

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 535.24, 628.9

Л. А. Міхеєнко¹
А. О. Бахаревич¹**ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ
ШИРОКОДІАПАЗОННОГО СПЕКТРОКОМПАРАТОРА НА
БАЗІ ОПТИЧНО-СПРЯЖЕНИХ ІНТЕГРУВАЛЬНИХ СФЕР**¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Запропонована та проаналізована схема широкодіапазонного спектрокомпаратора на базі оптично-спряжених інтегровальних сфер для вимірювання енергетичної яскравості джерел випромінювання; отримано аналітичні вирази, що описують роботу спектрокомпаратора, наведено результати дослідження спектральних та енергетичних характеристик приладу. Розроблено рекомендації щодо підбору робочих елементів спектрокомпаратора — монохроматора і приймачів випромінювання, визначено найдоцільніші конструктивні параметри оптичного послаблювача.

Ключові слова: оптична радіометрія, оптична метрологія, спектрокомпаратор, інтегровальна сфера, енергетичний аналіз.

Вступ

Однією з основних проблем сучасної оптичної радіометрії є компарування одиниць фотометричних величин при передаванні їх від еталонних до робочих випромінювачів. Особливо гостро ця проблема проявляється при передачі одиниць яскравості та спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ), так як при цьому виникають додаткові труднощі точного позиціонування випромінюваних площадок випромінювачів по відношенню до компаратора. Крім цього, значний діапазон яскравостей, що використовуються в сучасних вимірювальних випромінювачах, потребує щоби роботу компаратора виконувалась у широкому динамічному (не менше ніж $10^2 \dots 10^4$) і спектральному (не вужче 0,4...2,5 мкм) діапазонах [1].

Існуючі спектрокомпаратори цим вимогам в повному обсязі не відповідають [2—3]. В [4] запропонована принципова схема широкодіапазонного спектрокомпаратора на базі оптично-спряжених інтегровальних сфер (ІС), який працює в широкому динамічному діапазоні яскравості і не потребує точного позиціонування еталонного та робочого випромінювачів відносно вхідної апертури спектрокомпаратора.

Метою роботи є отримання аналітичних виразів, що описують роботу широкодіапазонного спектрокомпаратора, дослідження на їх основі спектральних та енергетичних характеристик приладу і розробка практичних рекомендацій щодо вибору елементної бази та проектування.

Функціональна схема спектрокомпаратора

Функціональна схема запропонованого широкодіапазонного спектрокомпаратора показана на рис. 1. Вона складається з оптичного послаблювача, на вхідну апертуру якого надходить компароване випромінювання, монохроматора, що відокремлює необхідну ділянку спектра випромінювання на заданій довжині хвилі і підключеного до вихідної апертури послаблювача, приймача випромінювання, встановленого на виході монохроматора і підсилювально-реєстрального пристрою, що підсилює і реєструє сигнал від приймача випромінювання.

Оптичний послаблювач має дві ІС, між якими встановлено калібрувальну діафрагму змінного перетину. Змінюючи площу перетину діафрагми, можна змінювати величину потоку, що потрапляє з первинної сфери до вторинної і, тим самим, змінювати коефіцієнт пропускання послаблювача у широких межах.

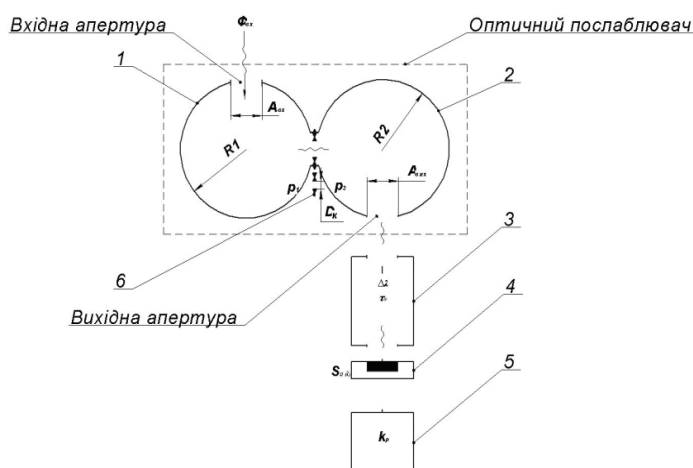


Рис. 1. Широкодіапазонний спектрокомпаратор:

