

ГІПОТЕЗИ. НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РІШЕННЯ НАУКОВИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ПРОБЛЕМ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 528.7: 29.78

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР СХЕМИ КАЛІБРОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА ЗІ ЗМІННОЮ ЯСКРАВІСТЮ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ФОТОМЕТРІЇ

*Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А., Петрущенко Л.А., Національний технічний
університет України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

Проведено порівняльну оцінку ефективності різних алгоритмів роботи й схемотехнічних рішень інтегральних випромінювачів із каліброваною яскравістю. Обґрунтовані найбільш перспективні з погляду вимог прецизійної фотометрії схеми.

Вступ

Калібровані випромінювачі зі змінною яскравістю (КВЗЯ) становлять основу сучасної прецизійної фотометрії. Вони широко використовуються при вимірюванні енергетичних характеристик приймачів випромінювання (ПВ), для калібрування фотометричного обладнання, атестації оптико-електронних вимірювальних приладів тощо [1-3]. Однак, незважаючи на останні досягнення у цьому напрямку, існуючі КВЗЯ не задовольняють в повній мірі вимогам сучасної оптичної метрології. В першу чергу це стосується задач атестації багатоеlementних ПВ та приладів на їх основі (цифрових відеосистем, матричних мікроскопів, багатозональних скануючих пристроїв повітряного та космічного базування) [4-5]. В Україні стан справ ще гірший у зв'язку з майже повною відсутністю необхідної теоретичної та елементної бази. Тому гостро постала проблема створення КВЗЯ для точної фотометрії.

Мета роботи – аналіз відомих та можливих схем побудови КВЗЯ, виявлення їх переваг та недоліків, пошук нових перспективних КВЗЯ, які б відповідали сучасним вимогам до прецизійного фотометричного устаткування.

Критерії порівняння КВЗЯ

КВЗЯ складається з первинного джерела випромінювання (ПДВ), регульованого ослаблювача випромінювання (РОВ), оптичної системи та одного чи декількох вторинних джерел випромінювання (ВДВ). Як ВДВ можуть бути використані розсіювальні елементи або вихідна апертура оптичної системи.

Найважливішим критерієм для оцінки можливості застосування того чи іншого методу регулювання яскравості КВЗЯ в інтегральному освітлювачі атестаційної метрологічної установки можна вважати точність дотримання залежності яскравості ВДВ від регульованого параметру, тобто градуовальну характеристику. При цьому суттєву перевагу мають методи, які забезпечують лінійну градуовальну характеристику КВЗЯ, що у багатьох випадках спрощує практичну реалізацію способу.

Крім градуовальної характеристики, для порівняльної оцінки випромінюва-

чів з регульованою яскравістю використовувались наступні параметри та критерії:

- максимальна досяжна яскравість ВДВ L_{\max} ;
- максимальна відносна яскравість $0 < L_{\max}^{\circ} \leq 1$ – відношення максимальної яскравості розглядуваного КВЗЯ до найбільшого значення яскравості серед всіх порівнюваних каліброваних випромінювачів;
- діаметр лінійної зони вихідної апертури випромінювача, у якій нелінійність розподілу яскравості не перевищує 1...2% ($K_n \leq 1...2\%$) $\Delta d_{\text{лін}}$;
- відносний діаметр зони рівномірної яскравості по відношенню до КВЗЯ з максимальною величиною лінійної зони $0 < \Delta d_{\text{лін}}^{\circ} \leq 1$;
- відносна величина габаритів КВЗЯ (по відношенню до схеми з найбільшим об'ємом) $0 < V_B^{\circ} \leq 1$;
- габаритно-енергетичний фактор $K_{r/e} = \frac{L_{\max}^{\circ} \cdot \Delta d_{\text{лін}}^{\circ}}{V_B^{\circ}}$, $0 < K_{r/e} \leq 1$;
- відносна неселективність $\Delta \lambda^{\circ}$ – відносна зміна спектру ВДВ по відношенню до ПДВ, $0 < \Delta \lambda^{\circ} \leq 1$;
- відносна похибка встановлення яскравості ΔL° – відношення похибки розглядуваного випромінювача до випромінювача з максимальною похибкою серед порівнюваних, $0 < \Delta L^{\circ} \leq 1$;
- точнісний (метрологічний) фактор $K_M = \Delta \lambda^{\circ} \cdot \frac{1}{\Delta L^{\circ}}$;
- узагальнений показник якості КВЗЯ $K = K_{r/e}^{\circ} \cdot K_M^{\circ}$.

