for adapting two specific parameters (coefficients) of the classical differential evolution method, as well as by applying the Cauchy distribution to generate new values of these parameters. The obtained results confirm that the adaptive Cauchy differential evolution method enables to design an arbitrary optical system with the required functional parameters and an acceptable level of correction of both chromatic and monochromatic aberrations. The performance of a lens design process greatly depends on a structure of the given merit function. The time interval, required to carry out automated design of an optical system with a number of variables about 20, does not exceed a few hours. The image quality of the obtained lenses enables to use them with existing matrix image sensors.

**Keywords:** lens, optical system, adaptive Cauchy differential evolution, automated calculation, global optimization.

*Надійшла до редакції  
04 лютого 2016 року*

*Рецензовано  
18 лютого 2016 року*

© Сокуренько В. М., Буйлов І. С., 2016

УДК 628.9

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРОКОМПАРАТОРА

*Михеенко Л. А., Бахаревич А. А.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*E-mail: [mlaoeop@gmail.com](mailto:mlaoeop@gmail.com)*

*Проведен метрологический анализ оригинального широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе двух оптически-сопряженных интегрирующих сфер для прецизионной радиометрии, проанализированы его метрологические характеристики которые существенно превосходят известные аналоги. Проанализированы основные погрешности спектрокомпаратора, разработаны рекомендации по их минимализации и выбору элементной базы.*

**Ключевые слова:** *спектрокомпаратор, метрологический анализ, радиометрия, интегрирующая сфера*

### **Введение**

Одним из основных устройств систем передачи единиц радиометрических величин (прежде всего яркости и спектральной плотности яркости), является спектрокомпаратор, метрологические характеристики которого и определяют, в первую очередь, погрешности, диапазон работы и спектральные характеристики конкретного участка поверочной схемы [1]. Однако известные спектрокомпараторы, особенно высших разрядов, по мнению специалистов уже не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, прежде всего по динамическому диапазону сравниваемых радиометрических величин и общей погрешности компарирования, в которой основную долю составляют погрешности позиционирования компаратора относительно излучателей и погрешности установки коэффициента ослабления [2–4].

Целью настоящей работы является метрологический анализ рассмотренного в [5] оригинального широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе двух оптически-сопряженных интегрирующих сфер и разработка рекомендаций по его проектированию с заданными точностными параметрами.

### **Постановка задачи**

Метрологический анализ и разработка практических рекомендаций по выбору и элементной базы и проектированию с заданными точностными параметрами.

### **Основная часть**

Схема широкодиапазонного спектрокомпаратора показана на рис. 1.

Она состоит из оптического ослабителя, на входную апертуру которого поступает

компарированное излучение, монохроматора, который выделяет необходимый участок спектра излучения на заданной длине волн и приемо-регистрирующего устройства, которое принимает, преобразует и усиливает оптический сигнал поступающий из монохроматора.

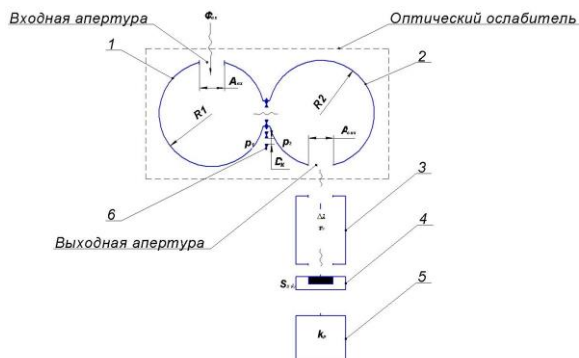


Рис. 1. Широкодиапазонный спектрокомпаратор: 1 – первая интегрирующая сфера (ИС1); 2 – вторая интегрирующая сфера (ИС2); 3 – монохроматор; 4 – приемник излучения; 5 – приемо-регистрирующее устройство; 6 – калибровочная диафрагма

Оптический ослабитель состоит из двух интегрирующих сфер, между которыми установлена калибровочная диафрагма переменного сечения. Изменяя площадь сечения калибровочной диафрагмы можно изменять величину потока, поступающего из первичной сферы во вторичную и, тем самым, изменять коэффициент пропускания ослабителя в широких пределах.

