

УДК 535.241.62

Л.А. Міхеєнко, А.В. Коваленко

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ КУЛЬОВИХ ФОТОМЕТРІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ СВІТЛОДІОДІВ

A comparative metrological analysis using mathematical models of three integrating sphere photometer schemes, for LED luminous flux measurement, was held. Each model takes into account the main design parameters of the photometer, typical values of which are used in the calculations. It's shown, that for given initial conditions, the greatest contribution to the total error for schemes with LED on the wall of sphere and in the center of sphere introduces instability of sphere reflectance coating, and for the scheme with LED in front of entrance aperture of sphere, for total luminous flux measurement, – instability of the distance to the diaphragm. In general, the highest accuracy for total luminous flux measurement have a scheme with LED in the center of the sphere, somewhat lower – a scheme with LED on the wall of sphere, and the lowest – a scheme with LED in front of input aperture of the sphere. The substantiated recommendations on the best practical application of each of the schemes are given. Also, for all schemes dependencies of the total relative error on the primary errors of basic design parameters, that can be used to select the optimal scheme of the photometer and selection of optimal values of design parameters are given.

Keywords: metrology, optical radiometry, photometry, LEDs flux measurements.

Вступ

Бурхливий розвиток світлодіодної техніки, спричинений пошуком нових революційних джерел світла на заміну низькоефективним лампам розжарювання, вимагає все більш досконалих засобів вимірювання характеристик світлодіодів (СД). Одним із основних параметрів, який характеризує енергоефективність СД, є світло-віддача, точність визначення якої пропорційна точності вимірювання світлового потоку СД.

Найбільш прийнятими є вимірювання потоку за допомогою фотометрів на основі інтегруючої сфери (ІС). Три основні схеми таких фотометрів наведені в міжнародних нормативних документах з метрології СД [1–3]. У першій схемі СД вмонтовано в стінку сфери, в другому випадку випромінююча поверхня СД розміщена в центрі сфери, в третьому випадку СД встановлюється перед вхідним вікном сфери в стандартній геометрії, рекомендованій Міжнародною комісією з освітлення (МКО) [1] для вимірювання часткового потоку світлодіодів. Частковий світловий потік СД, обмежений певним тілесним кутом, рекомендується МКО використовувати для порівняння СД при контролі на лініях виробництва.

Питання вибору схеми і наскільки різняться між собою результати вимірювання світлового потоку за цими схемами на сьогодні є актуальним і недостатньо висвітленим у літературі [4–6]. Для проведення детального порівняльного аналізу схем найбільш вдало підходить теорія формування поля освітленості на внутрішній поверхні ІС, опублікована авторами в [7].

Постановка задачі

Метою роботи є проведення порівняльного метрологічного аналізу трьох випадків конструкції кульового фотометра для вимірювання потоку СД.

Вихідні умови

Найбільш поширені схеми розміщення СД відносно інтегруючої сфери фотометра схематично зображено на рис. 1.

Розрахунки проводились для СД середньої та високої потужності, індикатрису випромінювання яких можна в першому наближенні апроксимувати косинусною залежністю:

$$I(\theta) = I_0 \cos^m(\theta), \quad (1)$$

де I_0 – осьова сила світла СД, θ – половина плоского кута при вершині конуса випромінювання з тілесним кутом Ω , m – порядок косинусності індикатриси. У більшості сучасних СД напівширина індикатриси випромінювання 2θ від 60° до 135° , що відповідає значенням порядку косинусності m від 5 до 1, тому розрахунки проводились для $m = 1$ і $m = 5$.

Оскільки світловий потік СД вимірюється за допомогою приймача випромінювання (ПВ), вмонтованого в стінку ІС, то значення світлового потоку прямо пропорційне значенню сумарної освітленості внутрішньої поверхні сфери. Тому для зручності подальший аналіз буде проводитися для сумарної освітленості.

