



УДК 535.241.41

Л. А. Назаренко, докт. техн. наук

С. А. Рева, асп.

Харківська національна академія
міського господарстваE-mail: Lnazarenko@ksame.kharkov.ua

П. І. Несжмаков, канд. техн. наук,

Національний Науковий Центр

«Інститут метрології»

ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦІ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ – ЛЮМЕНА

Вступ. Світловий потік є основним параметром джерел світла. Він визначається сумарним потоком джерела світла в тілесному куті 4π ср, його одиницею є люмен.

Світловий потік є найбільш економічно важливою фотометричною величиною, зважаючи на сучасні тенденції розвитку світлотехніка пов'язана із створенням енергетично ефективних джерел світла.

Незважаючи на це в Україні в наш час відсутні еталонні засоби відтворення одиниці світлового потоку – люмена. Є засоби вимірювання на рівні робочих еталонів для передавання одиниці світлового потоку, а сама одиниця – люмен береться за кордоном. Тому є актуальною задача створення прецизійних засобів відтворення одиниці світлового потоку. Впровадження енергозберігаючих освітлювальних технологій у відриві від надійних і достовірних методів вимірювання параметрів світлових приладів неможливо. Виконання державних інноваційних програм по освітленню і енергозбереженню неможливо без програми метрологічного забезпечення фотометрії, причому фундаментальних характеристик.

В даній публікації розглянуто методи вимірювання світлового потоку та конкретні реалізації відтворення або зберігання одиниці світлового потоку у провідних національних метрологічних інститутах.

Методи вимірювання світлового потоку. Як було зазначено вище, вимірювання повного світлового потоку полягає у знаходженні числового значення потоку випромінюваного джерелом у всіх напрямках, тобто в тілесному куті 4π . Виходячи з визначення сили світла – потік заключний у тілесному куті, можна визначити світловий потік знаючи розподіл сили світла (криві сил світла) джерела:

$$\Phi = \int_{(\Omega)} I d\Omega \quad (1)$$

де Ω – повний тілесний кут 4π

I – сила світла в елементарному тілесному куті

Криву сил світла джерела вимірюють за допомогою гоніометричної установки, яка дозволяє з заданим кутовим кроком виміряти силу світла у всіх напрямках, при цьому датчик рухається по поверхні уявної сфери. Рекомендація МКО під номером 84 від 1989 року [1] описує типи гоніофотометричних установок, та основні проблеми на які слід звернути увагу при розробці таких систем. Використання гоніометричних установок дозволяє крім визначення світлового потоку, також визначати просторовий

розподіл сили світла джерел та світлових приладів, а у випадку якщо гоніофотометр обладнаний спектральним приладом також визначати розподіл і спектральних характеристик. До недоліків можна віднести високу складність створення точних гоніометричних установок, велику кількість проблем з екрануванням потоку частинами гоніометра та розсіяним світлом. Для зменшення впливу розсіяного світла гоніофотометр потребує велике затемнене приміщення. Значну проблему також становить час вимірювання, яке може тривати кілька годин, що негативно впливає на термін служби лампи.

В наш час найбільш вдалу реалізацію даного методу використовує РТВ, провідний метрологічний інститут Німеччини. Гоніометричний метод застосовується в РТВ з 1950 року і за цей час був значно вдосконалений. Гоніометрична установка РТВ побудована на базі трьох роботизованих маніпуляторів змонтованих в спеціальній будівлі. Два маніпулятора застосовуються для переміщення датчиків, в нижній і верхній напівсферах, а третій маніпулятор забезпечує поворот і переміщення лампи. Гоніометр може проводити вимірювання з радіусом уявної сфери від 1 до 3 метрів. Під даний тип гоніометра РТВ розробили методики корекції розсіяного світла та систему прецизійного відтворення положення маніпуляторів. Старіння лампи під час вимірювання враховується за допомогою детектора-монітора який постійно направлений на джерело протягом всього часу вимірювання. Відповідно до [3] невизначеність вимірювання світлового потоку таким гоніофотометром становить 0,56% при $k=2$.

