

О.Д. Купко, А.І. Шлома

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ НА ШЛЯХУ СТВОРЕННЯ ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ЯСКРАВОСТІ

Розглянута ситуація, що склалася в Україні з вимірюваннями яскравості, зокрема, відсутність з 1991 року Державного первинного еталона одиниць яскравості, із-за чого відтворення одиниці яскравості відбувається на рівні фотометрів - робочих еталонів і робочих засобів вимірювання освітленості. На прикладі типового, детально описаного приладу, проаналізовано невизначеності одиниці яскравості, що виникають при відтворенні. Описана методика відтворення одиниці яскравості. Проаналізовано основні невизначеності, що пов'язані з чутливістю фотометра. Додатково теоретично оцінено невизначеності, що виникають внаслідок відмінності геометрії розповсюдження променів під час калібрування фотометра і під час відтворення одиниці яскравості, а також внаслідок відмінності в температурному режимі лампи. За допомогою експериментальних досліджень оцінені невизначеності, що виникають внаслідок неідеальності діаграми спрямованості випромінювання від поверхні. На основі запропонованої методики вимірювання оцінено невизначеності площі діафрагми, що виникають. На основі проведених оцінок запропонований і проаналізований бюджет невизначеностей. Надано невизначеності вимірювань, що обумовлені відмінністю спектральних характеристик джерел, до яких призведе використання екрана монітора у якості джерела під час відтворення та калібрування. Показана можливість забезпечити вимірювання яскравості на рівні, представленому в СМС рядках провідних метрологічних країн. Відмічена доцільність створення окремої гілки вимірювань яскравості, яку очолює Державний первинний еталон яскравості.

Ключові слова: еталон одиниці яскравості.

1. ВСТУП

У 1990 році була прийнята повірочна схема [1], що регламентує процес передавання світлових одиниць від первинного еталона до робочих засобів вимірювання. Це була розгалужена, деталізована схема. Вже в 1991 році вона втратила актуальність. Україна була вимушена створювати власну повірочну схему і відповідну до неї систему метрологічного забезпечення світлових вимірювань. Така схема була створена за короткий термін і внаслідок цього в ній були відсутні гілки, які пов'язані з вимірюваннями світлового потоку, яскравості, періодичних і імпульсних світлових величин. У 2013 році відбулося розділення єдиної повірочної схеми для світлових вимірювань. Вимірювання світлового потоку було виділено в окрему повірочну схему. Під час модернізації еталона одиниці сили світла [2] повірочна схема була змінена, але окремої гілки вимірювань яскравості та відповідного еталона не було. Частково це можна пояснити складнощами вимірювань яскравості. Діапазон з вимірювань яскравості у [1] великий (10^{-1} кд/м² - 10^{10} кд/м²) від яскравості чорного тіла з температурою 6500 К до області смеркового зору. У новій редакції Закону про метрологію вже не було згадки про перевірочні схеми. Відбувався процес переходу від повірок до калібрувань. Відповідальність за можливість застосування засобів вимірювання була перенесена від метрологічних служб на безпосереднього користувача. Схеми простежуваності не є настільки чітко регламентованими, як перевірочні схеми. Якщо відсутній яскравомір, вимірювати (відтворювати) яскравість поверхні, що світиться, можна за наявності люксметра з відомою чутливістю, який розташований на відомій відстані від поверхні з діафрагмою, площа якої відома. Невизначеність цього вимірювання (відтворення і зберігання) може змінюватися в широких межах і може бути визначена за загальноприйнятими правилами. На даний момент у ННЦ «Інститут метрології» проводиться відтворення і зберігання одиниці яскравості на основі еталона одиниці сили світла. Метою цієї статті є аналіз невизначеності процедури відтворення одиниці яскравості, яка зараз існує, з метою з'ясування можливостей зменшення невизначеності для подальшого поліпшення системи метрологічного забезпечення вимірювань яскравості.

© О.Д. Купко, А.І. Шлома, 2022

2. СХЕМА ВІДТВОРЕННЯ

Відтворення одиниці яскравості в ННЦ «Інститут метрології» відбувається відповідно до визначення, тобто вимірюється сила світла поверхні, що рівномірно світиться, з одиниці площі. Відтворення здійснюється на установці, оптичну схему якої надано на рис. 1. Ця схема є типовою для багатьох користувачів, тому може бути основою для аналізу стану вимірювань яскравості в країні. Відмінності в лінійних розмірах, чутливості приймача і силі світла лампи можуть бути легко враховані.

Випромінювання стабілізованої світловиміральної лампи СИС 107-500 потрапляє на світлорозсіювальний екран, який розташовано на відстані $L_1 \approx 0,8$ м (див. рис. 1). Діаметр екрана (0,16 м) перевищує область візування найбільш поширених в Україні яскравомірів (ТЕС 0693 та Екотензор-03). Таким чином, використовується випромінювання світловиміральної лампи в межах кута 0,1 радіан, а нерівномірність освітленості екрана складає близько 0,5%. Безпосередньо до екрана примикає світлоізолюваний корпус, на вході якого розташовано прецизійну діафрагму, а на виході - фотометр, спектральна чутливість якого відповідає відносній спектральній світловій ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору $V(\lambda)$. Чутливість фотометра до випромінювання типу А визначена на еталоні одиниці сили світла ДЕТУ 11-02-15 [2]. У світлоізолюваному корпусі розташовані діафрагми, які мінімізують відбиття від стінок, внутрішня поверхня яких пофарбована чорною фарбою. На виході із світлоізолюваного корпусу знаходиться фотометр з діафрагмою, яка необхідна для того, щоб коректно визначити відстань від нього до вхідної діафрагми. Кріплення фотометра забезпечує постійність відстані між вхідною діафрагмою світлоізолюваного корпусу і діафрагмою фотометра. Діаметр прецизійної діафрагми і відстань від неї до діафрагми фотометра вибрані таким чином, щоб забезпечити достатній рівень освітленості і не істотно спотворювати спектральну чутливість фотометра внаслідок недостатньої паралельності падаючого на нього випромінювання. Геометричні розміри вимірюються в попередніх експериментах. Така конструкція світлоізолюваного корпусу з фотометром по суті є яскравоміром і дозволяє визначати яскравість вхідного отвору світлоізолюваної камери не тільки від встановленого світлорозсіюючого екрана, але і від інших поверхонь, що рівномірно світяться, наприклад, екранів моніторів. Живлення світловиміральної лампи здійснюється стабілізованим блоком WY12010. Реєстрація струму фотометра здійснюється пікоамперметром Keithley 6485/E.