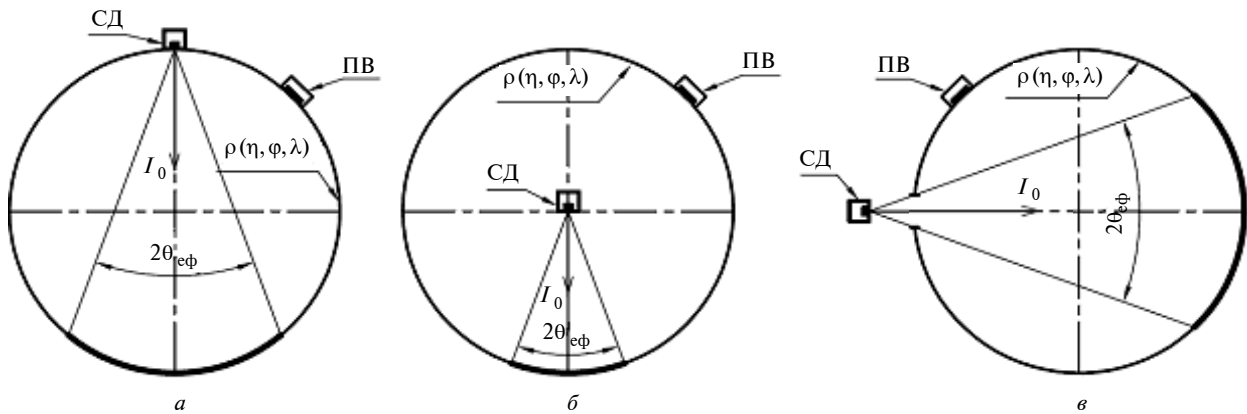


Рис. 1. Три варіанти розміщення СД у фотометрі під час вимірювання: *a* – на стінці ІС, *б* – у центрі ІС, *в* – перед входним вікном ІС

Для розрахунків у випадку *a* (див. рис. 1) використовувалася формула залежності сумарної освітленості поверхні сфери від основних впливаючих факторів, виведена згідно з методикою, описаною в статті [8]:

$$E_a = \frac{I_0}{D^2} \cdot \frac{\cos^{m+1}(\theta_{\text{эф}}) - 1}{\cos^2(\theta_{\text{эф}}) - 1} \cdot \left[1 + \frac{\rho \sin^2(\theta_{\text{эф}})}{1 - A_0(D, D_{\text{ПВ}})} \right], \quad (2)$$

де D – діаметр ІС; $D_{\text{ПВ}}$ – діаметр отвору в ІС для приймача випромінювання (ПВ), ρ – коефіцієнт відбивання покриття ІС, прийнятого за ламбертівський випромінювач; $\theta_{\text{эф}}$ – половина плоского ефективного кута випромінювання на рівні індикатриси 0,05; $A_0(D, D_{\text{ПВ}})$ – відносна ефективна розсіювальна поверхня сфери, визначена за формулою

$$A_0(D, D_{\text{ПВ}}) = \frac{A_{\text{сф}}(D) - A_{\text{ПВ}}(D_{\text{ПВ}})}{A_{\text{сф}}(D)},$$

де $A_{\text{сф}}(D)$ – площа внутрішньої поверхні ІС; $A_{\text{ПВ}}(D_{\text{ПВ}})$ – площа отвору в ІС для ПВ.

У випадках *б* та *в* (див. рис. 1) використовувались виведені аналогічно [8] формули залежності сумарної освітленості поверхні сфери від основних впливаючих факторів:

$$E_b = \frac{2I_0}{D^2} \cdot \frac{\cos^{m+1}(\theta_{\text{эф}}) - 1}{\cos(\theta_{\text{эф}}) - 1} \times \left[1 + \frac{\sin^2\left(\frac{\theta_{\text{эф}}}{2}\right) \cdot \rho}{1 - \rho A_0(D, D_{\text{ПВ}})} \right], \quad (3)$$

$$E_v = \frac{\int_0^{\theta_{\text{эф}}} d\Phi_0(\theta, m)}{\int_0^{\theta_{\text{эф}}} dP_c(\theta, D)} \cdot \left(1 + \frac{\rho \int_0^{\theta_{\text{эф}}} dP_c(\theta, D)}{A_{\text{сф}}(1 - \rho A_0)} \right). \quad (4)$$