- 1 — перша інтегральна сфера IC1; 2 — друга інтегральна сфера IC2; 3 — монохроматор; 4 — приймач випромінювання;
5 — підсилювально-реєструвальний пристрій;
6 — калібрувальна діафрагма

де $\Phi_{Вх}(\lambda)$ — спектральний потік випромінювання на вході спектрокомпаратора; $\tau_n(\lambda)$ і $\tau_M(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт пропускання оптичного послаблювача і монохроматора, відповідно; $S_{\Pi}(\lambda)$ — спектральна чутливість приймача випромінювання; K_P — коефіцієнт підсилення підсилювально-реєструвального пристрою; $\Delta\lambda$ — смуга пропускання оптичного тракту, визначена смугою пропускання монохроматора.

Зазначимо, що спектральна характеристика компаратора визначається, перш за все, спектральною характеристикою послаблювача, смугою пропускання монохроматора та спектральними характеристиками приймачів випромінювання, що використовуються.

Позаяк монохроматор, приймачі випромінювання і підсилювально-реєструвальний пристрій є покупними виробами, характеристики яких відомі і підбираються згідно з умовами, що висуваються до спектрокомпаратора (спектральний діапазон, ширина ділянки спектра, яка відокремлюється, і коефіцієнт перетворення), розглянемо детальніше роботу оптичного послаблювача, який, в основному, і визначає енергетичні та метрологічні характеристики всього пристрою.

Оптичний послаблювач

Розглянемо математичну модель послаблювача.

Нехай на вхідній апертурі першої ІС маємо освітленість $E_{Вх}$ (див. рис. 1), тоді до сфери потрапляє потік $\Phi_{Вх}$

$$\Phi_{Вх} = E_{Вх} A_{Вх}, \quad (2)$$

де $A_{Вх}$ — площа вхідної апертури.

Потік, потрапивши в середину першої ІС, багаторазово відбивається від її стінок (коефіцієнт відбивання якої дорівнює ρ_1) і створює результуючу освітленість, що дорівнює [5]:

$$E_1 = \frac{E_{Вх} A_{Вх}}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{Вх} + A_K)}{A_1} \right]}, \quad (3)$$

де A_1 — площа внутрішньої поверхні першої сфери; A_K — площа калібруючої діафрагми.

Потік, який пройшов через калібруючу діафрагму, буде дорівнювати:

$$F_K = E_1 A_K. \quad (4)$$

Потік, що потрапляє до другої ІС, багаторазово відбивається від її стінок (коефіцієнт відбивання якої — ρ_2) і створює результуючу освітленість E_2

Очевидно, що використання ІС не потребує точного позиціонування випромінювачів або їх зображень відносно вхідної апертури послаблювача. Достатньо, щоб випромінювання потрапляло в середину інтегральної сфери. Аналогічно не потрібне точне позиціонування монохроматора відносно вихідної апертури, що також підвищує точність всього пристрою і спрощує його конструкцію. Крім цього, компаратор не критичний до розмірів випромінювачів, що порівнюються і розмірів вхідної щілини монохроматора, які можуть змінюватись в широких межах.

Інтегральний сигнал на виході спектрокомпаратора G описується виразом

$$G = \int_{\Delta\lambda} \Phi_{Вх}(\lambda) \tau_n(\lambda) \tau_M(\lambda) S_{\Pi}(\lambda) K_P d\lambda, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{\Phi_K}{A_2} = \frac{E_1 A_K}{A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{Bx} + A_K)}{A_2} \right]}, \quad (5)$$

де A_2 — площа внутрішньої поверхні другої сфери; A_{Bux} — площа вихідної апертури.

Підставляючи (3) та (4) в (5), отримаємо:

$$E_2 = \frac{E_{Bx} A_{Bx} A_K}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{Bx} + A_K)}{A_1} \right] A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{Bux} + A_K)}{A_2} \right]}. \quad (6)$$

Освітленість поверхні другої ІС одночасно є освітленістю вихідної апертури E_{Bx} . Саме така освітленість буде сформована на вході монохроматора, який знаходиться за послаблювачем.