Очевидно, що найперспективніший КВЗЯ повинен мати максимальне значення K та максимально задовольняти зазначеним раніше вимогам по максимальній яскравості, динамічному діапазону яскравості, розмірам вихідної апертури тощо.

Аналіз відомих схем КВЗЯ

Попередній аналіз різноманітних КВЗЯ дозволив визначити для більш детального дослідження нижче наведені схеми.

Однією з найбільш простих та розповсюджених можна вважати схему [6-8], основу на переміщенні первинного джерела випромінювання відносно розсіювальної площадки (ВДВ) (рис. 1). Коефіцієнт зміни яскравості визначається за законом зворотних квадратів відстаней. Обмеження діапазону ослаблення світлового потоку в такому обладнанні обумовлено збільшенням її габаритів.

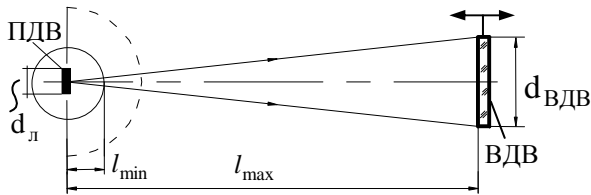


Рисунок 1 – Схема з безпосереднім опроміненням розсіювальної площадки (ВДВ) за законом зворотних квадратів відстаней

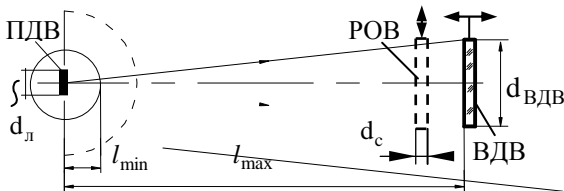


Рисунок 2 – Схема з опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та використанням додаткових РДВ

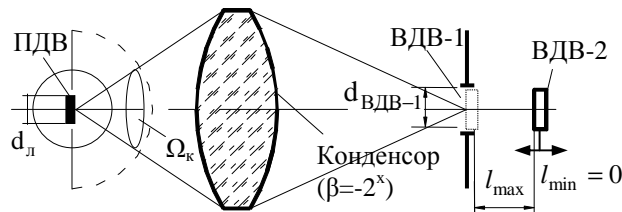


Рисунок 3 – Схема опромінення розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором: ВДВ-1 – перше ВДВ, ВДВ-2 – друге ВДВ

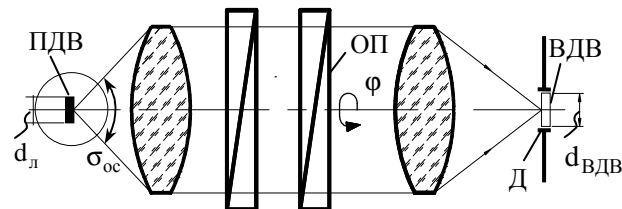


Рисунок 4 – Схема з ослабленням випромінювання за законом Малюса: ОП – обертовий поляризатор, Д – діафрагма

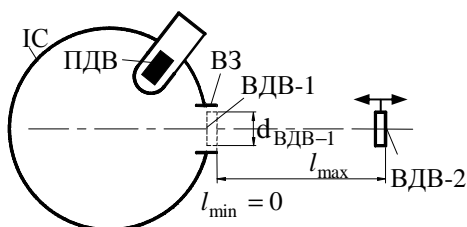


Рисунок 5 – Схема з інтегруючою сферою та опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней: ІС – інтегруюча сфера, ВЗ – вихідна зіниця

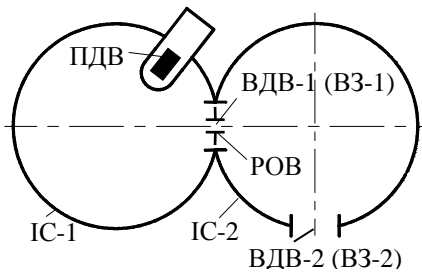


Рисунок 6 – Схема з двома інтегруючими сферами та РОВ: ВЗ-1 – вихідна зіниця першої сфери (IC-1), ВЗ-2 – вихідна зіниця сфери IC-2

Прикладом КВЗЯ, заснованого на законі адитивності світлових потоків, є набір сіток, гребінок або набір дірчастих діафрагм (рис. 2) [7, 9-11]. У загальному випадку коефіцієнт пропускання дорівнює відношенню площі, займаної отворами, до площі всієї почорненої металеві пластинки. В основному ослаблення здійснюється дискретно. Основним недоліком фотометричного ослаблювача з набору декількох чорнених металевих сіток є муарова картина, що утворюється після ослаблювача, а також багаторазове відбиття між поверхнями окремих сіток, уведених у світловий пучок, що порушує закон адитивності. Також виникає похибка ослаблення випромінювання через неточність виміру діаметрів отворів, дифракцію, нерівності країв тощо.