Тут $P_c(\theta, D) = \pi D \cdot h(\theta, D)$ – площа освітленої поверхні сегмента ІС, де

$$h(\theta, D) = \frac{\frac{D}{2} + 25 \operatorname{tg}(\theta) + \left(\frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - 625} \right) \cdot \operatorname{tg}^2(\theta)}{\operatorname{tg}^2(\theta) + 1} - \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - 50 \operatorname{tg}(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - 625 + 625(\operatorname{tg}^2(\theta) - 1)}}{\operatorname{tg}^2(\theta) + 1}$$

за умови, що діаметр діафрагми має стандартне значення $D_a = 50$ мм.

Якщо вважати, що фотометр працює у сталому режимі, а параметри, що впливають на освітленість поверхні ІС, статистично незалежні, то похибку сумарної освітленості, зумовлену окремими похибками основних параметрів – ΔD , $\Delta D_{\text{ПВ}}$, $\Delta \rho$, ΔI_0 , ΔD_a , Δd , у першому наближенні можна описати таким виразом:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial D} \right)^2 \left(\frac{\Delta D}{E} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial D_{\text{ПВ}}} \right)^2 \left(\frac{\Delta D_{\text{ПВ}}}{E} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\Delta \rho}{E} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial I_0} \right)^2 \left(\frac{\Delta I_0}{E} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial D_a} \right)^2 \left(\frac{\Delta D_a}{E} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial d} \right)^2 \left(\frac{\Delta d}{E} \right)^2}, \quad (5)$$

Таблиця 1. Коефіцієнти впливу первинних похибок фотометра за схемою в (рис. 1)

| Джерело похибки | Коефіцієнт впливу | Числове значення | |
|--|---|---|---|
| | | $m = 1$ | $m = 5$ |
| Нестабільність діаметра сфери ΔD | $\frac{\partial E}{\partial D} = \frac{\rho \left(\frac{\partial E_{0\text{еф}}(D)}{\partial D} \cdot P_c(D) + \frac{\partial P_c(D)}{\partial D} \cdot E_{0\text{еф}}(D) \right)}{\pi \cdot (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)} + \frac{\partial E_{0\text{еф}}(D)}{\partial D} +$ $+ \frac{2D\rho(\rho - 1)P_c(D) \cdot E_{0\text{еф}}(D)}{\pi \cdot (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)^2}$ | -380,5 (-524,4)* Вт/м ³ | -688,3 (-943,7) Вт/м ³ |
| Нестабільність діаметра приймача випромінювання $\Delta D_{\text{ПВ}}$ | $\frac{\partial E_{\text{е}}}{\partial D_{\text{ПВ}}} = \frac{2 D_{\text{ПВ}} \rho^2 \cdot P_c(\theta_{\text{еф}}) \cdot E_{\text{еф}}(\theta_{\text{еф}})}{\pi (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)^2}$ | -935,9 (-1269,5) Вт/м ³ | -1666,2 (-2136,6) Вт/м ³ |
| Нестабільність коефіцієнта відбиття $\Delta \rho$ | $\frac{\partial E_{\text{е}}}{\partial \rho} = \frac{D^2 P_c(\theta_{\text{еф}}) \cdot E_{0\text{еф}}(\theta_{\text{еф}})}{\pi (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)^2}$ | 4872,5 (6609,1) Вт/м ² | 8674,4 (11000) Вт/м ² |
| Нестабільність випромінювання СД ΔI_0 | $\frac{\partial E_{\text{е}}}{\partial I_0} = \frac{\rho P_c(\theta_{\text{еф}}) \cdot \frac{\partial E_{0\text{еф}}(\theta_{\text{еф}}, I_0)}{\partial I_0}}{\pi (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)} + \frac{\partial E_{0\text{еф}}(\theta_{\text{еф}}, I_0)}{\partial I_0}$ | 159,1 (217,6) Вт/м ² кд | 285,5 (390,8) Вт/м ² кд |
| Нестабільність діаметра діафрагми ΔD_a | $\frac{\partial E_{\text{е}}}{\partial D_a} = \frac{\rho \left(\frac{\partial E_{0\text{еф}}(D_a)}{\partial D_a} \cdot P_c(D_a) + \frac{\partial P_c(D_a)}{\partial D_a} \cdot E_{0\text{еф}}(D_a) \right)}{\pi \cdot (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)} -$ $- \frac{2\pi D_a \rho^2 \cdot P_c(D_a) \cdot E_{0\text{еф}}(D_a)}{\pi \cdot (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)^2} + \frac{\partial E_{0\text{еф}}(D_a)}{\partial D_a}$ | -2089,5 (-2823,2) Вт/м ³ | -3705,5 (-5127,9) Вт/м ³ |
| Похибка встановлення відстані між СД та діафрагмою Δd | $\frac{\partial E_{\text{е}}}{\partial d} = \frac{\rho \left(\frac{\partial E_{0\text{еф}}(d)}{\partial d} \cdot P_c(d) + \frac{\partial P_c(d)}{\partial d} \cdot E_{0\text{еф}}(d) \right)}{\pi \cdot (D_a^2 \rho - D^2 \rho + D_{\text{ПВ}}^2 \rho + D^2)} + \frac{\partial E_{0\text{еф}}(d)}{\partial d}$ | 7437,9 (996,5) Вт/м ³ | 9786,4 (-1208,3) Вт/м ³ |