Крім гоніометричного методу вимірювання світлового потоку, рекомендація МКО [1] описує метод, рекомендований для вимірювальних лабораторій, який базується на вимірюванні світлового потоку у так званому інтегруючому фотометрі. Інтегруючий фотометр представляє собою пустотілу сферу, внутрішня поверхня якої покрита світловідбиваючою фарбою з дифузним відбиттям, в центрі якої встановлюється джерело випромінювання, а в стінку вмонтовано фотометр. Між фотометром і джерелом встановлено екран, який запобігає поглинанню перших променів від джерела. Така конструкція називається фотометричною сферою Ульбріхта, в честь вченого який теоретично обґрунтував можливість практичного використання такої конструкції як фотометра. Відповідно до цієї теорії освітленість стінки сфери пропорційна повному світловому потоку джерела випромінювання яке розміщено в сфері.

$$\Phi = E \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \cdot A \quad (2)$$

де Φ - світловий потік лампи;

E - освітленість поверхні сфери;

ρ - коефіцієнт відбиття поверхні сфери;

A - площа поверхні сфери;

Знаходження в сфері додаткових елементів (екранів, детектора і самої лампи) та недосконалість покриття не дозволяють використовувати формулу 2 для розрахунку потоку лампи, але в таких умовах можна достатньо точно провести порівняння світлового потоку еталонної лампи, каліброваної на гоніометричній установці та тестової лампи. Світловий потік тестової лампи розраховується наступним чином:

$$\Phi = \Phi_e \cdot \frac{Y}{Y_e} \quad (3)$$

де Φ - світловий потік тестової лампи;

Φ_e - світловий потік еталонної лампи;

Y - покази реєструючого пристрою при ввімкненій тестовій лампі;

Y_e - покази реєструючого пристрою при ввімкненій еталонній лампі;

Наявність додаткових елементів в сфері вводять певні вимоги до розміру сфери, для забезпечення достатньої кількості перевідбиття випромінювання всередині сфери, так рекомендація МКО [1] пропонує для вимірювання компактних ламп (розжарювання, компактних люмінесцентних ламп і т.п.) використовувати сферу діаметром у 10 разів більше ніж розмір джерела, а для трубчатих люмінесцентних ламп діаметр повинен бути хоча б у 2 рази більше за довжину лампи. Чутливість сфери зменшується з ростом діаметра квадратично. На практиці використовуються сферичні інтегруючі фотометри діаметром 1 – 2 м, рідше 3 м.

Калібрування еталонних ламп світлового потоку за допомогою інтегруючого фотометра потребує використання методів абсолютного інтегруючого фотометра. Такий метод менш затратний ніж побудова прецизійної гоніометричної системи, та не потребує великих темних приміщень. Крім того вимірювання в інтегруючому фотометрі виконується набагато швидше, що позитивно впливає на термін служби еталонних ламп. Такі методи були розроблені в NIST (США) та «ВНИИОФИ» (Росія).

Метод абсолютного інтегруючого фотометра, розроблений в NIST, базується на детекторному методі, з прив'язкою до первинного еталона сили світла [7]. Сам метод полягає у порівнянні світлового потоку тестової лампи з відомим світловим потоком введеним із зовнішнього джерела. Для введення калібрувального світлового потоку, в сфері виконується додатковий отвір, за яким знаходиться прецизійна апертура (близько 40 мм в діаметрі) через яку проходить потік від потужної лампи. Площа апертури відома з невизначеністю 0,03%. Лампа розташована за двома допоміжними екранами на відстані 70 см. В якості зовнішнього джерела використовується галогенна лампа розжарення потужністю 1000 Вт, яка працює при температурі 2856 К, при цьому через прецизійну апертуру вводиться світловий потік близько 3 лм.

Для точного визначення потоку введеного через прецизійну апертуру використовують фотометр який калібрований по еталонному люксметру, який в свою чергу калібрований на установці для відтворення сили світла.

Для відтворення одиниці світлового потоку з мінімальною невизначеністю, автор метода Й.Оно провів математичне моделювання, з метою визначити оптимальну конфігурацію елементів [4] сфери, а також провів аналіз джерел невизначеності при вимірюванні світлового потоку інтегруючими фотометрами, ця робота буде розглянута нижче.