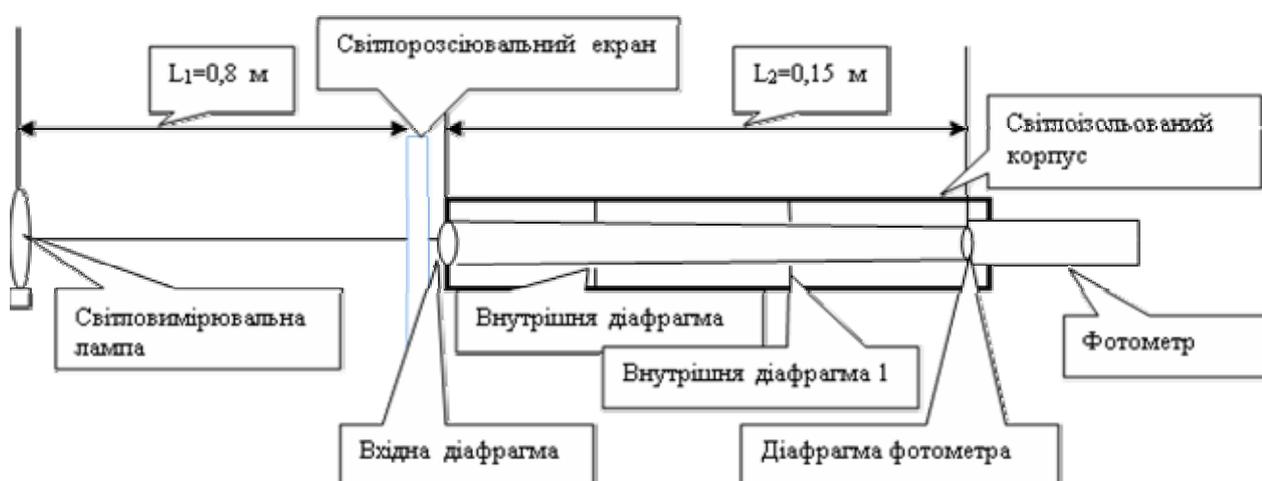


Рис. 1. Оптична схема відтворення одиниці яскравості.

3. АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ

Аналіз невизначеностей відтворення здійснювався на основі формули для середньої яскравості (B) ділянки, що візується:

$$B = \frac{J \cdot s \cdot L^2}{S}, \quad (1)$$

де J – вимірне значення струму фотометра;

s – чутливість фотометра до випромінювання світловиміральної лампи, що пройшло світлорозсіювальний екран;

L – відстань між входною діафрагмою і діафрагмою фотометра;

S – площа входної діафрагми.

При калібруванні фотометра визначається чутливість фотометра до випромінювання світловиміральної лампи, що працює в режимі джерела типу А, тобто що має фіксований спектр, та яка розташована на великій відстані в порівнянні з розміром лампи і фотометра. Під час відтворення одиниці яскравості на установці (рис. 1) чутливість фотометра зміниться внаслідок іншої геометрії розповсюдження променів. Промені проходять у фільтрі дещо більшу відстань, ніж під час калібрування, а отже, як абсолютна, так і відносна спектральна чутливість фотометра змінюється. Температура ниток розжарювання світловиміральної лампи, яка використовується в установці, дещо відрізняється від температури світловиміральної лампи, яка використовувалась під час калібрування. Крім того, спектральний склад випромінювання змінюється внаслідок проходження світлорозсіюючого екрана. Оскільки в екрані відбувається розсіювання на неоднорідностях різного розміру, то відповідно до [3, 4], діаграма спрямованості для різних довжин хвиль буде різною, що так само змінить спектр. Оцінимо ці ефекти.

Найбільш важлива характеристика фотометра при вимірюваннях - співвідношення сигнал/шум. Шум визначається сумісною стабільністю блока живлення, світловиміральної лампи і фотометра. Ця величина оцінювалася статистичними методами, при стабільній напрузі блока живлення. Протягом 10 хвилин щохвилини фіксувався струм фотометра, який складав 13,5 нА із середнім квадратичним відхиленням 0,08 нА, тобто 0,59%.

Світлоізолюваний корпус разом з фотометром на рис. 1 є яскравоміром, тому його можна характеризувати способами, передбаченими у (5). В першу чергу, для фотометра це показник первинного налаштування (*initial adjustment index*) f_{adj} , в даному випадку це є результатом калібрування фотометра з приписаною йому невизначеністю. Відмінність спектральної чутливості від $V(\lambda)$ описується загальним показником відмінності від $V(\lambda)$ (*general $V(\lambda)$ mismatch index*) f'_1 , проте він не є невизначеністю, її слід враховувати окремо. Аналогічно і інші показники не є відповідними невизначеностями, але вони можуть бути використані для їхнього визначення.