* В дужках указано значення для рівня 0,5 індикатриси СД.

де параметри ΔD_a , Δd – відповідно діаметр вхідної апертури та відстань від СД до ІС – використовуються тільки для схеми в, для інших схем вони рівні нулю.

Проведемо розрахунки на прикладі схеми в. Формули для відповідних коефіцієнтів впливу – часткових похідних функції сумарної освітленості внутрішньої поверхні ІС, та їх числові значення для згаданих вище умов наведені в табл. 1.

Первинні похибки та їх аналіз

Як показують розрахунки [9], зміна діаметра ІС при нагріві на 50° залежно від матеріалу ІС становить від 0,05 % (сталь) до 0,4 % (полістирол). При побудові графіків використано

значення для дюралюмінієвої ІС діаметром 0,5 м, яке в цьому випадку становить 0,11 %.

Як ПВ для вимірювань такого типу повинні застосовуватися фотометричні головки з достатньо якісною світловою та кутовою корекцією. Такі ПВ, залежно від типу, займуть отвір в ІС діаметром 10–40 мм. На результат вимірювань у цьому випадку будуть впливати температурна нестабільність діаметра фотометричної головки та нестабільність коефіцієнта відбиття поверхні ПВ. У першому наближенні ці нестабільності можна оцінити як еквівалент зміни діаметра $D_{\text{ПВ}}$ на 0,05–0,5 %. При побудові графіків використано параметри фотометричної головки ГФ3 (фотометра ТЕС0693): діаметр 25 мм, еквівалентна нестабільність діаметра не більше ніж $\pm 0,1$ %.

Нестабільність та нерівномірність коефіцієнта відбиття внутрішньої поверхні ІС залежить від матеріалу покриття. Нестабільність традиційних покриттів на основі BaSO₄ і MgO перевищує 0,05 % на годину [10]. Більш стійкими є спеціально розроблені сучасні покриття на основі BaSO₄ типу Spectrafect і Duraflect [11], які, за інформацією виробника, є стабільними при нагріванні до 80 °С, а Duraflect до того ж стійкий до впливу підвищеної вологості. Найбільш перспективними є нові покриття на основі політетрафторетилену (наприклад, покриття Spectralon SRM-99 має температурну стабільність до 350 °С, стійкість до промивання водою та загальну нестабільність світлового коефіцієнта відбиття не більше 0,01 % на місяць). Для побудови графіків використано параметри матеріалу Spectrafect: усереднений світловий коефіцієнт відбиття $\rho = 0,98$, загальна нестабільність $\Delta\rho$ не більше 0,05 %.