До КВЗЯ на законі Бугера (так звані "поглиначі") [11] відносяться ослаблювачі, засновані на поглинанні в газах, рідинах й оптичних матеріалах. Для ослаблення незначних потужностей у видимій області використовують нейтральні фільтри й фотометричні клини [7]. Велика кількість нейтральних фільтрів дає велику похибку ослаблення і тому не може використовуватися при точних вимірах. Також внесок в похибку робить наявність відблисків на границі "повітря-скло" та значна селективність методу.

КВЗЯ може бути побудоване на принципі введення в пучок променів оптичного елемента, що має оптичну силу або властивості розсіювача, приводить до збільшення тілесного кута Ω_K , у якому розповсюджується потік (рис. 3) [6]. Похибки регулювання яскравості КВЗЯ виникають через аберації оптичної системи, неточність виміру параметрів схеми, внутрішні неоднорідності оптичної системи, неоднаковість кутів падіння променів на ВДВ при різних величинах встановлюваної яскравості.

КВЗЯ з яскравістю, що змінюється шляхом поляризаційного ослаблення [6, 7, 12] за законом Малюса (рис. 4), прості у реалізації та мають невеликі габарити. Недоліки: висока селективність, малий коефіцієнт пропускання та зміна властивостей поляризаторів з часом.

В КВЗЯ на принципі часткового розсіювання випромінювання розсіювання може відбуватися на оптичних поверхнях, у оптичних середовищах та на внутрішній поверхні інтегруючої сфери. У випадку, коли розсіювання відбувається у оптичному середовищі [13], ослаблення випромінювання подібне до ослаблення по закону Бугера. Якщо випромінювання ослаблюється при розсіюванні на оптичній поверхні, то відбувається збільшення тілесного

кута, у якому розповсюджується потік. Ослаблювач, який використовує розсіювання випромінювання на внутрішній поверхні сфери, може бути побудований на комбінації таких принципів ослаблення: а) розсіювання на внутрішній поверхні однієї сфери та закону обернених квадратів (рис. 5); б) розсіювання на внутрішніх поверхнях двох сфер та закону адитивності потоків (рис. 6).

Із загальної теорії інтегруючої сфери [14-15] випливає, що навіть при незначній селективності покриття селективність всієї сфери досить значна, що є недоліком таких схем. Але схеми з інтегруючими сферами в якості каліброваного освітлювача приваблюють тим, що мають високу однорідність яскравості вихідної зіниці, дозволяють одночасно засвічувати велику кількість пікселів багатоелементних ПВ, забезпечують незмінність апертури пучка світла, що ослаблюється, та дають можливість використання декількох ПДВ.

Морфологічний аналіз КВЗЯ

При чисельних розрахунках та аналізі КВЗЯ використовувалися наступні вихідні дані:

- первинне джерело випромінювання – галогенна лампа КГМ-30-300-2, яка працює при температурі тіла розжарення $T=2850\text{K}$, радіус круглого еквівалентного тіла розжарення лампи $r_{\text{л}} = 2,585 \cdot 10^{-3}$, м, випромінюваний такою лампою енергетичний потік при зазначених умовах $\Phi_{\text{В}} = 130\text{Вт}$, а

яскравість тіла розжарення $L_{\text{л}} = 9,852 \cdot 10^5, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$;

- коефіцієнт пропускання розсіювальної площадки ВДВ $\tau = 0,5$;

- параметри інтегруючих сфер: радіус сфери $R_{\text{сф}}=0,1$ м, радіус вихідної зіниці сфери $R_3=0,025$ м, коефіцієнт дифузійного відбиття внутрішньої поверхні сфери $\rho=0,95$;

- параметри конденсора: збільшення $\beta=-2^x$, відносний отвір конденсора $\frac{D_{\text{к}}}{f'_{\text{к}}} = \frac{1}{1}$;

- спектральний діапазон роботи КВЗЯ $\lambda = 0,4 \dots 1,8\text{мкм}$;

- коефіцієнт пропускання поляризаційної пластинки $\tau_{\text{п}} = 0,1$;

- параметри РОВ: коефіцієнт пропускання $\tau_{\text{с}} = 0,5$, осьова товщина $d_{\text{с}} = 0,001$ м.

