

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ

О.Д. Купко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків
Б.Г. Шабашкевич, кандидат технічних наук, директор Науково-виробничої фірми "Тензор", м. Чернівці
Ю.Г. Добровольський, кандидат технічних наук, заступник директора Науково-виробничої фірми "Тензор", м. Чернівці



О.Д. Купко Б.Г. Шабашкевич Ю.Г. Добровольський

Детально проаналізовано похибки вимірювання яскравості, обумовлені нерівномірним розподілом випромінювання від джерела. Надано рекомендації щодо мінімізації похибок.

Errors of brightness measuring, arising from uneven distribution of radiation from a source, are analyzed theoretically in detail. Recommendations regarding the errors minimization are given.

Світлові вимірювання регламентуються повірочною схемою для засобів вимірювань світлових величин (ДСТУ 3394-96) [1], яку було розроблено в 1993 р. На сьогодні ця схема багато в чому застаріла [2], зокрема, вона не передбачає окремої гілки для передавання одиниці яскравості, а також відсутня гілка вимірювань імпульсних величин. Тож відсутні і відповідні робочі еталони, а також затверджені методики передачі одиниці цієї величини від первинного еталона. Повірку імпульсних фотометрів взагалі не передбачено, а повірка яскравомірів проводиться за допомогою світловимірювальних ламп і фотометрів методом опосередкованих вимірювань. На цей час контроль параметрів імпульсного і періодичного випромінювань виходить на перший план завдяки широкому використанню світлодіодів. Відсутність у державній повірочній схемі робочих еталонів, метрологічні характеристики яких досліджуються найбільш ретельно, призводить до недостатньо повного аналізу і збільшення похибок робочих засобів вимірювань.

Метою роботи є оцінка основних параметрів, які необхідно вимірювати для контролю світлового середовища, формулювання вимог до характеристик робочих еталонів яскравості і установок для передавання, а також до характеристик робочих засобів вимірювань.

Результати дослідження

У дійсній повірочній схемі використовуються 3 одиниці: сили світла, освітленості і яскравості. Стандарт ДСТУ 3651.1-97 [3] передбачає 7 світлових одиниць: сили світла (кд), освітленості (лк); світлового потоку (лм); яскравості (кд/м²); світлової енергії (лм·с); освітлення (кд·с); світності (лм/м²). Проте сила світла, світловий потік, світлова енергія, освітлення і світність характеризують окремі джерела світла, а не світлове середовище в цілому. Найчастіше для характеристики середовища вживають тільки освітленість і яскравість. Характеристики імпульсного та періодичного випромінювання викладено в ГОСТ 24286-88 [4]. Формально перелічені в цьому стандарті величини, що характеризують імпульс випромінювання (16 величин), можуть бути застосовні до всіх світлових одиниць, що створює велику різноманітність. Проте більшість імпульсних характеристик виражається через форму імпульсу випромінювання, тому для характеристики світлового середовища в першу чергу необхідно забезпечити вимірювання освітленості і яскравості, що змінюються в часі.

Загальноприйняті методи визначення метрологічних характеристик фотометрів (люксметрів і яскравомірів) сконцентровано в [5] і у вітчизняному гармонізованому стандарті [6].

Найбільш поширені такі схеми вимірювання яскравості, приведені в [7, 8]: схема для вимірювання яскравості з використанням габаритної діафрагми та схема для вимірювання яскравості з використанням оптичної схеми для поверхонь різних розмірів, що світять прямим і відбитим світлом.