Нестабільність сили світла СД залежить від нагрівання кристалу струмом, а також від нестабільності джерела живлення. Застосування обладнання для активної термостабілізації дає змогу досягти нестабільності сили світла на рівні 0,12–0,23 % для еталонних СД та 1 % для серійних [12]. Оскільки для таких схем зі змінною силою світла СД прямо пропорційно змінюється освітленість ПВ, для розрахунків та побудови графіків покладалося мінімальне значення нестабільності, якого досить легко досягти на практиці: $\Delta I_0 = \pm 0,2 \%$ при $I_0 = 1$ кд.

Для вимірювальної схеми ϵ істотний вклад у загальну похибку будуть також вносити такі параметри, як неточність і нестабільність діаметра вхідної діафрагми D_a та відстані від неї до вершини світлодіода d . Застосовуючи ши-

роко доступні сучасні технології обробки матеріалів, діафрагму діаметром 50 мм із гострим краєм можна виготовити з похибкою від 0,01 до 0,1 мм (0,02–0,2 %). Покладемо для розрахунків максимальне значення $\Delta D_a = \pm 0,2 \%$. Для більш точного встановлення СД на заданій відстані від діафрагми використовують спеціальні упори-тримачі. Очевидно, що такі пристосування дають можливість витримати відстань d з похибкою 0,1–0,5 мм, тож для розрахунків покладемо максимальне значення 0,5 мм. Діапазон стандартних значень d становить 14,43–68,69 мм (для кутів 40–120°). Розрахунки проводились для відстаней 43,30 мм $\pm 0,7 \%$, 14,43 мм $\pm 2 \%$ та 1,3 мм $\pm 38 \%$.

Результати розрахунків і їх порівняльний аналіз

Розрахунки проводились для наведених у табл. 2 числових значень та похибок основних параметрів, що впливають на сумарну освітленість внутрішньої поверхні ІС.

Таблиця 2. Абсолютні значення і похибки основних параметрів

| Параметр | Значення для розрахунків | Границі похибки | |
|----------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| | | Абсолютне значення | Відносне значення |
| D | 0,5 м | $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$ м | $\pm 0,0011$ |
| $D_{ПВ}$ | 25 мм | $\pm 0,025$ мм | $\pm 0,001$ |
| ρ | 0,98 | $\pm 4,9 \cdot 10^{-4}$ | $\pm 0,0005$ |
| I_0 | 1 кд | $\pm 0,002$ кд | $\pm 0,002$ |
| D_a | 50 мм | $\pm 0,1$ мм | $\pm 0,002$ |
| d | (1,3–43,3) мм | $\pm 0,5$ мм | $\pm (0,39–0,01)$ |

Таблиця 3. Результати розрахунку часткових і сумарних відносних похибок

| Похибка, % | Схема а | | Схема б | | Схема в | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | $m = 1$ (0,95)* | $m = 5$ (0,95) | $m = 1$ (0,95) | $m = 5$ (0,95) | $m = 1$ (0,5) | $m = 5$ (0,5) | $m = 1$ (0,95) | $m = 5$ (0,95) |
| $\Delta E(\Delta D)/E$ | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| $\Delta E(\Delta D_{ПВ})/E$ | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| $\Delta E(\Delta \rho)/E$ | 2,18 | 2,16 | 2,12 | 2,02 | 1,49 | 1,39 | 1,50 | 1,49 |
| $\Delta E(\Delta I_0)/E$ | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| $\Delta E(\Delta D_a)/E$ | – | – | – | – | 0,14 | 0,10 | 0,14 | 0,23 |
| $\Delta E(\Delta d)/E$ | – | – | – | – | 0,23 | 0,15 | 2,34 | 1,71 |
| $\Delta E/E$ | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 1,5 | 1,4 | 2,8 | 2,3 |

*В дужках указано рівень використання кривої розподілу сили світла.