Для порівняльного розрахунку КВЗЯ за схемою з безпосереднім опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней (рис. 1), схемою з опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней та використанням додаткових РОВ, наприклад фотометричних сіток (рис. 2), схемою з опроміненням ВДВ за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором (рис. 3) використовувалися наступні фотометричні співвідношення:

$$L_{\text{ВДВ}}(l) = \frac{r_{\text{л}}^2 \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{l^2} \quad (\text{або } L_{\text{ВДВ-2}}(l) = \frac{(r_{\text{л}} \cdot \beta)^2 \cdot L_{\text{ВДД-1}} \cdot \tau}{l^2}), \quad (1)$$

$$L_{ВДВ}(l) = \frac{L_{л} \cdot r_{л}^2 \cdot \tau}{l^2 + r_{л}^2} \quad (\text{або } L_{ВДВ-2}(l) = \frac{L_{ВДД-1} \cdot (r_{л} \cdot \beta)^2 \cdot \tau}{l^2 + (r_{л} \cdot \beta)^2}). \quad (2)$$

Формула (1) використовується, коли розсіювальна площадка перебуває на великій відстані відносно ПДВ (або ВДВ-1 для рис. 3). Формула (2) – для випадку, коли розсіювальна площадка знаходиться на невеликій відстані відносно ПДВ (ВДВ-1).

У схемі з поляризаційними ослаблювачами (рис. 4) зміна яскравості обчислюється наступним чином:

$$L_{ВДВ}(\varphi) = \frac{\Phi_{ос} \cdot \tau}{\pi^2 \cdot (r_{л} \cdot \beta)^2} \cdot \cos^2(\varphi), \quad (3)$$

де $\Phi_{ос}$ – потік, що надходить у площину ВДВ через оптичну систему та поляризатори.

Для схеми з опроміненням розсіювальної площадки за законом зворотних квадратів відстаней та інтегруючою сферою (рис. 5) використовуються співвідношення (4) відповідно для невеликих відстаней між вихідною зіницею і розсіювальною площадкою та великих:

$$L_{ВДВ-2}(l) = \frac{L_{ВДВ-1} \cdot \tau \cdot R_3^2}{l^2 + R_3^2} \quad (L_{ВДВ-2}(l) = \frac{L_{ВДВ-1} \cdot \tau \cdot \pi \cdot R_3^2}{\pi \cdot l^2}), \quad (4)$$

де $L_{ВДВ-1}$ – яскравість вихідної зіниці сфери (першого ВДВ), яка розраховується за методикою [15-16].

У схемі з двома інтегруючими сферами і РОВ (рис. 6) яскравість вихідної зіниці другої сфери залежить від площі отвору між сферами наступним чином:

$$L_{ВДВ-2}(A_{отв}) = \frac{\rho \cdot L_{ВДВ-1} \cdot A_{отв}}{4\pi \cdot R_{сф}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{IC-2}^{эф}}, \quad (5)$$

де $L_{ВДВ-1}$ розраховується аналогічно до попередньої схеми, $A_{отв}$ – площа отвору РОВ, $A_{IC-2}^{эф}$ – відносна ефективна площа другої сфери.

У таблиці наведені оцінки характеристик перерахованих схем з урахуванням зазначених вихідних даних.

Оцінку лінійної зони, де нелінійність розподілу яскравості по перетину вихідної зіниці КВЗЯ не перевищує 1...2% для схем на рис. 1 та рис. 2, можна виконати по даним роботи [17]. З відповідного графіку знаходимо, що розмір лінійної зони дорівнює $\Delta d_{лін}(I_{мін}) = 1,8 \cdot 10^{-3}$, м.

Оскільки збільшення конденсора дорівнює 2^x , то розмір лінійної зони також збільшується вдвічі, тому для схем, показаних на рис. 3, рис. 4 $\Delta d_{лін}(I_{мін}) = 3,8 \cdot 10^{-3}$, м.

Для схем, зображених на рис. 5, рис. 6 лінійною зоною вважається вся вихідна зіниця сфери $\Delta d_{лін} = 0,05$, м.