Тоді коефіцієнт послаблення τ_0 може бути розрахований з використанням формул (2) та (6):

$$\tau_n = \frac{A_{Bx} A_K}{A_1 \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - (A_{Bx} + A_K)}{A_1} \right] A_2 \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - (A_{Bux} + A_K)}{A_2} \right]}. \quad (7)$$

Враховуючи, що $A_1 = 4\pi R_1^2$, $A_2 = 4\pi R_2^2$, $A_{Bx} = \pi R_{Bx}^2$, $A_K = \pi R_K^2$, після певних перетворень вираз (7) переписеться у вигляді:

$$\tau_n = \frac{\pi^2 R_{Bx}^2 R_K}{\left[4\pi R_1^2 - \rho_1 \left(4\pi R_1^2 - (\pi R_{Bx}^2 + \pi R_K^2) \right) \right] \left[4\pi R_2^2 - \rho_2 \left(4\pi R_2^2 - (\pi R_{Bux}^2 + \pi R_K^2) \right) \right]}. \quad (8)$$

Енергетичний аналіз спектрокомпаратора

Проаналізуємо отриманий вираз (8) з точки зору енергетичних та спектральних характеристик спектрокомпаратора. При цьому враховуватимемо, що покриття інтегровальних сфер є селективним та описується спектральними коефіцієнтами відбиття $\rho_1(\lambda)$ та $\rho_2(\lambda)$ для першої та другої ІС, відповідно. В процесі аналізу, перш за все, будуть нас цікавити:

— спектральна характеристика послаблювача $\tau_n(\lambda)$, обумовлена спектральними характеристиками покриття ІС;

— залежність коефіцієнта пропускання τ_n від співвідношення радіусів першої та другої інтегровальних сфер R_1 та R_2 , відповідно, за сталого розміру калібрувальної діафрагми;

— залежність коефіцієнта пропускання τ_n від величини відносного отвору ІС, під яким розуміється відношення діаметра еквівалентного отвору $R_{omb.e}$ в ІС до її радіусів $\frac{R_{omb.e}}{R_{IC}}$, чи подвоєне

відношення квадратних коренів відповідних площ $2\sqrt{\frac{A_{omb.e}}{A_{IC}}}$ [6], за сталого значення калібрувальної

діафрагми, вхідного та вихідного отвору кожної з ІС. Під еквівалентним отвором вважається отвір в ІС, площа якого дорівнює сумі площ всіх реальних отворів;

— залежність коефіцієнта пропускання τ_n від коефіцієнта відбиття ІС.

Відповідні графіки цих функціональних залежностей, побудованих на основі (8), показані на рис. 2—5.

В розрахунках використовувались значення $\rho(\lambda)$ для найрозповсюдженіших покриттів ІС з сірчанокислого барію [3, 6] і на основі політетрафторетилену — спектролона SRS-99 [7] і покриття «Поліхром-1» [8]; покриття обох ІС вважають однаковим, тобто $\rho_1(\lambda) = \rho_2(\lambda)$.

Як бачимо з графіків, спектральний діапазон послаблювача складає 0,35...3,8 мкм для сірчанокислого барію (по рівню 0,1) та 0,2...4,5 мкм для покриття на основі політетрафторетилену. Максимальний коефіцієнт пропускання послаблювача забезпечується за співвідношення радіусів першої і другої ІС в межах 1:1.

Найскладнішим є вибір оптимального значення відносного отвору ІС. Точних рекомендацій на цей рахунок немає, але більшість дослідників вважають, що вони повинні знаходитись в межах від 1/10 до 1/5, причому зі зменшенням величини відносного отвору, інтегровальні властивості сфер покращується і, як наслідок, покращується однорідність формованого на виході поля яскравості [6, 9, 10]. Але при цьому значно зменшується величина τ_n .