У табл. 3 наведено виражені у відсотках результати розрахунку часткових та сумарних відносних похибок освітленості за формулами (2)–(5) для поданих у табл. 2 значень вихідних параметрів. Як видно з табл. 3, вплив нестабільності діаметра ІС для схеми *в* майже в 2 рази нижчий, ніж для схем *а*, *б*. Аналогічно і для діаметра ПВ. Вплив нестабільності покриття найбільший для схеми *а*, дещо нижчий (на 3 %) для схеми *б* і на 30 % нижчий для схеми *в*. Також слід зазначити, що у всіх схемах вплив нестабільності покриття дещо нижчий при вузьконаправленій індикатрисі СД (при $m = 5$). Вплив нестабільності сили світла для всіх схем однаковий, тому що залежність освітленості від цього параметра лінійна. Схема *в* має два додаткових параметри: нестабільність діаметра вхідної діафрагми та неточність установки відстані між СД і вхідною діафрагмою. Схема *в* у загальному випадку призначена для вимірювання часткового потоку, де використовується тільки центральна частина індикатриса, тому в табл. 3 для цієї схеми додатково наведено розрахунки для рівня використання індикатриса 0,5. У цьому випадку видно, що при використанні неповної індикатриса похибка внаслідок впливу Δd зменшується майже на порядок.

У цілому, для вимірювання повного потоку, найменшу сумарну відносну похибку дає використання схеми *б* (0,020–0,021), дещо більшу – схеми *а* (0,022), найбільшу – схеми *в* (0,023–0,028). При вимірюванні часткового потоку сумарна відносна похибка для схеми *в* становить 0,014–0,015.

Для заданих вихідних умов найбільший вклад у сумарну похибку для схем *а*, *б* вносить $\Delta\rho$, для схеми *в* при вимірюванні повного потоку найбільший вклад вносить Δd , при вимірюванні часткового потоку – $\Delta\rho$.

На рис. 2–5 наведено залежності сумарної відносної похибки формування освітленості внутрішньої поверхні ІС від первинних похибок основних конструктивних параметрів для схем *а*, *б*, *в*.

З графіка на рис. 2 видно, що $\Delta D_{\text{ПВ}}/D_{\text{ПВ}}$ у діапазоні відносних похибок до 0,01 майже не впливає на сумарну похибку $\Delta E/E$, а нестабільність діаметра ІС починає значно впливати на загальну похибку тільки після значення 0,004. Зміна направленості індикатриса майже не впливає на загальну похибку. В той же час збільшення нестабільності ρ викликає підвищення загальної похибки майже в 2 рази.

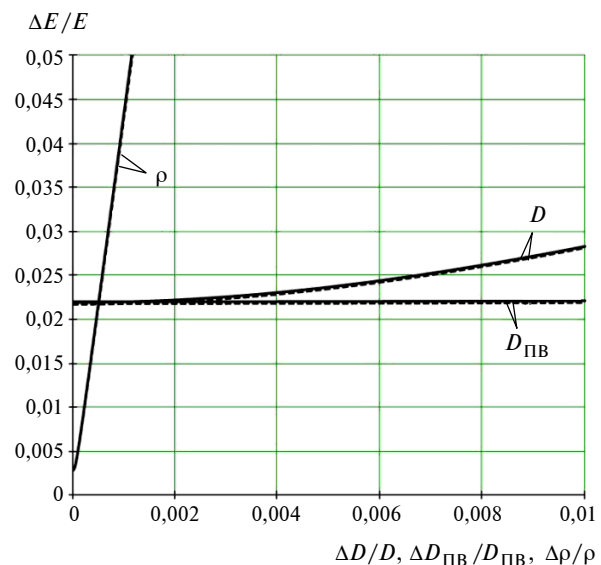


Рис. 2. Залежність сумарної відносної похибки формування освітленості внутрішньої поверхні ІС від первинних похибок основних конструктивних параметрів для схеми *а*: - - - - $m = 5$, — — — — $m = 1$