Детектор в сфері має скориговану спектральну чутливість і косинусну корекцію. Для вимірювання сигналу використовується перетворювач струм-напруга зі змінною чутливістю. Нелінійність фотометра у діапазоні від 0,1 лм до 10000 лм становить не більше 0,05%. Для компенсації температурної залежності фотометр має вбудований термометр, покази якого використовуються для введення поправки.

Ефекти від нерівномірності покриття сфери враховуються при вимірюванні, так як при опроміненні сфери зовнішнім джерелом перші промені потрапляють на обмежену частину поверхні сфери. Ця методика буде розглянута нижче.

Загальний бюджет невизначеності цього метода, при $k=2$, становить 0,53%.

Цей метод був взятий за основу при розробці еталону світлового потоку у HUT (Фінляндія), при цьому різниця у відтворенні одиниці між еталоном NIST і HUT становить менше 0,2% [8].

Відтворення одиниці сили світла і світлового потоку у «ВНИИОФИ» (Росія) проводиться на одній установці [9, 10]. Світловий потік вимірюється по схемі схожій на схему відтворення світлового потоку в NIST, але не детекторним методом, а

методом еталонного джерела. В якості джерела випромінювання використовується високотемпературна широкоапертурна модель чорного тіла (МЧТ) типу BV3200pg з системою прецизійних апертур 15 мм та 30 мм. Температура МЧТ визначається за допомогою фільтрових радіометрів та прецизійних яскравомірів. В якості фотометра використовується фотометрична голівка P-15-FOT виробництва фірми LMT (Німеччина).

Діапазон відтворюваних величин становить 35 – 500 кд, для сили світла та 500 – 1500 лм для світлового потоку. Невизначеність відтворення одиниці сили світла та світлового потоку, при $k=2$ становить, відповідно 0,34% та 0,38%.

Джерела невизначеності при вимірюванні світлового потоку в інтегруючих сферичних фотометрах. Високий рівень точності відтворення одиниці світлового потоку забезпечується аналізом джерел невизначеності. Детальний аналіз джерел невизначеності був проведений Й. Оно (NIST), результати роботи опубліковані в [4, 5, 6] і були покладені в основу при розробці еталону світлового потоку в NIST. Розглянемо ці джерела більш детально, для класичного методу порівняння.

1. Самопоглинання світлового потоку лампами

Як було зазначено вище метод інтегруючого фотометра побудований на рівномірному розподілі освітленості по поверхні сфери за рахунок багаторазового перевідбиття світлового потоку в сфері. Але в реальній сфері є певна кількість елементів які призводять до поглинання світлового потоку, частина цих елементів стаціонарна (екрани, тримачі) і ефект від поглинання завжди однаковий як для еталонної так і для тестової лампи. А частина елементів, такі як кріплення лампи, і сама лампа змінні і можуть значно відрізнятись від розмірів еталонної лампи.

Ефект від самопоглинання світлового потоку можна врахувати, методика розрахунку поправки зазначена в [1] та [2] і полягає у використанні допоміжної лампи (auxiliary lamp в англійській літературі) для вимірювання поглинання потоку різними типами ламп. Поправку розраховують наступним чином:

$$\Phi = \Phi_e \cdot \frac{Y}{Y_e} \cdot \frac{m_e}{m} \quad (4)$$

де Φ - світловий потік тестової лампи;

Φ_e - світловий потік еталонної лампи;

Y - покази реєструючого пристрою при ввімкненій тестовій лампі;

Y_e - покази реєструючого пристрою при ввімкненій еталонній лампі;

m_e - покази реєструючого пристрою при ввімкненій допоміжній лампі, в сфері встановлена еталонна лампа і вимкнена;

m - покази реєструючого пристрою при ввімкненій допоміжній лампі, в сфері встановлена тестова лампа і вимкнена;

Слід зазначити, що корекція складається з двох вимірювань які вносять відповідну невизначеність у результат. Відповідно до [6] така невизначеність складає менше 0,1% при $k=2$.