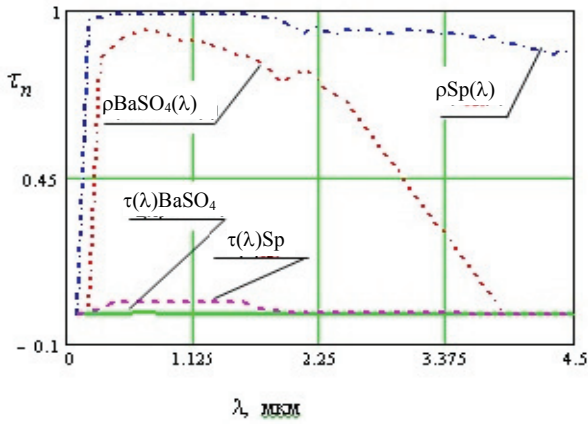


Рис. 2. Відносні спектральні характеристики покриттів на основі сірчанокислого барію, спектралону та оптичного послаблювача на їх основі

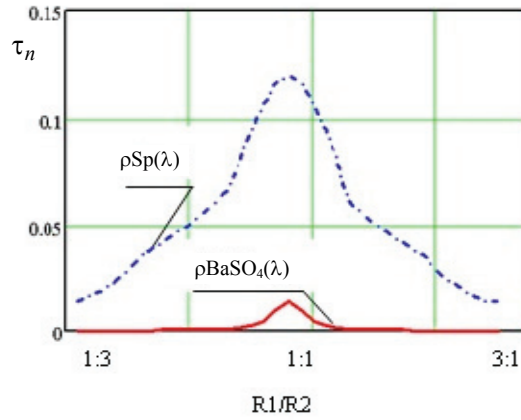


Рис. 3. Залежність коефіцієнта пропускання від співвідношення радіусів ІС R_1/R_2

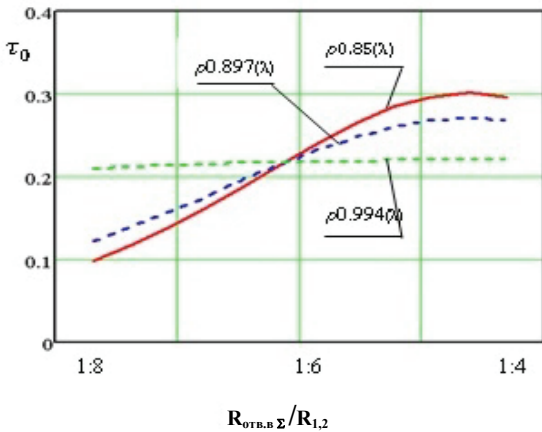


Рис. 4. Залежність коефіцієнта пропускання від величини відносного отвору ІС $R_{отв.в}$