Група показників f_2 пов'язана з кутовою чутливістю (показник кутової чутливості для яскравості (*directional response index for luminance*) $f_{2,g}$, показник кутової симетрії (*directional symmetry index*) $f_{2,s}$, і показник впливу оточуючого поля (*surrounding field effect index*) $f_{2,u}$. Внаслідок обраної конструкції яскравоміра (світлоізолюваного корпусу), а саме – симетрії і непрозорості матеріалу корпусу і діафрагми, ця група не є суттєвим внеском в результуючу невизначеність.

Однією з найважливіших характеристик яскравоміра є показник лінійності (*linearity index*) f_3 , тому нелінійність яскравоміра була оцінена в окремих експериментах. Методика дослідження полягала в наступному: на приймач подавалося випромінювання, вимірювався сигнал I_1 , після цього подавалося інше випромінювання, приблизно такої ж потужності. Після вимірювання сигналу подавалися обидва ці випромінювання і вимірювався сигнал I_{1+2} . Обчислювалася величина сигналу у відсотках 100 $(I_{1+2} - I_1 - I_2) / I_{1+2}$. На рівнях

потужності, які відповідають відтворенню одиниці яскравості, ця величина складала близько 0,5%, а на рівнях, відповідних калібруванню фотометра, близько 0,1%. Оскільки використовувався пікоамперметр Keithley, з 6 розрядами індикації, то показник дисплею (*display-unit index*) f_4 не було сенсу враховувати. Аналогічно і показник похибки перемикачів каналів f_{11} .

Вплив температури і вологості (показник температурної залежності (*temperature dependence index*) $f_{6,T}$ та показник впливу вологості (*humidity test index*) $f_{6,H}$) також не оцінювався, внаслідок стабільних умов вимірювання та малого часу між калібруванням і вимірюванням яскравості. Окрім перерахованих чинників, існують специфічні впливи, характерні для обраного переліку елементів та методики.

4. НАХИЛ ПРОМЕНІВ

Враховуючи, що діаметр фотометра - 7 мм, діаметр діафрагми - близько 15 мм, відстань між ними - близько 150 мм, то максимальний нахил променів - приблизно 0,073 радіан, тоді як чутливість визначається практично для паралельного пучка. Якщо всі промені відхиляться на такий кут, то пропускання на кожній довжині хвилі зміниться і чутливість фотометра, яка для паралельного пучка відповідала $S(\lambda)$, складатиме $10^{\log S(\lambda) / \cos(0,073)}$. Її зміну ($\Delta S(\lambda) = S(\lambda) \cdot 10^{\log S(\lambda) / \cos(0,073)} - S(\lambda)$) залежно від довжини хвилі у логарифмічному масштабі надано на графіку на рис. 2.

Зміна інтегральної чутливості ΔS оцінювалася відповідно до формули 2:

$$\Delta S = \left(\frac{\int_{380}^{780} Plank(T, \lambda) \cdot S(\alpha, \lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} Plank(T, \lambda) \cdot S(0, \lambda) d\lambda} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

де $Plank(T, \lambda)$ - функція розподілу Планка за температурою та довжиною хвилі; $S(\alpha, \lambda)$ та $S(0, \lambda)$ - спектральні чутливості фотометра на довжині хвилі λ для кутів нахилу α та 0 відповідно.

Для джерела з температурою 2856 К це призведе до зміни чутливості на 0,13 %, що може слугувати максимальною оцінкою відповідної невизначеності.

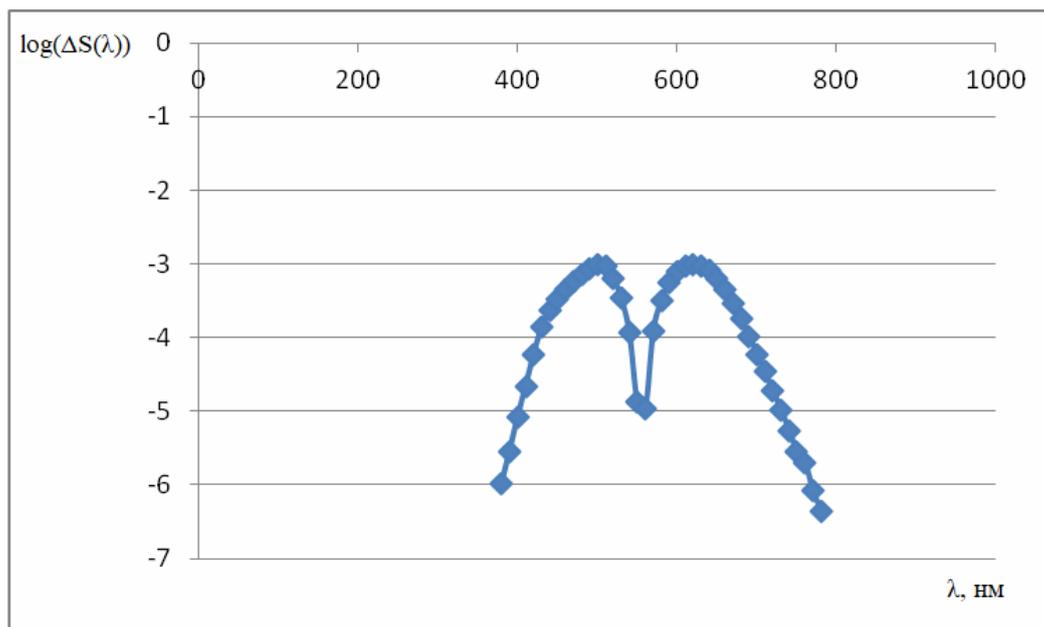


Рис. 2. Зміна відносної спектральної чутливості фотометра, яка обумовлена нахилом падаючих променів.