Модель і оцінки просторових похибок

Звертає на себе увагу те, що якщо методику оцінки впливу спектрального складу змінюваного випромінювання, а також впливу тимчасових характеристик випромінювання пропрацьовано детально, то методика оцінки впливу змінюваного просторового розподілу відсутня. Тим часом очевидно, що зміна діаграми спрямованості джерела приводить, принаймні, до таких наслідків:

1) зміни коефіцієнта відбиття коригуючого фільтра. У відповідності до формул Френеля, промені, що потрапляють на поверхню розподілу двох середовищ при перпендикулярному падінні,

відбиваються не так, як при падінні під кутом, відповідно змінюється і пропускання фільтра;

2) зміни поглинання коригуючого фільтра. Зазвичай фільтр розраховано для перпендикулярного падіння випромінювання. Зміна кута падіння випромінювання приведе до більшої довжини шляху світла у фільтрі і відповідно до меншого пропускання;

3) зміни якості корекції приймача під $V(\lambda)$, оскільки для кожної довжини хвилі зміна пропускання буде різною;

4) зміни чутливості фотометричної головки при різних кутових розподілах яскравості. Сигнал фотоприймача визначається як інтеграл за площею приймача від добутку потужності падаючого випромінювання на чутливість приймача в кожній точці. Навіть у разі рівномірної чутливості поверхні приймача, розташованого на оптичній осі випромінювання, зміна діаграми спрямованості приведе до зміни чутливості внаслідок того, що на крайні ділянки приймача потрапляє більша частина випромінювання.

Може зацікавити оцінка впливу перелічених чинників. Модель для розрахунку впливу зміни чутливості фотометричної головки зображено на рис. 1.

Випромінювання від об'єкта з рівномірним просторовим і кутовим розподілом $L(\varepsilon, \varphi)$ яскравості з кожної точки області візування S_1 потрапляє на вхідну діафрагму фотометричної головки S_2 . Для спрощення у цьому випадку вважаємо площини поверхонь S_1 і S_2 паралельними. Кожна точка області візування характеризується кутом відхилення від оптичної осі ε_1 та кутом від довільно вибраного напрямку φ_1 , точка падіння випромінювання на вхідну діафрагму – кутом відхилення від оптичної осі ε_2 та кутом від довільно вибраного напрямку φ_2 . Якщо відома направлена чутливість по поверхні вхідної

діафрагми, то можна проінтегрувати за всіма точками області візування і вхідної діафрагми, розрахувати сигнал і визначити поправки при зміні будь-яких конкретних геометричних параметрів. Такий підхід є загальноприйнятим при обліку різних спектральних характеристик джерел. Проте загальновизнаного підходу при обліку просторових характеристик на цей час не склалося, тому логічно оцінити похибки, обумовлені кожним із перелічених раніше процесів.

1. Формули Френеля дозволяють легко оцінити втрати на межі повітря і скла для перпендикулярної і паралельної поляризації хвиль. Для оцінки припускаємо, що вхідна діафрагма приладу має малі розміри. Оцінимо коефіцієнт пропускання для однієї поверхні і для 4-х пластин (несклеєні стекла фільтра). Результати розрахунку наведено на рис. 2.

Для оцінки впливу зміни коефіцієнта пропускання розглядаємо тільки крайні промені. Для кутів до 0,4 рад у склеєного фільтра коефіцієнт відбиття відрізняється від коефіцієнта при перпендикулярному падінні не більше ніж на 1 %. Для несклеєного фільтра така відмінність спостерігається вже при кутах 0,15 рад. Розглянута похибка може виявитися важливою не тільки для конструкцій яскравомірів зі змінюваними кутами спостереження, але і для змінюваних кутових діаграм розподілу яскравості. Результати розрахунку пропускання однієї поверхні і 4-х несклеєних фільтрів для двох перпендикулярних орієнтацій поляризації і кутів від 0,01 до 1,35 рад наведено в табл. 1. Мінімальний кут 0,01 рад характеризує сприйняття людським оком, кут 0,1 рад – характерна величина для різних конструкцій яскравомірів, кути порядку 1 рад характеризують ті типи конструкцій яскравомірів, які впритул прикладаються до по-