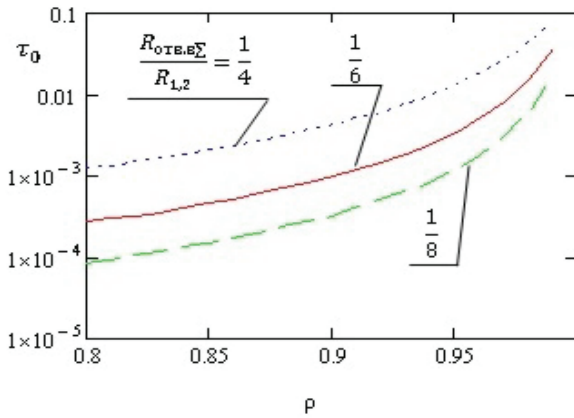


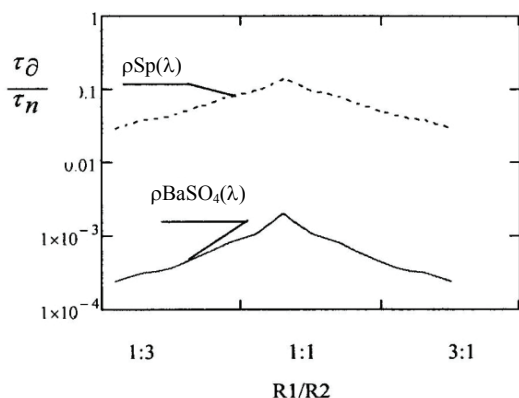
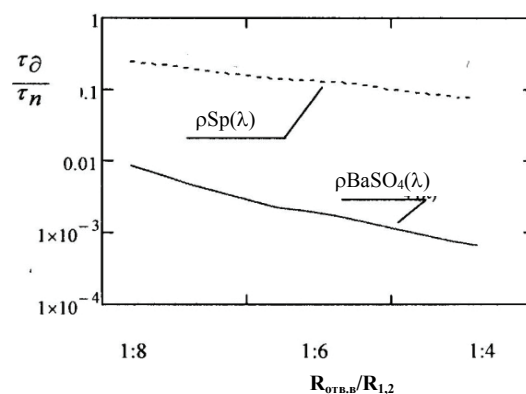
Рис. 5. Залежність коефіцієнта пропускання від коефіцієнта покриття ІС ρ

Проведені авторами експериментальні дослідження [11] показали, що коли величина відносного отвору менше ніж 1/6, то величина неоднорідності освітленості вихідної зониці послаблювача не перевищує 0,1 %, що цілком допустимо для прицевійних фотометричних систем. Це значення відносного отвору взяте як номінальне.

Як було показано в [12], на величину коефіцієнта послаблення системи двох оптично-спряжених ІС впливає також взаємний обмін енергії між ними. Тобто енергія, яка потрапляє з ІС1 до ІС2, частково повертається назад через калібрувальну діафрагму, а потім, після розсіювання в ІС1, знову повертається до ІС2. В результаті цього на виході ІС2 з'являється додаткова освітленість $E_{вух. \partial}$, що відповідає збільшенню загального коефіцієнта пропускання на величину τ_{∂} . Залежності коефіцієнта пропускання послаблювача від його конструктивних параметрів з урахуванням додаткової освітленості вихідної апертури, показані на рис. 6 та 7. В розрахунках використане співвідношення, отримане в [9].

$$\frac{\tau_{\partial}}{\tau_n} = \frac{A_K^2}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_K - A_{Вх}}{A_1}} \cdot \frac{1}{1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K - A_{Вух}}{A_2}} \quad (9)$$

Як видно з графіків, збільшення коефіцієнта послаблення може становити 5...15 % і має обов'язково враховуватись під час проектування прицевійних спектрокомпараторів.

Рис. 6. Залежність додаткового коефіцієнта пропускання від співвідношення радіусів ІС R_1/R_2 Рис. 7. Залежність додаткового коефіцієнта пропускання від величини відносного отвору ІС $R_{0т.в.}/R_{1,2}$

Основи проектування та елементна база спектрокомпаратора

Визначають основні геометричні параметри послаблювача, треба враховувати, що вхідна апертура ІС1 має узгоджуватись з розмірами зображення калібрувального джерела випромінювання, що формується проекційною оптичною системою, а вихідна — з розмірами вхідної щілини монохроматора. Максимальна площа калібрувальної діафрагми, як показано в [6], повинна в 2—3 рази перевищувати площу вхідної та вихідної апертур. Відносний отвір інтегровальних сфер доцільно обирати в межах 1/5...1/6.

Конструкція калібрувальної діафрагми має найбільше значення для точності послаблювача. Ірисові чи прямокутні вимірювальні діафрагми компактніші, але забезпечують похибку установки τ_n в межах 3...5 %. Вищу точність (похибка менше ніж 0,1 %), забезпечують змінні діафрагми постійного перетину (наприклад виконані на сталевій стрічці, що протягається між інтегровальними сферами), але габарити такої системи більші.

З урахуванням отриманих спектральних та енергетичних характеристик послаблювача, авторами розглянуті найприйнятніші для спектрокомпаратора монохроматори та приймачі випромінювання, характеристики та параметри яких показані в таблицях 1—3.