5. ДІАГРАМА РОЗСІЯННЯ ЕКРАНА

Для оцінки впливу діаграми розсіяння екрана було проведено вимірювання діаграми спрямованості випромінювання світлорозсіювального екрана. Стабілізована світловимірювальна лампа в режимі джерела типу А освітлювала матовий екран, за яким знаходилася діафрагма діаметром 15 мм. На відстані 300 мм від діафрагми знаходився фотометр з діафрагмою 7 мм, тобто геометрія співпадала із схемою на рис. 1, але фотометр можна було пересувати перпендикулярно до оптичної осі.

Досліджувався розподіл освітленості в площині фотометра, залежно від кута розповсюдження випромінювання. Розподіл освітленості в широких межах зміни цієї величини (від 0 до 0,33 радіан) представлений на рис. 3.

Для малих кутів відхилення, що відповідають відхиленням від осі до 1,5 см, розраховувався світловий потік, що потрапляє в коло з відповідним радіусом. Розрахунки велися для рівномірного розподілу і для виміряного розподілу, розраховувалися їхні відношення. Результати розрахунків представлені на рис. 4.

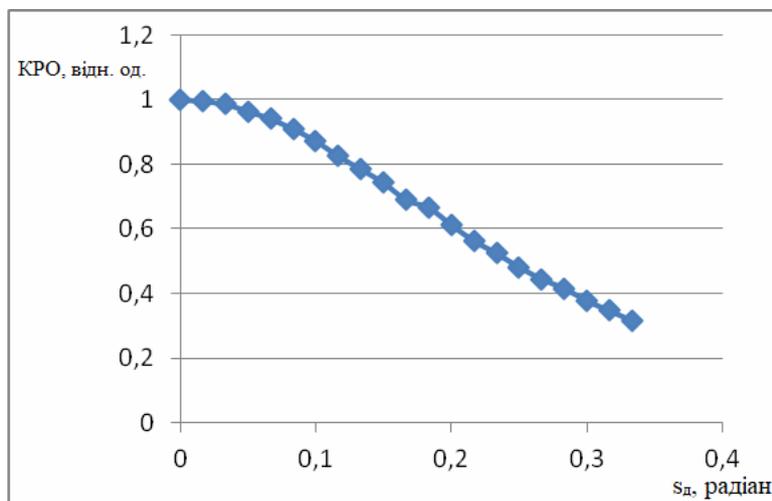


Рис. 3. Кутовий розподіл освітленості (КРО), що створюється малою ділянкою світлорозсіювального екрана s_d в межах від 0 до 0,33 радіан.

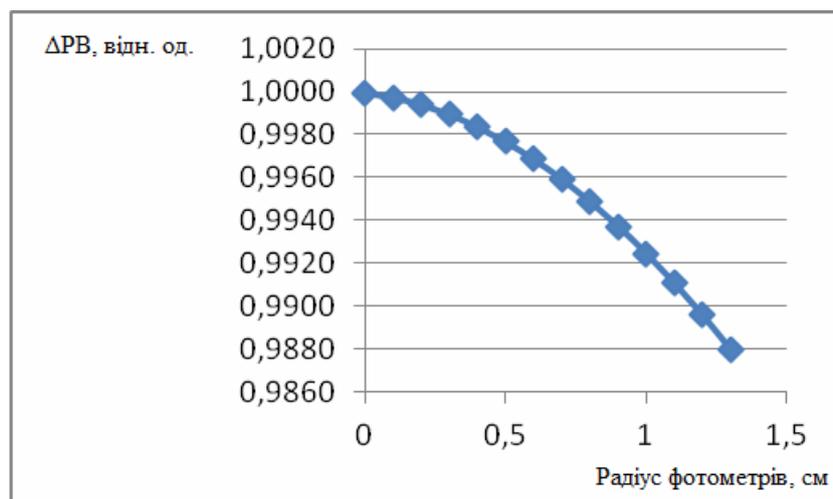


Рис. 4. Результати розрахунку відхилення в результатах вимірювання (ΔP_B), що обумовлені нерівномірним розподілом освітленості в площині фотометра для різних радіусів приймальної діафрагми фотометра.

Таблиця 2. Результати розрахунку відносних відхилень в результатах вимірювань, що обумовлені відмінністю в температурах нитки розжарювання лампи.

Температура, К	2650	2806	2856	2906	3000
Відносне відхилення	1,024	1,005	1	0,995	0,987

Відмінність рівномірного освітлення від нерівномірного для діафрагми фотометра радіусом близько 11 мм досягає близько 1 %, для радіусу 0,3 см відмінність складе 0,1 %

У роботі [6] було показано, що для середньої яскравісної температури лампи розжарювання 2856 К, температура окремих частин змінюється від 2650 К до 3000 К. Для спектральної характеристики фотометра, що використовувався, було розраховано, до яких помилок призведе відмінність в температурі лампи. Результати розрахунку представлені в табл. 2.

Видно, що помилка в температурі нитки розжарювання лампи в 50 градусів призводить до помилок більш ніж 0,5%. Враховуючи, що зміна напруги на лампі на 1 В призводить до зміни середньої колірної температури лампи на 10 градусів, то для того, щоб забезпечити точність 0,1%, необхідно відтворювати режим лампи з точністю всього лише 1 В.

5.1. ВІДСТАНЬ МІЖ ДІАГРАМАМИ

Особливість вимірювання відстані між вхідною діафрагмою і діафрагмою фотометра обумовлена способом кріплення фотометра в світлоізолюваному корпусі. Відстань не може бути безпосередньо виміряна, тому окремо вимірювалася відстань від вхідної діафрагми до межі світлоізолюваного корпусу і відстань від діафрагми фотометра до стопорного кільця на корпусі фотометра і обчислювалася їхня різниця (304,64 мм). Вимірювання відстані проводилося на координатній машині з невизначеністю вимірювання близько 1,5 мкм. Невизначеністю цієї відстані вважався проміжок між межею світлоізолюваного корпусу і стопорним кільцем на корпусі фотометра, оцінений за точністю виготовлення (0,1 мм), тобто в 60 разів більше, ніж невизначеність вимірювання на координатній машині. Відносна невизначеність -близько 0,03 %.