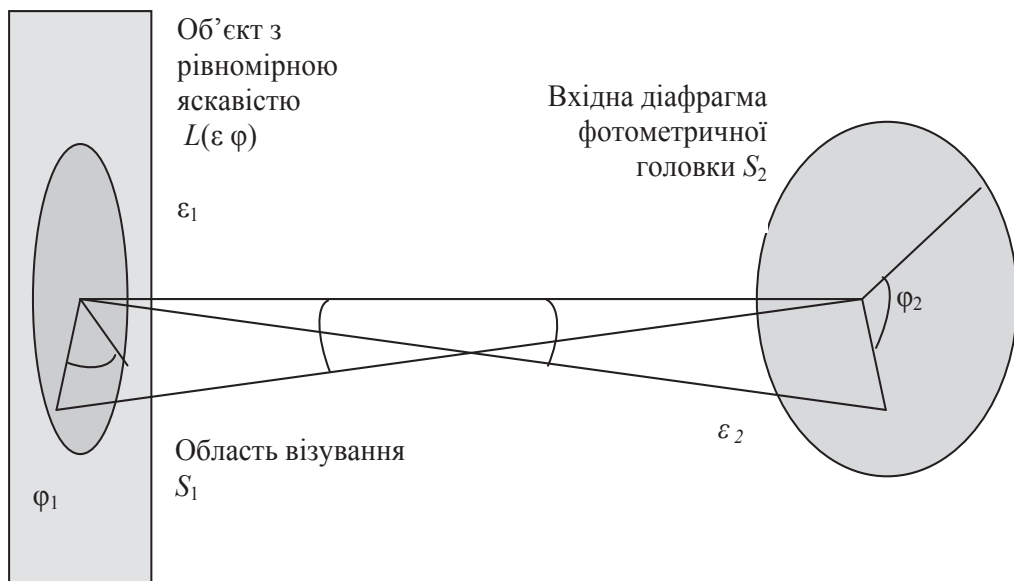


Рис. 1. Модель для розрахунку впливу зміни чутливості фотометричної головки

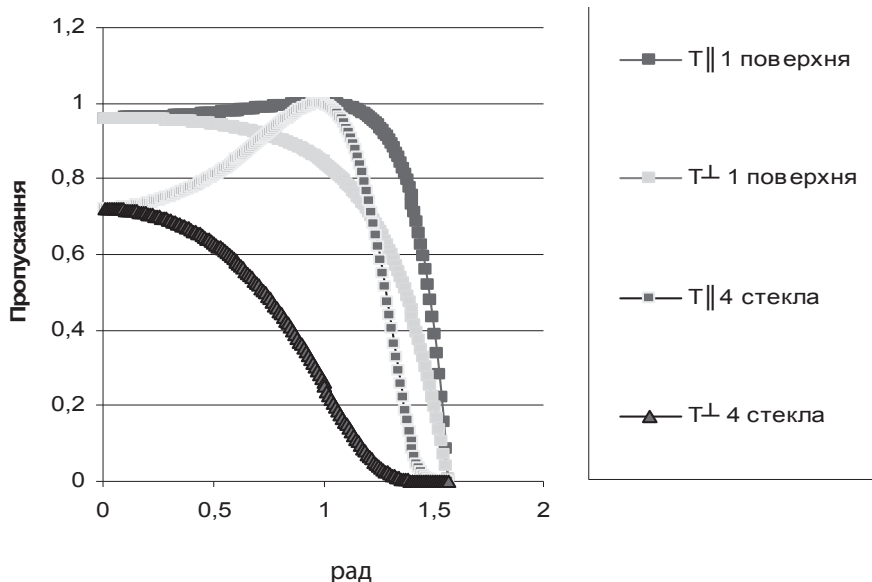


Рис. 2. Результати розрахунку пропускання фільтра, обумовленого відбиттям на межі поверхні для двох перпендикулярних орієнтацій поляризації падаючого випромінювання

верхні. Видно, що для кутів менше 0,1 рад зміна пропускання, обумовлена відбиттям від поверхні, менше 1 %.

Таблиця 1

рад	1 поверхня		4 стекла	
		+		+
0,01	0,960005	0,959995	0,721422	0,721358
0,05	0,960133	0,959866	0,722192	0,720587
0,1	0,960534	0,959463	0,724605	0,718167
0,5	0,973459	0,944058	0,806381	0,630942
1,0	0,999888	0,845067	0,9991	0,260093
1,35	0,843074	0,540959	0,255227	0,007334

2. Пропускання фільтра також залежить від поглинання в коригуючому фільтрі. Для оцінки його впливу розглянемо фільтр товщиною l і коефіцієнтом поглинання $k(\lambda)$: $10^{-k(\lambda)l} = V(\lambda)$. Тоді для

променя, що проходить через фільтр під кутом ϵ , пропускання фільтра становитиме $10^{-k(\lambda)l/\cos(\epsilon)}$. Результати розрахунку спектральних коефіцієнтів пропускання для тих же кутів (0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 1,35 рад) показано на рис. 3.