2. Поглинання світлового потоку об'єктами у безпосередній близькості від лампи

Частина світлового потоку може бути поглинута до потрапляння на поверхню сфери. Таке поглинання зумовлено елементами кріплення ламп які знаходяться у безпосередній близькості до джерела. Врахувати ці втрати за допомогою допоміжної лампи неможливо. Для мінімізації такого впливу необхідно максимально зменшити розміри цих елементів і розмістити їх подалі від джерела, а коефіцієнт відбиття поверхні цих елементів повинен бути якомога більше.

3. Спектральна невідповідність

Різниця спектрів випромінювання тестової і еталонної лампи, а також недосконалість фотометричної голівки сфери призводять до похибок. Таку похибку можна врахувати якщо відомий спектральний розподіл випромінювання джерел та відносна спектральна чутливість фотометра, відповідна методика наведена у [1, 2].

Хоча зараз можливо створити фотометр з високим рівнем приведення чутливості під функцію $V(\lambda)$, але необхідно враховувати що ця чутливість, при вимірюванні спотворюється спектральною характеристикою покриття робочої поверхні інтегруючого фотометра, яка сильно залежить від типу покриття, його якості і ступеню забруднення.

В сучасних вимірювальних комплексах на базі інтегруючих сфер замість фотометричних голівок використовують спектро радіометри. Використання спектро радіометра дозволяє вимірювати спектральний розподіл світлового потоку джерел та визначати як радіометричні так і фотометричні характеристики джерел. Також спектро радіометр може бути використаний для визначення спектральної характеристики покриття сфери. Для цього достатньо виміряти відносний спектр джерела за межами сфери, а потім в сфері. Відношення цих величин і буде спектральним коефіцієнтом відбиття покриття сфери. Отримані дані можна використовувати для розрахунку поправки.

4. Старіння еталонних ламп

Світловий потік ламп впродовж робочого часу зменшується. Швидкість зміни залежить від типу лампи та якості її виготовлення. В якості еталонних ламп використовуються спеціальні світловимірювальні лампи, крім спеціальної конструкції вони відрізняються від звичайних побутових більш ретельним відбором, такі лампи можуть підтримувати стабільний потік впродовж тривалого часу. Використання побутових ламп в якості еталонних теж можливо, для цього необхідно провести відпалювання ламп та відбір по стабільності параметрів, але такі лампи потребують більш частого повторного калібрування.

Наприклад в NIST [7, с.35], світловий потік відтворюється і визначається для 18 ламп розжарювання, 12 з яких використовуються як первинний еталон світлового потоку, а 6 як робочі еталони для повсякденного калібрування на замовлення. Робочі лампи проходять повторне калібрування кожні 10 годин роботи. В той час як для спеціальних ламп [2] рекомендований інтервал між калібруваннями може становити 50 годин.

З метою урахування ефекту старіння необхідно вести облік часу роботи світловимірювальних ламп, а також слідкувати за змінами їх електричних параметрів, у разі зміни потужності лампи більше ніж на 0,1% [2] її слід повторно калібрувати.

5. Просторова неоднорідність чутливості сфери

В силу недосконалості покриття сфери, характеристика відбиття по поверхні неоднорідна. При відмінності просторового розподілу світлового потоку ламп, тестової та еталонної, виникають похибки. Цей ефект можна врахувати якщо визначити просторову характеристику відбиття поверхні сфери та розподіл сил світла джерела [5, 6].

Спочатку визначається неоднорідність просторової чутливості ($K(\theta, \phi)$) сфери (Spatial Response Distribution Function – SRDF) за допомогою скануючого джерела і визначається нормалізована функція:

$$K'(\theta, \phi) = \frac{4\pi \cdot K(\theta, \phi)}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} K(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi} \quad (5)$$

де $K(\theta, \phi)$ - неоднорідність просторової чутливості в точці (θ, ϕ) ;

Потім, визначають криву сил світла джерела і розраховують коефіцієнт чутливості сфери:

$$f_s = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_{rel}(\theta, \phi) K'(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} K(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi} \quad (6)$$

де $K(\theta, \phi)$ - неоднорідність просторової чутливості в точці (θ, ϕ) ;