Таблиця - Основні характеристики схем КВЗЯ

№ рисунку схеми	Максимальна відносна яскравість	Відносний діаметр зони з рівномірною яскравістю	Відносні габарити КВЗЯ	Габаритно-енергетичний фактор	Відносна неселективність	Відносна похибка установки яскравості	Метрологічний фактор	Узагальнений показник якості КВЗЯ
Позначення	L_{\max}°	$\Delta d_{\text{лин}}^{\circ}$	V_B°	$K_{\Gamma/\varepsilon}$	$\Delta\lambda^{\circ}$	ΔL°	K_M	K
1	1	0,036	0,408	0,088	1	0,6	1,667	0,147
2	1	0,036	0,163	0,221	1	0,7	1,429	0,316
3	0,248	0,072	0,265	0,067	0,95	0,85	1,118	0,075
4	$2,49 \times 10^{-3}$	0,072	0,107	$1,676 \times 10^{-3}$	0,3	1	0,3	$0,503 \times 10^{-3}$
5	0,045	1	1	0,045	0,7	0,7	1	0,045
6	0,0166	1	0,112	0,148	0,5	0,2	2,5	0,37

Висновки

Проведений аналіз схем випромінювачів показав:

- Схема з безпосереднім опроміненням вторинного джерела випромінювання за законом зворотних квадратів відстаней та аналогічна схема з додатковими РОВ забезпечують найбільшу яскравість, найменшу селективність та є найбільш простими, але мають досить великі габарити.

- Схема з конденсором створює меншу (майже у 4 рази) максимальну яскравість, ніж дві попередні, і при цьому має майже такі ж габарити. Схема потребує ретельного вибору оптичної системи, яка впливає на спектральну характеристику та однорідність яскравості ВДВ.

- Найгіршою є схема з поляризаційними ослаблювачами, яка має найнижчий узагальнений показник. Основні недоліки: спектральне поглинання поляризаційними фільтрами випромінювання, низький рівень створюваної яскравості ВДВ та велика похибка встановлення яскравості.

- Схема, заснована на використанні фотометричних властивостей інтегруючої сфери та закону зворотних квадратів відстаней, має великий розмір лінійної зони, але й найбільші габарити. Зменшення габаритів такої схеми можна досягти шляхом введення допоміжних РОВ, наприклад сіток. Рівень яскравості значно менший, ніж у схемах з безпосереднім опроміненням ВДВ та

з додатковими РОВ.

- Схема з двома інтегруючими сферами забезпечує дещо нижчий рівень яскравості, ніж попередня схема, але даний параметр можна покращити за рахунок збільшення кількості ПДВ. Перевагою є можливість використання вихідної зіниці другої сфери без додаткового розсіювача.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільш перспективними можна вважати схему на законі зворотних квадратів відстаней з додатковими РОВ (сітками) та схему з двома інтегруючими сферами, які мають значні резерви покращення характеристик.

У подальшому планується більш детально дослідити ці схеми з урахуванням вимог конкретних фотометричних пристроїв і наявної в Україні елементної бази та розробити КВЗЯ для прецизійної метрології.

Література

1. Воропай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. – Минск: Университетское, 1988. – 223с.
2. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 254с.
3. Измерение параметров приёмников оптического излучения / Под ред. Л. Н. Курбатова, Н. В. Васильченко. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
4. Hand W. G. A practical Guide to Digital Microscopy // Photonics Spectra. – 2001. – № 1. – P. 100 – 104.
5. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2003. – №3. – С. 98 – 104.
6. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. – М.: Радуга, 1976. – 216с.
7. Смолько Г. П., Фаерман Г. П. Сравнительный анализ фотометрических систем ослабления света // ОМП. – 1978. – № 1. – С. 53 – 58.
8. Сафаров Г. А. Исследование погрешности аттестации градуировочного клина методом квадратов расстояний // Изм. техн. – 1970. – № 6. – С. 64 – 68.
9. Андреева Н. В., Филимонов В. С. Сетчатые ослабители света с чёрным хромовым покрытием // ОМП. – 1971. – №2. – С. 51 – 52.
10. Епанешников М. М. Общие принципы конструирования и расчёт светильников с решётчатыми затенителями // Светотехника. – 1957. – № 6. – С. 39 – 43.
11. Воронков Г. Л. Ослабители излучения о. к. г. (обзор) // ПТЭ. – 1973. – № 2. – С. 16 – 22.
12. Фаерман Г. П., Година Д. А., Савко С. С. Современные поляризационные светофильтры // ОМП. – 1967. – № 12. – С. 49 – 53.
13. Войшвилло Н. А. Новое стекло для рассеивания направленного проходящего излучения // ОМП. – 1971. – № 5. – С. 40 – 43.
14. Гуревич М. М. Фотометрия. – Л.: Энергия, 1983. – 272с.
15. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А. та ін. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2005. – №4. – С. 106 – 114.
16. Теоретичне обґрунтування принципів створення багатоканальних оптикоелектронних систем // Звіт про НДР 2636ф.- НТУУ "КПІ". – 2005. – № держреєстрації 0103U000294.- 194 с.