Результати розрахунку інтегрального пропускання фільтра для джерела типу А для різних кутів падіння наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Кути, рад	0,01	0,05	0,1	0,5	1	1,35
Пропускання	1	0,9999	0,9993	0,9975	0,9374	0,7405

Видно, що для кутів менше 0,5 рад пропускання змінюється менш ніж на 1 %. Проте, враховуючи, що достатньо часто відбуваються вимірювання світлових параметрів екранів моніторів і світлодіодних джерел, похибки можуть бути істотними.

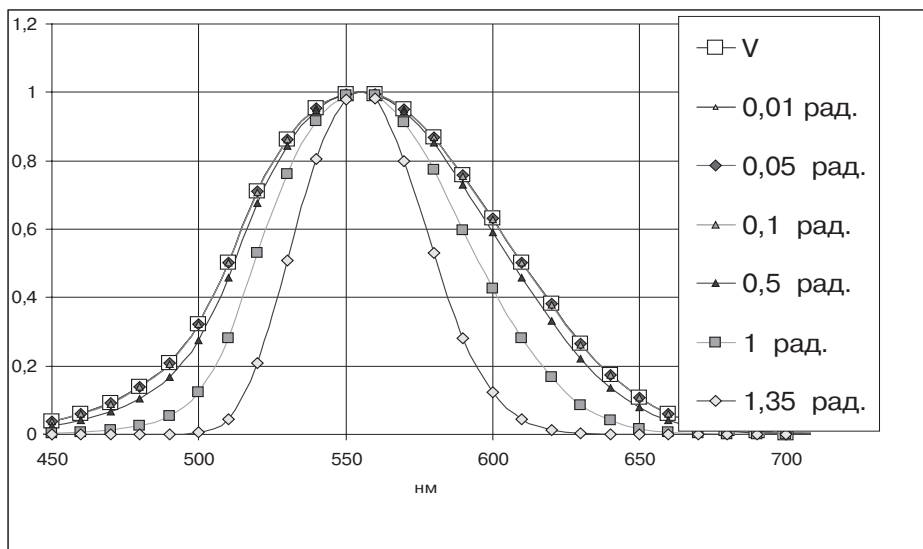


Рис. 3. Результати розрахунку спектральних коефіцієнтів пропускання фільтра, обумовленого поглинанням, для кутів 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 1,35 рад

3. Відповідні зміни коефіцієнта активності (відношення сигналів від приладу з ідеальним фільтром [9] у паралельному пучку світла до сигналу приладу при відповідних кутах падіння) наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Кути, рад	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	1,35
Коефіцієнт активності	1,0000	1,0006	1,0025	1,0667	1,3504	2,0709

Для кутів менше 0,1 рад пропускання змінюється менш ніж на 1 %. Як і в попередньому випадку, враховуючи, що достатньо часто відбуваються вимірювання світлових параметрів екранів моніторів і світлодіодних джерел, похибки можуть виявитися істотними.

4. Для оцінки зміни чутливості фотометричної головки при різних розподілах яскравості передбачалося, що чутливість у кожній точці поверхні вхідної головки однакова для всіх кутів падіння.

Для оцінок використано косинусні діаграми спрямованості ($L_1(\epsilon, \varphi) = \cos\epsilon$; $L_2(\epsilon, \varphi) = \cos 3\epsilon$; $L_3(\epsilon, \varphi) = \cos 10\epsilon$), тобто розрахункові чутливості будуть нормовані на одиницю. Графічно діаграми зображено на рис. 4.

Відповідна напівширина за рівнем 0,5 становить: для $\cos\epsilon$ – 1,04 рад; для $\cos 3\epsilon$ – 0,35 рад; для $\cos 10\epsilon$ – 0,1 рад.