$I_{rel}(\theta, \phi)$ - приведена сила світла джерела у напрямку

Для розрахунку поправки використовують відношення f_s порівнюваних джерел, формула 1 приймає наступний вигляд:

$$\Phi = \Phi_e \cdot \frac{Y}{Y_e} \cdot \frac{m_e}{m} \cdot \frac{f_s}{f_{se}} \quad (7)$$

де Φ - світловий потік тестової лампи;

Φ_e - світловий потік еталонної лампи;

Y - покази реєструючого пристрою при ввімкненій тестовій лампі;

Y_e - покази реєструючого пристрою при ввімкненій еталонній лампі;

m_e - покази реєструючого пристрою при ввімкненій допоміжній лампі, в сфері встановлена еталонна лампа і вимкнена;

m - покази реєструючого пристрою при ввімкненій допоміжній лампі, в сфері встановлена тестова лампа і вимкнена;

f_s - коефіцієнт чутливості сфери для тестової лампи;

f_{se} - коефіцієнт чутливості сфери для еталонної лампи;

Опираючись на [6] можна сказати, що похибка викликана неоднорідністю чутливості поверхні сфери пропорційна до $(1 - \rho)$, де ρ – коефіцієнт відбиття поверхні сфери, отже буде збільшуватись з часом, відповідно до забруднення поверхні сфери. Рекомендований інтервал зміни покриття сфери 1 рік.

Висновок

Використання методу абсолютного інтегруючого фотометра для відтворення одиниці світлового потоку люмену вигідно як в плані затрат на виготовлення устаткування так і в технічному плані (скорочений час вимірювання). Гоніометрична установка може бути більш універсальною (вимірювання просторового розподілу спектральних характеристик, вимірювання світлових приладів), але її реалізація вимагає значних затрат, а час вимірювання зменшує термін служби еталонних ламп.

Література

1. CIE Technical report №84 The measurement of luminous flux, 1989
2. ГОСТ 17616-82 Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров.
3. Г. Заутер, М. Линдемман, Р. Маасс Краткая история гониофотометрии в РТВ. СВЕТОТЕХНИКА 2011, №6 с. 22 – 35
4. Y. Ohno Integrating sphere simulation: application to total flux scale realization. APPLIED OPTICS Vol. 33, No. 13, May 1994, p. 2637 – 2647
5. Y. Ohno Detector-based luminous-flux calibration using the Absolute Integrating-Sphere Method. Metrologia, 1998, No. 35, p. 473 – 478

5. Y. Ohno Uncertainty in Sphere Photometry CIE Expert Symposium on Uncertainty Evaluation 22-24 Jan 2001, Vienna, Austria
6. NIST Special Publication 250-37 NIST MEASUREMENT SERVICES: PHOTOMETRIC CALIBRATIONS, NIST July 1997
7. K. Lahti, J. Hovila, P. Toivanen, E. Vahala, I. Tittonen, E. Ikonen Realization of the luminous-flux unit using an LED scanner for the absolute integrating-sphere method. Metrologia, 2000 №37 p. 595-598
8. Т.Б. Горшкова, В.И. Саприцкий, Р.И. Столяревская Метрологическая база световых измерений в России. СВЕТОТЕХНИКА, 2001, №4 стр. 48 – 54
9. В.И. Саприцкий, С.П. Морозова, С.А. Огарев, М.Н. Павлович, А.С. Панфилов, Б.Б. Хлевной. Обеспечение единства измерений величин характеризующих некогерентное оптическое излучение. Измерительная техника 2005, №11, стр. 12 – 16

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЕДИНИЦЫ СВЕТОВОГО ПОТОКУ – ЛЮМЕНА

Л.А. Назаренко, С.А. Рева, П.И. Неежмаков

Рассмотрен мировой опыт в воспроизведении единицы светового потока и современный уровень точности воспроизведения единицы. Рассмотрены основные методы, их преимущества, недостатки. Для методов на основе интегрирующего фотометра рассмотрены основные источники неопределенности.

REALIZATION OF LUMINOUS FLUX UNIT – LUMEN

L.A. Nazarenko, S.A. Reva, P.I. Nyezhamkov

World experience of luminous flux unit realization and current level of uncertainty considered in this paper. Overview of key methods, their advantages and disadvantages are provided in this paper. Main sources of uncertainty for methods based on integrating photometer considered here.