Интегральный сигнал на выходе спектрокомпаратора описывается выражением:

$$\tau_n = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_K}{[4\pi R_1^2 - \rho_1 (4\pi R_1^2 - (\pi R_{\text{Вх}}^2 + \pi R_K^2))] \cdot [4\pi R_2^2 - \rho_2 (4\pi R_2^2 - (\pi R_{\text{Вых}}^2 + \pi R_K^2))]}, \quad (3)$$

где:  $R_{\text{Вх}}$  – радиус входной апертуры;  $R_1$  – радиус внутренней поверхности первой сферы;  $R_2$  – радиус внутренней поверхности второй сферы;  $R_K$  – радиус калибровочной диафрагмы;  $R_{\text{Вых}}$  – радиус выходной апертуры.

Проанализируем погрешности, вносимые каждым элементом ослабителя в его суммарную

$$\delta_o = \frac{\Delta \tau_o}{\tau_o} = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau_o}{\partial R_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial R_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_2}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial \rho_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta \rho_1}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial \rho_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta \rho_2}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial R_{\text{Вх}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_{\text{Вх}}}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial R_K}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_K}{\tau_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_o}{\partial R_{\text{Вых}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta R_{\text{Вых}}}{\tau_o}\right)^2}, \quad (4)$$

где составляющими есть квадраты относительных первичных погрешностей с их частными

- Изменение радиуса кривизны первой ИС:

$$\frac{\partial \tau_o}{\partial R_1} = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_K^2 \cdot (\pi R_1 - 8\pi R_1 \rho_1)}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_K^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (\pi R_{\text{Вых}}^2 - 4\pi R_2^2 + \pi R_K^2) + 4\pi R_2^2]}, \quad (5)$$

$$G = \int_{\Delta \lambda} \Phi_{\text{Вх}}(\lambda) \tau_n(\lambda) \tau_m(\lambda) S_{\text{П}}(\lambda) K_p d\lambda, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{Вх}}(\lambda)$  – спектральный поток излучения на входе спектрокомпаратора;  $\tau_n(\lambda)$  и  $\tau_m(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания оптического ослабителя и монохроматора соответственно;  $S_{\text{П}}(\lambda)$  – спектральная чувствительность приемника излучателя;  $K_p$  – коэффициент усиления приемо-регистрирующего устройства;  $\Delta \lambda$  – полоса пропускания оптического тракта, определяемая полосой пропускания монохроматора.

Очевидно, что случайная погрешность компарирования будет определяться погрешностью оптического ослабителя  $\delta_o$ , погрешностью монохроматора  $\delta_M$  и погрешностью приемо-регистрирующего устройства  $\delta_p$  [6]:

$$\delta_k = \pm \sqrt{\delta_o^2 + \delta_M^2 + \delta_p^2}, \quad (2)$$

Так как монохроматор и приемо-регистрирующее устройство являются покупными изделиями, метрологические характеристики которых известны, ниже рассматриваются более детально погрешности оптического ослабителя, которые, как показали наши исследования, и определяют, в основном, погрешности всего устройства.

#### Погрешность оптического ослабителя

В [5] было получено выражение, описывающее зависимость коэффициента пропускания оптического ослабителя от его основных конструктивных параметров:

погрешность  $\delta_o$ , воспользовавшись методикой, описанной в [6].

Если считать величины в (3) независимыми, то относительная погрешность коэффициента пропускания ослабителя  $\delta_o = \Delta \tau_o / \tau_o$ , обусловленная частными погрешностями отдельных факторов –  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta \rho_1$ ,  $\Delta \rho_2$ ,  $\Delta R_{\text{Вх}}$ ,  $\Delta R_{\text{Вых}}$ ,  $\Delta R_K$ , может быть описана выражением:

производными – коэффициентами влияния первичных погрешностей (5)–(11).