Сигнал від кожної точки вхідної діафрагми головки яскравоміра передбачався пропорційним яскравості в цій точці. Сигнал від точки $\epsilon = 0$, тобто межа при $\epsilon \rightarrow 0$, дорівнює 1. Розраховувалася середня за площею реакція приладу на яскравість за формулою

$$L_{cp} = \frac{\iint_{S_2} L(\epsilon, \varphi) \sin(\epsilon) d\epsilon d\varphi}{\iint_{S_2} \sin(\epsilon) d\epsilon d\varphi}$$

Якщо люксметр прогадуйовано за ламбертовським випромінювачем ($L(\epsilon, \varphi) = 1$) на деякій відстані, то результати вимірювання освітленості на такій же відстані від інших джерел з такою ж силою світла та з $L_1(0, 0) = 1$ будуть залежати від кута збору випромінювання. Припустимо, що чутливості кожної точки приймача однакові для усіх кутів падіння. Тоді можна розрахувати відношення результатів випромінювання таким люксметром до результатів під час калібрування. Результати розрахунку усереднених за вхідною діафрагмою фотометричної головки яскравостей наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Характеристика приладу, рад	Яскравість джерела і її напівширина, рад		
	$L_1(\epsilon, \varphi)$	$L_2(\epsilon, \varphi)$	$L_3(\epsilon, \varphi)$
	1,04	0,35	0,1
0,01	0,99995	0,99955	0,995004
0,05	0,99925	0,99326	0,926226
0,1	0,997252	0,975393	0,741355
0,5	0,937593	0,498694	0,045629
1,0	0,768047	0,134719	0,012176
1,35	0,453383	0,079526	0,007188

Відповідно до повірочної схеми похибки для робочих засобів вимірювань становлять 4–20 %, тобто похибки значні. Для діаграм спрямованості з напівшириною порядку напівширини приймальної діаграми яскравоміра похибки перевершують допустимі настільки, що важко говорити про ви-

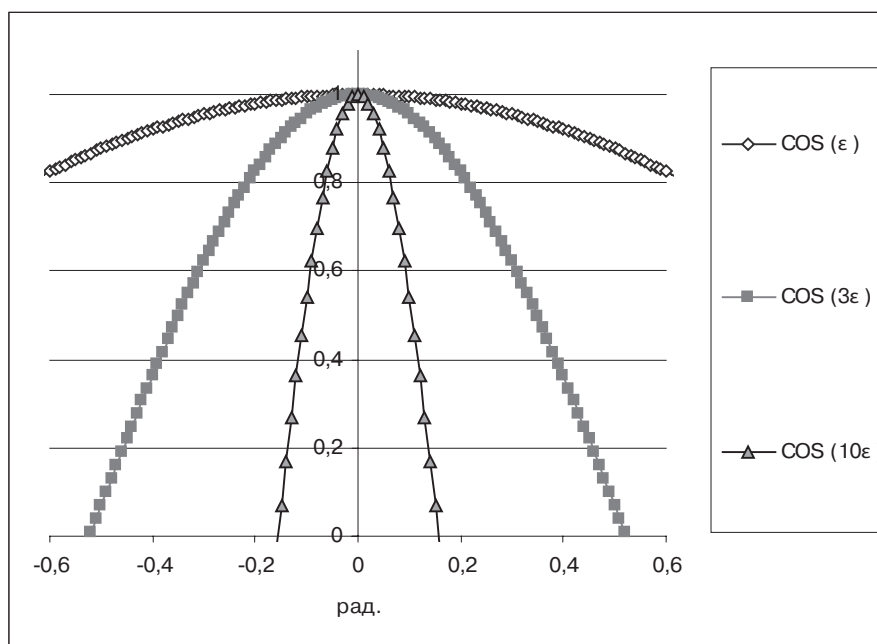


Рис. 4. Діаграми спрямованості, використані для розрахунків зміни чутливості

мірювання. Вимірювання коректні (з похибкою близько 1 %) при кутовій ширині приймальної діаграми яскравоміра, в 7–10 разів меншій, ніж кутова ширина діаграми спрямованості випромінювання.