6. ПЛОЩА ДІАФРАГМИ

Вимірювання площі вхідної діафрагми відбувалося на вимірювальному мікроскопі УИМ - 21. Мікроскоп дозволяє визначати координати точки із заявленою невизначеністю вимірювання 3,5 мкм. Поле зору не дозволяє спостерігати всю площу діафрагми. Питання відповідності реальній конфігурації діафрагми кола вимагає додаткового обґрунтування. Тому некоректно заздалегідь стверджувати, що габаритні розміри діафрагми є її діаметром, може спостерігатися еліпсоїдність та локальні відступи від форми кола. Використовувалася наступна послідовність дій. По черзі вимірювалися координати межі діафрагми, переходячи від точки до точки. Спеціальним чином величина відстані між точками вимірювання не фіксувалася. Для обчислення площі кола використовувалася наступна послідовність загальновідомих формул [7]. Спочатку розраховувалися довжини всіх радіусів r_i , проведених з довільної точки (x_0, y_0) до виміряних координат на межі фігури за формулою:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3)$$

Вибиравалася така точка з координатами (x_0, y_0) , які є середніми величинами усіх відповідних координат. Ця точка вважалася центром фігури. Зрозуміло, що для такого визначення центру немає необхідності в строгій відповідності форми діафрагми колу.

Наступним кроком розраховувалися площі трикутників, утворені сусідніми точками на межі діафрагми (x_i, y_i) (x_{i+1}, y_{i+1}) , і центром фігури за формулою:

$$A_{i,i+1} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_0 & y_0 & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_{i,i+1}$$

Внаслідок кривизни фігури сума площ A буде дещо відрізняться від площі діафрагми, тому розраховується кут α (град) між лініями, що проведені до сусідніх точок з центру діафрагми:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2 \cdot A_{i,i+1}}{r_i \cdot r_{i+1}}\right) \quad (5)$$

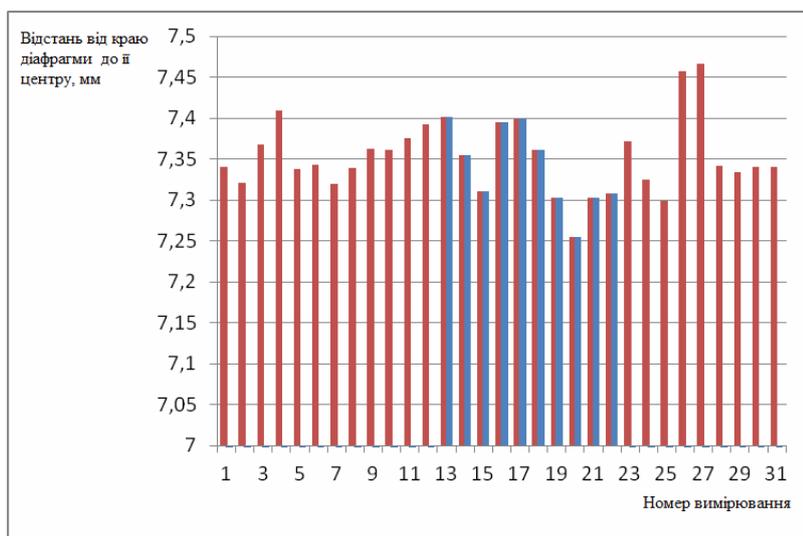
Після цього розраховувалися площі секторів $A^s_{i,i+1}$ за формулою:

$$A^s_{i,i+1} = \pi \cdot r_i \cdot r_{i+1} \cdot \alpha / 360 \quad (6)$$

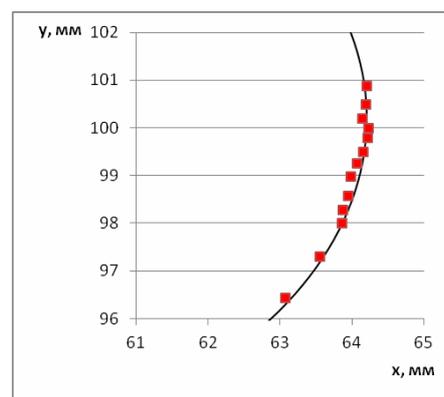
Площею кола A вважалася сума секторів $A^s_{i,i+1}$, кожен з яких утворений сусідніми точками і центром кола, яка деякою мірою враховує кривизну діафрагми:

$$A = \sum_{i=1}^N A^s_{i,i+1} \quad (7)$$

Було проведено дві серії вимірювань 20 і 30 точок по колу. Різне число точок вибрано для того, щоб докладніше провести вимірювання на ділянці неоднорідності, що була виявлена. За вимірними координатами були розраховані радіуси за формулою (3), результати надані на рис. 5 а. Графічне розташування точок поблизу неоднорідності представлено на рис. 5 б.



а



б

Рис. 5а. Результати розрахунку радіусів діафрагми, проведених до точок вимірювання координат на краю діафрагми від центру діафрагми (іншим кольором зазначені вимірювання поблизу неоднорідності) і рис. 5 б. Результати вимірювання координат краю діафрагми поблизу виявленої неоднорідності. Відстань від краю діафрагми до її центру, мм

Таблиця 3. Результати вимірювань площі діафрагми різними способами при двох вимірюваннях.

Результати	Вимірювання 1, мм ²	Вимірювання 2, мм ²
За сумою секторів формули (3-7).	169,98	170,05
За середнім радіусом за формулою (3).	169,86	169,96

Видно, що неоднорідність (результати від 13-ого до 21-ого вимірювань, рис. 5а) не занадто виділяється на тлі випадкових коливань. Результати вимірювань площі за формулами (3-7) та лише за формулою (3) представлені в таблиці 3 у першому та другому рядку відповідно.