- Изменение радиуса кривизны второй ИС:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_2} = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}^2 (8\pi R_2 - 8\pi R_2 \rho_2)}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (6)$$

- Деградация внутреннего покрытия первой ИС:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial \rho_1} = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}^2 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2)}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (7)$$

- Деградация внутреннего покрытия второй ИС:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial \rho_2} = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}^2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2)}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (8)$$

- Изменение радиуса входной апертуры:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_{\text{Вх}}} = \frac{2\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}^2 (\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2) - 2\pi^3 R_{\text{Вх}}^3 \cdot R_{\text{К}}^2 \cdot \rho_1}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (9)$$

- Изменение радиуса выходной апертуры:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial A_{\text{Вых}}} = \frac{\pi^2 \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}^2 \cdot \rho_2}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (10)$$

- Изменение радиуса калибровочной диафрагмы:

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_{\text{К}}} = \frac{2\pi \cdot R_{\text{Вх}}^2 \cdot R_{\text{К}}}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2} - \frac{2\pi^3 R_{\text{Вх}}^3 \cdot R_{\text{К}}^2 \cdot \rho_1 [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2] - 2\pi^3 R_{\text{Вх}}^3 \cdot R_{\text{К}}^2 \cdot \rho_2 [\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]}{[\rho_1 (\pi R_{\text{Вх}}^2 - 4\pi R_1^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_1^2]^2 \cdot [\rho_2 (A_{\text{Вых}} - 4\pi R_2^2 + \pi R_{\text{К}}^2) + 4\pi R_2^2]^2}, \quad (11)$$

При численном анализе ослабителя воспользуемся следующими упрощениями:

$$A_1 = A_2; \quad \rho_1 = \rho_2; \quad A_{\text{Вх}} = \frac{A_1}{5}; \quad A_2 = 10 A_{\text{Вых}};$$

$0 \leq A_{\text{К}} \leq A_{\text{Вх}}$ , полученными в [5].

Радиус выходной апертуры принят с учетом размеров входной щели монохроматора (МДР – 204).

Следовательно, исходные данные для расчёта будут:

$$R_{\text{Вх}} = 0,055 \text{ м}; \quad R_1 = 0,57 \text{ м}; \quad R_2 = 0,57 \text{ м}; \\ R_{\text{К}} = 0,08 \text{ м}; \quad A_{\text{Вых}} = 0,1 \text{ м}; \quad \rho_1 = 0,897; \quad \rho_2 = 0,998.$$

Числовые значения коэффициентов влияния ослабителя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты влияния первичных погрешностей

Источник погрешности	Коэффициент влияния	Численные значения коэффициента влияния	Диапазон значений погрешностей
Изменение радиуса кривизны первой ИС	$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_1}$	0.086, м <sup>-1</sup>	0.001..0.01
Изменение радиуса кривизны второй ИС	$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_2}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$ , м <sup>-1</sup>	0.001..0.01
Деградация внутреннего покрытия первой ИС	$\frac{\partial \tau_0}{\partial \rho_1}$	-0.236, м <sup>-1</sup>	0.1..0.36
Деградация внутреннего покрытия второй ИС	$\frac{\partial \tau_0}{\partial \rho_2}$	-0.23102	0.001..0.01
Изменение радиуса входной апертуры	$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_{\text{Вх}}}$	-0.323, м <sup>-1</sup>	0.001..0.018
Изменение радиуса выходной апертуры	$\frac{\partial \tau_0}{\partial A_{\text{Вых}}}$	0.058, м <sup>-1</sup>	0.0001..0.0005
Изменение радиуса калибровочной диафрагмы	$\frac{\partial \tau_0}{\partial R_{\text{К}}}$	0.126, м <sup>-1</sup>	0.001..0.0005

#### Метрологический анализ ослабителя

Зависимость относительной погрешности ослабителя от первичных погрешностей показаны на рис. 2.

Согласно рис. 2 наибольший вклад в суммарную погрешность вносит нестабильность внутреннего покрытия первой и второй ИС. Как показал анализ литературы, это обусловлено деградацией материала, его гигроскопичностью,

запылением и другими факторами. Для каждого из покрытий, которые используют на практике, эти факторы проявляются в разной мере, но нужно учитывать то, что даже долговечные традиционные покрытия на базе BaSO<sub>4</sub> и MgO, не могут обеспечить стабильность лучше чем 0.05% в час [7–8]. Наиболее перспективными в плане стабильности и хороших оптических характеристик считаются покрытия из политетрафторэтилена, который имеет

коэффициент диффузного отражения 0.99 в диапазоне 400..1500 нм и 0.95 в диапазоне до 2500 нм, но в Украине их использование достаточно ограничено.