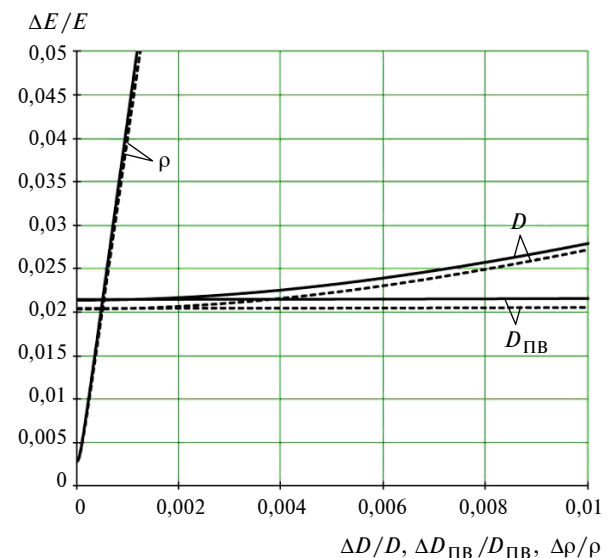


Рис. 3. Залежність сумарної відносної похибки формування освітленості внутрішньої поверхні ІС від первинних похибок основних конструктивних параметрів для схеми *б*: - - - - $m = 5$, — — — — $m = 1$

Для схеми *б* (див. рис. 3) залежності відрізняються від залежностей схеми *а* тільки тим, що для більш направлених індикатриса загальна похибка дещо менша, ніж для широких.

У випадку схеми *в* (див. рис. 4) $\Delta D_{\text{ПВ}}/D_{\text{ПВ}}$ починає значно впливати тільки в діапазоні відносних похибок більше 0,003, а $\Delta D/D$ – більше 0,004. Схема дуже чутлива до направленості індикатриса СД – при $m = 5$ вплив усіх параметрів значно нижчий, ніж при $m = 1$.

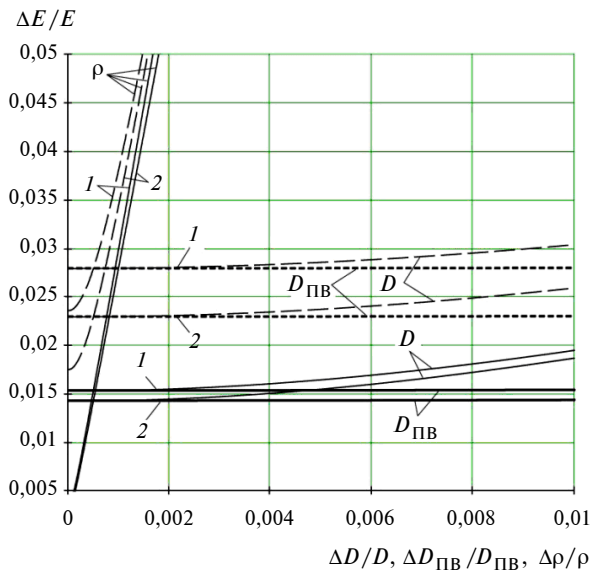


Рис. 4. Залежність сумарної відносної похибки формування освітленості внутрішньої поверхні ІС від первинних похибок основних конструктивних параметрів для схеми *в*: 1 – $m=1$, 2 – $m=5$; - - - - для рівня індикатриси СД 0,05, — — — — для рівня 0,5

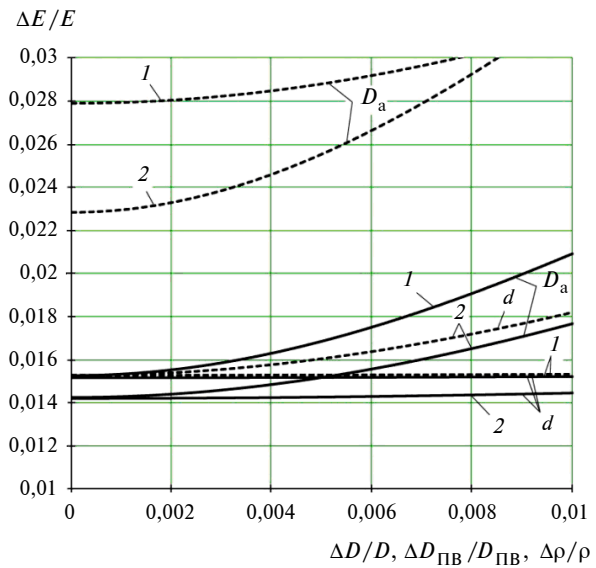


Рис. 5. Залежність сумарної відносної похибки формування освітленості внутрішньої поверхні ІС від похибки діаметра діафрагми та похибки встановлення відстані між СД і діафрагмою для схеми *в*: 1 – $m=1$; 2 – $m=5$; - - - - для рівня індикатриси СД 0,05, — — — — для рівня 0,5