Різниця максимальна 0,19 кв. мм, тобто 0,1 %. Якщо використовувати одну формулу, наприклад (3), то різниця складає майже 0,06%.

Детальніше питання невизначеностей вимірювання площі за згаданим способом (формули 3-7) описано в [8]. Там показано, як число точок вимірювань координат на межі діафрагми впливає на невизначеність вимірювання площі при незмінній невизначеності вимірювання координат кожної точки.

7. БЮДЖЕТ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ

Для оцінки невизначеності калібрування фотометра використані результати, що надано у сертифікаті. Сумісна нестабільність фотометра і блока живлення отримана статистичним методом для рівня освітленості фотометра під час відтворення яскравості. Нелінійність фотометра вимірювалася експериментально для рівня освітленості, на нижньому рівні визначається саме цією величиною, відповідного калібруванню фотометра нелінійність склала 0,15%. Температурною залежністю чутливості фотометра нехтували внаслідок постійності температури у приміщенні. Сумісна нестабільність фотометра і блока живлення вже враховує вплив темного струму фотометра, тому не вносить вкладу до невизначеності. Враховуючи, що світлорозсіювальний екран використовується для калібрування найбільш поширених в Україні яскравомірів, нерівномірність освітлення світлорозсіювального екрана було внесено до бюджету, тобто бюджет надано для усього світлорозсіювального екрана. Для оцінювання було використано максимальні оцінки невизначеностей. Остаточний бюджет невизначеностей вимірювання яскравості надано в таблиці 4.

Таблиця 4. Бюджет невизначеностей вимірювання яскравості для випромінювача в режимі джерела типу А (коефіцієнт охоплення $k = 1$).

Джерело невизначеності	Величина	Розмірність	Невизначеність абсолютна	Невизначеність відносна, %
Калібрування фотометра.	85	лк/мкА		0,15
Темновий струм фотометра.	13,56	нА	0,01	0,07
Сумісна нестабільність фотометра і блока живлення	13,56	нА	0,08	0,59
Вимірювання відстаней	304,64	мм	0,0015	0,0005
Вплив проміжку.	305,64	мм	0,1	0,03
Вимірювання площі.	170	мм ²	0,19	0,11
Нахил променів.	1	відн. од.		0,13
Нерівномірність освітлення світлорозсіювального екрана.	1	відн. од.		0,5
Похибка в температурі лампи.	2856	К	10	0,1
Всього, %				0,81

Слід зауважити, що цей бюджет надано для конкретної установки. Найбільший вплив має перша група чинників - нерівномірність освітлення екрана та сумісна нестабільність фотометра та блока живлення, яка виникає внаслідок досить малого струму фотометра. Друга група з 5 чинників має приблизно однаковий вплив, від 0,07% до 0,15%. Тобто існує зрозумілий напрямок для удосконалення установки. Якщо забезпечити для першої групи чинників таку ж невизначеність вимірювань, що і для другої, то сумарна невизначеність зменшиться приблизно втричі, до рівня 0,25%.

7.1. НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ДЛЯ ЕКРАНІВ МОНІТОРІВ І ТЕЛЕВІЗОРІВ

Бюджет невизначеностей, що надано, не враховує спектральне пропускання світлорозсіювального екрана, тобто відноситься до випромінювання з неточно відомим спектром. Слід оцінити вплив спектрального складу випромінювання. Відповідно до [9], відступи від нейтральності коефіцієнта пропускання для скла МС 12, МС 13, МС 21, МС 19 з товщиною до 8 мм не перевищують 8,3%. Використання як джерела екранів моніторів або світлодіодних матриць призведе до істотно більших відхилень через те, що спектральний склад їхнього випромінювання істотно відрізняється від спектра випромінювання лампи розжарювання. Тому замість впливу пропускання світлорозсіювального екрана було оцінено вплив використання цих джерел для калібрувань яскравості. Для оцінки використовувалася величина Δ_i , що рекомендована в [5]:

$$\Delta_i = \left(\frac{\int_{380}^{780} Plank(T, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \cdot \int_{380}^{780} screen_i(\lambda) S(0, \lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} Plank(T, \lambda) S(0, \lambda) d\lambda \cdot \int_{380}^{780} screen_i(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \right), \quad (8)$$

де $Plank(T, \lambda)$ та $S(0, \lambda)$ - такі ж, як у формулі 2;

$screen_i(\lambda)$ - спектральний розподіл випромінювання світлорозсіювального екрана.

Як спектри екранів для розрахунків використовувалися матеріали, представлені в [10, 11]. Для фотометра, що використовувався, і екранів CCFL, ця величина склала 1,68 %, для LED екранів - 3,75%. Це істотне відхилення. Використовуючи підхід та дані, які надано в [12], можна оцінити характерні відхилення для світлодіодних джерел з різною колірною температурою.

Гістограма величин відхилення для використовуваного фотометра і для згаданих екранів, а так само екранів на основі білих світлодіодів з корельованими кольорними і температурами (CCT) від 2731 К до 8367 К, представлені на рис. 6.

Результати досліджень бюджету невизначеностей вимірювання (табл. 4) та розрахунку відхилень, що обумовлені різним спектральним складом випромінювання (рис. 6), характеризують саме цей фотометр, саме цієї установки. В [13] надані коефіцієнти корекції для білих світлодіодів з люмінофором та білих світлодіодів типу RGB. За допомогою цих даних можна оцінити очікувані відхилення для фотометрів з іншими значеннями f_i' . Результати оцінки представлені на рис. 7.