Рекомендації

Повертаючись до питання про рекомендації щодо побудови повірочної схеми для вимірювання яскравості, необхідно відзначити, що не дивлячись на те, що область світлових вимірювань є цілісною і нерозривно зв'язаною для всіх світлових одиниць, з практичних причин вже відбулося її розділення: виділено область вимірювань світлового потоку. Тому, чи будуть вимірювання яскравості забезпечуватися окремою гілкою в новій схемі, або буде створено окрему повірочну схему, вже не є принциповим питанням. Проте у будь-якому випадку неможливо ігнорувати рекомендації Публікацій МКО, а отже, необхідно передбачити апаратурну можливість визначення метрологічних характеристик указаними в них засобами.

Використання в різних приладах світлодіодів з різними діаграмами спрямованості випромінювання буде і далі постійно зростати. На етапі передачі одиниці уникнути похибок, пов'язаних з різними діаграмами розподілу яскравості, можна, використовуючи джерело з рівномірним розподілом яскравості. Єдиним загально визнаним джерелом рівномірної за всіма напрямками яскравості є фотометрична сфера. Тому хотілось би, щоб установки, які використовують робочі еталони яскравості, мали у своєму складі ламбертовський випромінювач з вихідним отвором, достатнім для передачі одиниці робочим засобам вимірювання, що повіряються.

На цей час використовується передача одиниці яскравості за допомогою розсіюючого скла і вимірювання освітленості, відстані і площі діафрагми, що є одним із способів передачі опосередкованим методом. Враховуючи обмежені можливості лабораторій з використання ламбертовського джерела, необхідно зберегти цей підхід.

Висновки

Враховуючи найменші похибки при передачі методом компарування, слід передбачити можливість передачі одиниці яскравості цим методом. Крім того, як показано вище, неможливо ігнорувати похибки, що виникають при різних діаграмах розподілу яскравості.

З урахуванням результатів розрахунків щодо впливу діаграми спрямованості, вимірювання треба проводити не під одним, а під декількома кутами, що відрізняються один від одного на кут, який до-

рівнює кутовій ширині приймальної діаграми голівки яскравоміра. Процедура градування яскравоміра не зміниться, проте з'явиться додаткова складова похибки, пов'язана з виглядом діаграми спрямованості використовуваного джерела.

Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що конструкції яскравомірів зі змінюваними кутовими характеристиками вимагають уважного ставлення до визначення їх метрологічних характеристик. Для приладів з кутовою шириною приймальної діаграми менше 0,1 рад розглянуті похибки не перевищують 1 %, що задовольняє критерій малості похибок для робочих засобів вимірювання в рамках діючої повірочної схеми. Прилади з кутовою шириною більше 1 рад слід вважати вимірювачами світності (люмен на метр квадратний). Пристрої з кутовою шириною від 0,1 до 1 рад можуть використовуватися як давачі, але питання, яку саме величину вони вимірюють, залежить від діаграми спрямованості джерела і вимагає додаткового аналізу.

Список літератури

1. Державна повірочна схема для засобів вимірювань світлових величин: ДСТУ 3394-96. – К. – 1996. – 5 с.
2. Купко А.Д. Основные задачи в области световых измерений / А.Д. Купко // Світлолюкс. – 2009. – № 4. – С. 40–44.
3. Похідні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці: ДСТУ 3651.1-97. – К.: Держспоживстандарт України, 1997. – 43 с.
4. Фотометрия импульсная. Термины и определения: ГОСТ 24286-88. – М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1988. – 15 с.
5. CIE. Publication No 69, 1987 International Commission on Illumination “Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters”.
6. Метрологія. Люксметри та яскравоміри. Методика визначення метрологічних характеристик: ДСТУ (на розгляді).
7. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 469 с.
8. Физическая энциклопедия: в 5 т. / под ред А.М. Прохорова. – М.: Сов. энциклопедия, 1988.
9. ГСИ. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения: ГОСТ 8.332-78. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 6 с.