Особливість схеми *в* у тому, що при вимірюванні повного потоку СД похибка результатів вимірювання на 15–20 % вища, ніж при вимірюванні за схемами *а*, *б*, але при вимірюванні часткового потоку (для рівня індикатриси 0,5) загальна похибка знижується майже в 2 рази. Похибка знижується завдяки збільшенню відстані d між СД та діафрагмою, в результаті чого зменшується відносна похибка $\Delta d/d$, яка при вимірюванні часткового потоку майже не впливає на результати в діапазоні $\Delta d/d$ до 0,02 (див. рис. 5). Вплив похибки діаметра діафрагми $\Delta D_a/D_a$ також різко знижується (див. рис. 5) при переході від повного потоку до часткового.

Висновки

Порівняльний метрологічний аналіз трьох випадків конструкції кульового фотометра для

вимірювання потоку СД на основі розроблених авторами математичних моделей показав, що найвищу точність мають вимірювання повного потоку за схемою *б*. Схема *а* майже не поступається в точності, але вона забезпечує вимірювання потоку тільки передньої півсфери СД. Схема *в* має найнижчу точність при вимірюванні повного потоку, але найвищу – при вимірюванні часткового потоку, тому найкраще підходить для оперативного контролю часткового потоку СД для сортування (бінінгу) при серійному виробництві.

Отже, для вимірювання повного потоку СД найбільш вдалою є схема *б*, а при вимірюванні часткового потоку слід використовувати схему *в*. Потрібно зазначити, що залишається не визначеним та потребує досліджень ступінь впливу арматури внутрішніх кріплень і бленд ІС на точність системи.

Список літератури

1. *Measurement of LEDs*, 2nd ed., Int. Commission on Illumination Tech. Report, CIE 127-1997, March 5, 2002.
2. *Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products*, IES LM-79-08, New York, 2008.
3. *Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний: ГОСТ Р 54350-2011*. – М.: Стандартинформ, 2011.
4. *Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: Учеб. пособие / Под ред. В.Н. Крутикова*. – М.: Логос, 2011. – 592 с.
5. *Карпу Н. Интегрирующая сфера: теоретические основы измерения оптического излучения // Светотехника*. – 2011. – № 2. – С. 36–38.

6. *Круглов О.В., Кузьмин В.Н., Томский К.А.* Измерение светового потока светодиодов // Светотехника. – 2009. – № 3. – С. 34–36.
7. *Міхеєнко Л.А., Коваленко А.В.* Теорія формування поля освітленості на внутрішній поверхні інтегруючої сфери фотометрів для вимірювання світлового потоку світлодіодів // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2014. – № 1. – С. 79–84.
8. *Міхеєнко Л.А., Тимофєєв О.С.* Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з світловипромінюючими діодами // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 1. – С. 129–135.
9. *Міхеєнко Л.А., Тимофєєв О.С.* Метрологічний аналіз дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з світловипромінюючими діодами // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011. – № 2. – С. 130–137.
10. *Исследование* коэффициентов яркости покрытий из краски на основе BaSO₄ / М.Г. Кунецкий, С.Г. Гуминецкий, М.Ю. Сахновский и др. // ОМП. – 1981. – № 6. – С. 3–4.
11. *Technical Guide. Reflectance Materials and Coatings.*, Labsphere Inc., 2010.
12. *Азизян Г., Никифоров С.* Эталонный светодиодный источник света для калибровки фотометрического оборудования // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – № 1. – С. 54–57.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
29 січня 2014 року