Слід зазначити, що графік, який надано на рис. 7, відображає найбільші відхилення, які притаманні незначній кількості типів світлодіодів, для більшої частини типів світлодіодів відхилення не такі значні. З представленого графіка видно, що для того, щоб забезпечити невизначеність вимірювання джерел на основі білих світлодіодів з люмінофором, порівняну з представленим бюджетом, достатньо забезпечити характеристику фотометра $f_i' \square 3,2$, а для білих світлодіодів типу RGB $f_i' \square 2,4$, що є цілком досяжним. Використання таких фотометрів дозволить проводити калібрування робочих засобів вимірювання яскравості, які призначені для вимірювання джерел на основі білих світлодіодів з люмінофором безпосередньо на

екранах без введення поправок на недосконалість спектральної корекції яскравоміра. Детальне знання спектральної чутливості фотометра та джерела випромінювання дозволить ввести поправки і істотно послабити вимоги до яскравоміра. Очевидно, що для яскравомірів, які у подальшому найчастіше будуть використовуватися при вимірюванні яскравості екранів, калібрування по екранах моніторів забезпечить менші невизначеності. Наприклад, як видно з рис. 7, для робочих засобів вимірювання з $f_i' = 7\%$ попереднє калібрування по екрану монітора за допомогою фотометра з $f_i' = 2,4$ призведе до зменшення цієї складової невизначеностей вимірювань робочими засобами вимірювань яскравості приблизно на величину від 0,5% до 1,6% для різних типів екранів.

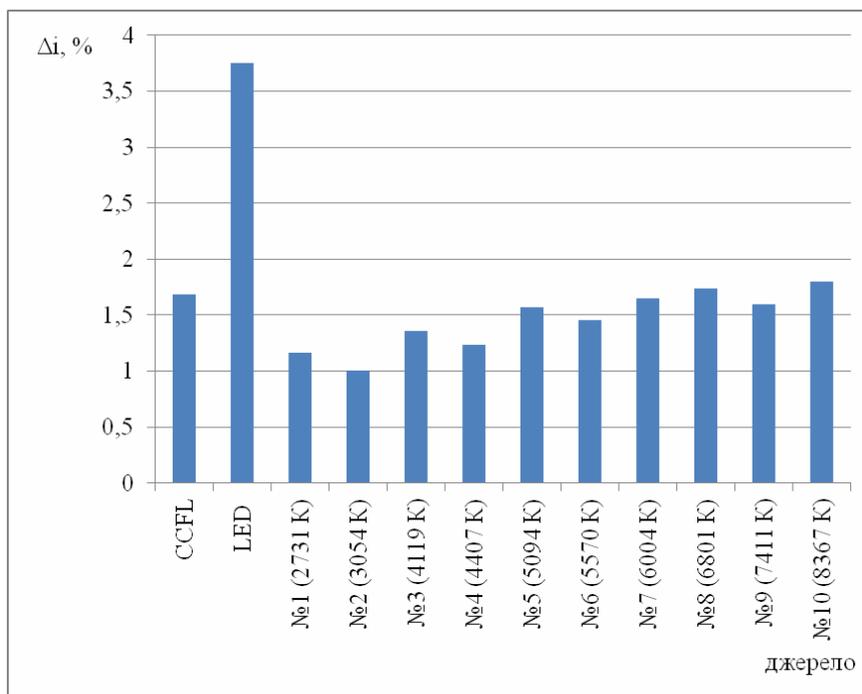


Рис. 6. Результати розрахунку відхилень, що обумовлені різним спектральним складом випромінювання для екранів моніторів і світлодіодних ламп з корельованими кольорними і температурами від 2731 К до 8367 К.

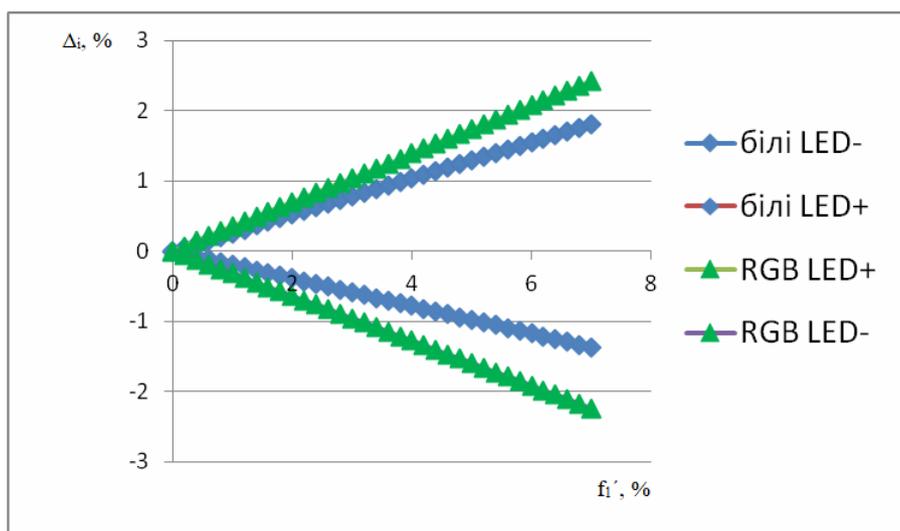


Рис. 7. Граничні невизначеності вимірювань, що обумовлені відмінністю спектральних характеристик джерел залежно від характеристики f_i' для білих і RGB світлодіодів відповідно до [13].