Таблиця 1

Монохроматори

Монохроматор	Країна	Оптична система; спектр. діап., D/f ; f ; розмір дифракційних ґраток	Оптичних характеристики Зворотна дисперсія, відтворення по λ , точність встановлення λ , середній крок сканування, роздільна здатність	Спектральні щілини, ширина щілини, кількість вих. щілин	Габаритні розміри, маса
МДР-204	Росія	Еберта-Фасті; 190...5000 нм; 1/6; 300 мм; 40×50 мм	2,6 нм/мм; 0,5 нм; 0,1 нм; 12000 нм	0-4; 1	370×240×170 мм; 7,5 кг
МДР-206	Росія	Еберта-Фасті; 190...5000 нм; 1/4; 180 мм; 40×50 мм	4,3 нм/мм; 0,5 нм; 0,1 нм; 9000 нм	0-4; 1	280×240×170 мм; 6,8 кг
МДР-40	Росія	—; 200...25000 нм; 1/6; 300 мм;	2,0 нм/мм; 0,025 нм;	0-4; 1	250×440×280 мм; 13 кг

Таблиця 2

ФЕП для малопотужних джерел випромінювання

ФЕП	Країна, фірма	Спектральний діапазон, нм	Час відклику T_r (нс)	Розмір чутливої поверхні, мм	Габаритні розміри, мм
H5773	Японія Hamamatsu	185...900	0,78	Ø8	50×25×18
H5783					22×22×50
H7710		185...900	1,4	3,7×13	19×53×51
H8567					38×95×50
H7732		185...900	2,2	4×20	38×95×50
H7826		300...850	1,5	Ø 15	26×50×56

Вимірювальні приймачі випромінювання для потужних джерел випромінювання

Тип приймача випромінювання	Країна, фірма	Матеріал чутливого шару	Спектральний діапазон, мкм	Чутливість	Розмір чутливої поверхні, мм	Габаритні розміри, мм
ФД-24К	Росія	Si	0,47...1,0	$0,6 \cdot 10^{-8}$ А/Лк	Ø 10	6,5×19,6
ФД-288Б	Україна	Si	0,38...0,78	$8 \cdot 10^{-6}$ А·м ² /Лк	Ø10	—
S1227	Японія Hamamatsu	Si	0,19...1,0	0,12 А/Вт	10×10	17×17
J16Si-8A+RO3M-Se	США Judson technologies	Si, Ge Sandwich	0,4...1,0 1,1...1,8	0,45 А/Вт 0,65 А/Вт	Ø 5 Ø 3	—
S2281	Японія Hamamatsu	Si	0,19...1,1	0,5 А/Вт	Ø 10	25×10
G-050	США EOS	Ge	1,0...1,8	0,9 А/Вт	10×10	17×17
РТН-20	Росія	Сурмяна чорнота	0,18...5,5	(0,5...2,0) В/Вт	1,5×12	110×25

З використанням вказаної елементної бази, мінімально реєструвальна яскравість може складати $0,02 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2$, а динамічний діапазон не менше ніж $10^3 \dots 10^4$. При цьому спектральний діапазон системи буде не вужче $0,35 \dots 1,2$ мкм, що достатньо для розв'язку задач переносу одиниць яскравості та СЦЕЯ від існуючих нині еталонних випромінювачів.

Висновки

Проаналізована схема широкодіапазонного спектрокомпаратора на базі оптично-спряжених інтегровальних сфер та виконані дослідження його спектральних та енергетичних характеристик.

Доведено, що з використанням сучасної елементної бази, динамічний діапазон компарованих величин складає не менше ніж $10^3 \dots 10^4$ в спектральному діапазоні, який не вужче ніж $0,35 \dots 1,2$ мкм.

Розроблено рекомендації щодо підбору робочих елементів спектрокомпаратора монохроматора і приймачів випромінювання, визначені найдоцільніші конструктивні параметри оптичного послаблювача. Показано, що найбільша величина коефіцієнта пропускання досягається за однакових розмірів інтегровальних сфер, а їх відносний отвір доцільно вибирати в межах $1/5 \dots 1/6$.

В подальшому планується виконати аналіз точності спектрокомпаратора і дослідити його метрологічні характеристики.