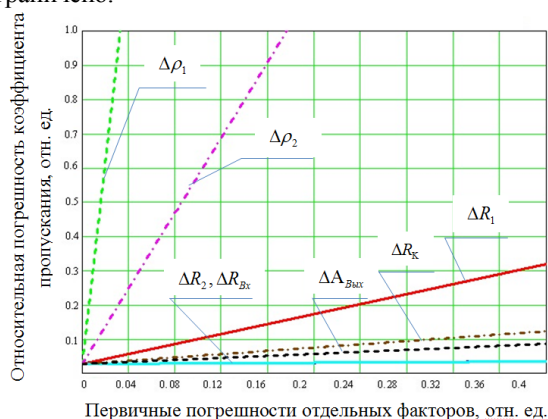


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности ослабителя от первичных погрешностей

Таблица 2. Изменение спектральных характеристик покрытия Spectralon на протяжении времени

Длина волны, мкм	Коэффициент отражения, отн. ед.	Изменение коэффициента отражения за		
		1 месяц	4 месяца	1.5 года
0.4	0.988	0.987	0.988	0.986
0.45	0.990	0.988	0.988	0.980
0.5	0.989	0.985	0.987	0.985
0.55	0.987	0.983	0.987	0.986
0.6	0.987	0.984	0.988	0.988
0.65	0.987	0.985	0.988	0.988

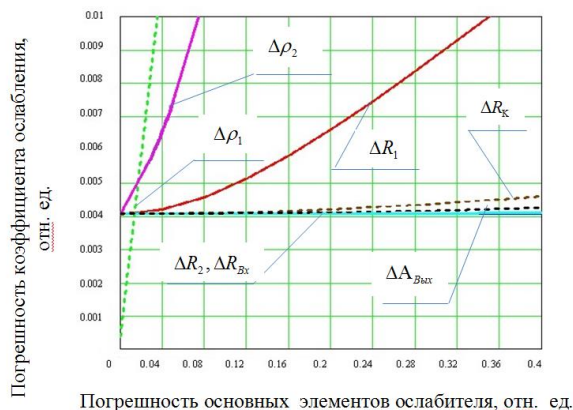


Рис. 3. Погрешность коэффициента ослабления в зависимости от нестабильности главных элементов ослабителя

Еще меньшее влияние имеет нестабильность входной апертуры, которой можно пренебречь.

Как было показано выше, погрешность установки калибровочной диафрагмы составляет 3 – 5% для ирисовой и прямоугольной диафрагмы, и меньше 0.01% для сменной диафрагмы постоянного сечения.

#### Элементная база спектрокомпаратора

В предложенном спектрокомпараторе могут использоваться основные элементы, рассмотренные в [2–4], в том числе, для калибровки оптико-электронных систем космического базирования [2] –

В частности большой интерес составляет Spectralon [9], который имеет коэффициент диффузного отражения  $99 \pm 5\%$  в диапазоне 300 – 1800 нм, (Табл. 2).

Изменение размеров интегрирующих сфер, в относительных единицах, дает значительный вклад в общей погрешности, но по абсолютным величинам не превышает сотых долей процента даже при достаточно жестком температурном режиме. Асферичность и другие нарушения формы интегрирующих сфер носят систематический характер и учитываются при калибровке. Зависимость погрешности коэффициента ослабления от погрешности основных элементов ослабителя, с учетом их реальных значений, показаны на рис. 3 и могут быть использованы при оценке точности оптических ослабителей еще на стадии проектирования.

приемники излучения ФД-24К и РТН-12, прецизионный вольтметр В7-34А. В этом случае погрешность компарирования не превышает 0.2..0.3%, спектральный диапазон находится в пределах 0.35..2.2 мкм, а динамический диапазон ослабителя не меньше  $10^3..10^4$ , что вполне достаточно для решения большинства задач прецизионной радиометрии.

#### Выводы

Проанализированы метрологические характеристики широкодиапазонного спектрокомпаратора для прецизионной радиометрии, которые превосходят известные аналоги.