8. ВИСНОВКИ

Наданий бюджет дозволяє зробити висновки щодо удосконалення системи калібрування яскравостей. Розглянута схема є типовою для лабораторій, які проводять калібрування яскравомірів, висновки можуть бути застосовані до широкого кола користувачів в частині методики і апаратури. Найбільший внесок в результуючу невизначеність вимірювання вносить недосконалість фотометра і сумісна стабільність фотометра і блока живлення. Ця величина майже на порядок перевищує невизначеність, яка обумовлена темновим струмом фотометра, тобто існує можливість її скоротити. Недосконалість фотометра, зокрема, виявляється в тому, що він прокалібрований на відстані 1,8 м, тобто майже в паралельному пучку. Використовується ж в істотно непаралельному пучку, з геометрією променів, яка обумовлена розмірами діафрагм в світлоізолюваному корпусі і відстанню між ними. Світлорозсіювальний екран призводить до кутового розподілу випромінювання, що значно відрізняється від Ламбертовського. Обидва чинники збільшують невизначеність. Якщо використовувати відстань від світлорозсіюючого екрана до фотометра істотно більше, ніж та, що в розглянутому випадку, та замість світлорозсіювального екрана використовувати фотометричну сферу, то відповідні невизначеності істотно скоротяться. Інші складові ще менші. Ці чинники враховувалися як складові невизначеності, відповідні до них поправки не вносилися. Зрозуміло, що внесення відповідних поправок може істотно зменшити невизначеність калібрування.

Аналіз впливу спектрального розподілу джерела показав, що похибки вимірювань істотно залежать від нього. Уникнути такої залежності можна, або використовуючи високоточні фотометри, або провівши окремі калібрування для кожного виду спектра. Дорожнеча високоточних фотометрів робить очевидною необхідність використання високоточного фотометра під час калібрування, а при рутинних вимірюваннях можливе використання дешевших приладів.

Друга за впливом причина виникнення невизначеності вимірювань - це невизначеність калібрування фотометра. В даному випадку калібрування виконувалося на Державному первинному еталоні одиниці сили світла, тобто в інших випадках вона буде ще більша. Уникнути, або істотно зменшити цю складову можна тільки шляхом створення державного первинного еталону яскравості. Зменшення цієї складової до 0,1% і забезпечення сумісної стабільності фотометра, джерела і блока живлення дозволить досягти невизначеності відтворення одиниці яскравості на рівні зі стандартною невизначеністю менш ніж 0,4% та коефіцієнта охоплення $k = 2$. Враховуючи невизначеності, що представлені в СМС рядках (0,4 -2,5% Німеччина, 0,7-1,0 % США, 1,0 Великобританія ($k = 2$)), можна стверджувати, що цілком можливе створення еталона яскравості на рівні провідних індустріально розвинених країн. Створення окремого еталона яскравості дозволить зменшити кількість калібрувань під час передачі від первинного еталона до робочих засобів і, як наслідок, збільшить точність вимірювання яскравості.

ANALYSIS OF SOURCES OF UNCERTAINTY IN THE WAY OF CREATING A STANDARD UNIT OF BRIGHTNESS

A situation, folded in Ukraine with measurements of brightness, is considered, in particular, absence from 1991 of the State primary standard of units of brightness, from after what reproducing of unit of brightness takes a place at the level of photometers - workings standards and workings facilities of measuring of illumination. On the example of the typical setting described in detail analysed a vagueness, arising up at reproducing units of brightness. The method of reproducing of unit of brightness is described. The basic a uncertainty, related to the sensitiveness of photometer, based on the harmonized document was analyzed. Additionally in theory appraised a uncertainty, arising up from the difference of geometry of distribution of rays at calibration of photometer and at reproducing of unit of brightness, and similarly from distinction in the temperature condition of lamp. On the basis of experimental researches appraised a uncertainty, arising up from unideality of diagram orientation of radiation from a diffuser. On the basis of the offered method, measurings are appraised a uncertainty, the arising up from inaccurate knowledge areas of diaphragms are got. On the basis of the conducted estimations of the budget of uncertainty is analysed. Consequences in which using will result for realization and calibration the use as a source of screen of monitor are analysed. Expedience of creation of separate branch of measurings of brightness is marked on basis.

Keywords: standart unit of brightnees.

1. ГОСТ 8.023-90. Державна перевірна схема для засобів вимірювань світлових величин безперервного і імпульсного випромінювань(скасований).
2. Удосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла. *Український метрологічний журнал*. 2016. № 1.С. 37-42.
- 3 Хьюлст Г. Рассеяние света малыми частицами, пер. с англ., М., 1961.
- 4 Керкер М. The scattering of light and other electromagnetic radiation, N. Y.- L. 1969.
5. ДСТУ ISO/CIE 19476:2018 (ISO/CIE 19476:2014; Ed. 1.0, IDT), Вимоги до характеристик приладів для вимірювання освітленості та яскравості.
- 6 А.Д. Купко. Анализ погрешностей передачи световых единиц, обусловленных выбором режима горения лампы. *УМЖ*. 2012.№2, С.21-28.
7. И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов М.1981.720 стр.
8. Купко О.Д. Метрологія та прилади 2019. №6. С. 18-23.
9. В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова, Т.В. Точилина. Оптические материалы. Часть 2 .Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. Санкт-Петербург. 2013. 148 стр.
10. Антон Самсонов. Светодиодная подсветка: второе дыхание ЖК-мониторов.07.11.2008. <https://www.osp.ru/pcworld/archive/2008/09>.
11. Антон Самсонов. HP DreamColor LP2480zx - управление цветом. Дата: 12/05/2009. http://www.adsl.kirov.ru/projects/articles/2009/05/22/hp_dreamcolor_lp2480zx_part2/.
12. Ю. Г. Добровольський, Д. О. Калустова, О. Д. Купко, П. І. Неєжмаков, А. В. Рибалочка, Б. Г. Шабашкевич, В. Г. Юр'єв. Спектральні похибки серійних вітчизняних люксометрів при вимірюванні випромінювання світлодіодних джерел. *Український метрологічний журнал*. 2017.№ 2. С.19-26.
13. CIE S 025/E:2015. Test metod for LED lamps, LTL luminaires and LED moduls.