Отримані результати будуть корисні широкому колу фахівців в галузі оптичної радіометрії та метрології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Голубь Б. И. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений / Б. И. Голубь, Л. Ф. Котюк, Л. Ю. Кузин. — М. : Горячая линия–Телеком, 2006. — 151 с.
2. 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.
3. Воропай Е. С. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения / Е. С. Воропай, П. Л. Торпачев. — Минск : Университетское, 1988. — 208 с.
4. Патент на корисну модель № 52547 Фотометричний ослаблювач / Л. А. Міхеєнко, І. Ю. Білінська : власник НТУУ «КПІ» ; опубл. 25.08.2010; Бюл. № 16.
5. Гуревич М. М. Фотометрия / М. М. Гуревич. — Л. : Энергоатомиздад, 1983. — 320 с.
6. Теорія дифузного випромінювання на основі інтегруючої сфери / [В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко та ін.] // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — С. 106—111.
7. A Guide to Reflectance Coatings and Materials : Journal [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://labsphere.com>.
8. Гуминецкий С. Г. Спектрофотометрические свойства покрытия из материала «Полихром-1» / С. Г. Гуминецкий, Л. С. Ловинский, Я. П. Мачук // ОМП, 1990. — № 2. — С. 19—21.
9. Mikheenko L. A. Precise uniform light source based on optically connected integration spheres for optical instrument calibration / L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky // Proceedings of SPIE. — 2011. — V. 8154. — P. 19.1—19.9.
10. Mikheenko L. A. Metrological advantages of the light source based on optically connected integration spheres / L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky // Proceedings of SPIE. — 2012. — V. 8111. — P. 39.1—39.12.

11. Михеенко Л. А. Экспериментальное исследование диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы / Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий, Ю. А. Гордієнко // Вісник НТУУ «КПІ». — Серія «Приладобудування». — 2007. — Вип. 34. — С. 60—68.

12. Міхеєнко Л. А. Радиометричне калібрування прецизійних оптико-електронних зондуєчих систем космічного базування : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / Л. А. Міхеєнко. — К. : 2013.

13. Іщенко В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. — Вінниця. : ВНТУ. — 2010. — С. 138.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.04.2015

Міхеєнко Леонід Андрійович — д-р техн. наук, професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів;
Бахаревич Аліна Олександрівна — студентка приладобудівного факультету, e-mail: pandaamfora@gmail.com.
Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

L. A. Mikheienko¹
A. O. Bakharevych¹

Power analysis and bases of planning of wide-range spectrocomparator on a base of optically joined integrating spheres

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

The chart of wide-range spectrocomparator on base optically conjuncted integrating spheres for measuring of power brightness of radiant has been offered and analyzed; analytical expressions describing the work of spectrocomparator have been got, results of the research of spectral and power descriptions of the device have been brought. Recommendations on the selection of working elements of spectrocomparator - monochromator and receivers of radiation have been worked out, the most expedient structural parameters of the optical attenuator have been defined.

Keywords: optical radiometry, optical metrology, *spectrocomparator*, integrating sphere, power analysis.

Mikheienko Leonid A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Optical and Optoelectronic Devices;
Bakharevych Alina O. — Student, e-mail: pandaamfora@gmail.com

Л. А. Михеєнко¹
А. А. Бахаревич¹

Энергетический анализ и основы проектирования широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе оптически-сопряженных интегрирующих сфер

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут»

Предложена и проанализирована схема широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе оптически сопряженных интегрирующих сфер для измерения энергетической яркости источников излучения; получены аналитические выражения, описывающие работу спектрокомпаратора, приведены результаты исследования спектральных и энергетических характеристик прибора. Разработаны рекомендации по подбору рабочих элементов спектрокомпаратора-монохроматора и приемников излучения, определены наиболее целесообразные конструктивные параметры оптического ослабителя.

Ключевые слова: оптическая радиометрия, оптическая метрология, спектрокомпаратор, интегрирующая сфера, энергетический анализ.

Михеєнко Леонід Андреевич — д-р техн. наук, професор кафедри оптичних та оптико-електронних приборів;
Бахаревич Аліна Александровна — студент приборостроительного факультета, e-mail: pandaamfora@gmail.com