Показано, что при использовании современной элементной базы спектрокомпаратор обеспечивает погрешность компарирования не более 0.2..0.3%, а динамический диапазон не менее  $10^3..10^4$ . В будущем предполагается разработка методики проектирования предложенного спектрокомпаратора с заданными параметрами и повышением его точности. Полученные результаты будут полезны широкому кругу специалистов в области прецизионной фотометрии и радиометрии.

#### Литература

1. Голубь Б. И. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений / Б. И. Голубь, Л. Ф. Котюк, Л. Ю. Кузин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 151с.

2. Колобродов В. Г. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – №3. – С. 98 – 104.
3. Міхеєнко Л. А. Методи, засоби та метрологічне забезпечення калібрування еталонних випромінювачів / Л. А. Міхеєнко, В. І. Микитенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2008. – №6. – С. 94 – 99.
4. Воропай Е. С. Техніка фотометрії високого амплитудного розрешення / Е. С. Воропай, П. Л. Торпачев. – М.: Университетское, 1988. – 208 с.
5. Міхеєнко Л. А. Енергетичний аналіз та основи проектування широкодіапазонного спектрокомпаратора на базі оптично-спряжених інтегровальних сфер / Л. А. Міхеєнко, А. О. Бахаревич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №4. – С. 134 – 140.
6. Кушнір Ф. В. Электрорадиоизмерения / Ф. В. Кушнір. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
7. Гуревич М. М. Фотометрия / М. М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
8. Колобродов В. Г. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – №4. – С. 106 – 114.
9. Journal «A Guide to Reflectance Coatings and Materials» <http://labsphere.com/solutions-by-industry/lighting/>

УДК 628.9

**Л. А. Міхеєнко, А. О. Бахаревич***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна***МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ШИРОКОДІАПАЗОННОГО СПЕКТРОКОМПАРАТОРА**

**Проблематика.** Для нашого часу відомі спектрокомпаратори, особливо вищих розрядів, за думкою фахівців вже не задовольняють вимогам до них, по-перше, за динамічним діапазоном радіометричних величин, що порівнюють, та загальною похибкою компарування, у котрій основну долю складають похибки позиціонування компаратора відносно випромінювачів і похибки установки коефіцієнта ослаблення. Тому доцільно розробити компаратор із широким діапазоном пропускання оптичного випромінювання.

**Мета дослідження.** Метрологічний аналіз оригінального широкодіапазонного спектрокомпаратора на основі двох оптично-сполучених інтегруючих сфер і розробка рекомендацій з його проектування із заданими точнісними параметрами.

**Результати дослідження.** Отримано рівняння, що дозволяють розрахувати та порівняти метрологічні характеристики компараторів.

**Висновки.** Проаналізовано метрологічні характеристики широкодіапазонного спектрокомпаратора для прецизійної радіометрії. Показано, що при використанні сучасної елементної бази спектрокомпаратор значно перевершує відомі аналоги.

**Ключові слова:** спектрокомпаратор, метрологічний аналіз, радіометрія, інтегруюча сфера.

**L. A. Mikheenko, A. A. Bakharevych***National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***METROLOGICAL ANALYSIS OF A SPECTRUM COMPARATOR WIDE-RANGE**

**Background.** Presently known spektrum comparator, especially the higher categories, according to experts, who does not satisfy the requirements imposed on them, especially in dynamic range compared radiometric values and common errors of calibration of where the main proportion of the positioning error of the comparator with respect to radiators and setting error attenuation coefficient, this comparator is expedient to develop a wide range of optical transmittance.

**Objective.** Metrological analysis of the original spektrum comparator wide-range on the basis of two optically coupled integrating spheres and development of recommendations for the design with the specified accuracy parameters.

**Results.** The equations that allow to calculate and compare the metrological characteristics of the comparators.

**Conclusions.** Metrological characteristics are analyzed for precision spektrum comparator wide-range radiometry. It is shown that significantly exceeds known analogues by using modern element base of the spektrum comparator.

**Keywords:** spektrum comparator, metrological analysis, radiometry, integrating sphere.

*Надійшла до редакції 24 листопада 2015 року**Рецензовано 09 грудня 2016 року*

© Міхеєнко Л. А., Бахаревич А. А., 2016