

Фотометр для контролю світлотехнічних параметрів світлодіодів

П.І. Неєжмаков¹, О.М. Ляшенко², Є.П. Тимофеев¹, О.Д. Купко¹,
А.С. Литвиненко², Ю.О. Васильєва²

¹ Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мironosiцька, 42, 61002, Харків, Україна
pavel.neyehmakov@metrology.kharkov.ua

² Харківський національний університет міського господарства, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна
happy.light9574@gmail.com

Анотація

Надано вирішення актуальної проблеми – підвищення точності вимірювання світлових параметрів світлодіодів (просторового кутового розподілу сили світла і світлового потоку), що визначають їх ефективне застосування в світлотехнічних системах різного функціонального призначення і тому потребують контролю при їх використанні у виробництві та експлуатації світлових виробів. Показано, що фотометр на основі стандартних цифрових камер із використанням волоконнооптичного фокону та корегуючого світлофільтра може забезпечувати достатню точність вимірювання просторового розподілу випромінювання джерел спрямованого світла. Завдяки використанню фокону і матричних дискретних фотоприймачів, розташованих у площині, яка перпендикулярна осьовому напрямку випромінювання, досягається отримання кутового просторового розподілу випромінювання джерела світла без пристроїв обертання, що скорочує час проведення вимірювань порівняно з гоніофотометрами різних типів, зменшення розмірів приміщення при забезпеченні точності вимірювань, а це в свою чергу знижує собівартість проведення випробувань. Характеристики і легкість керування сучасними цифровими фотокамерами дозволили застосування їх у якості фотоприймальної матриці, що спрощує конструкцію фотометра. Похибка вимірювання характеристик джерел із концентрованими типами кривих сил світла за допомогою фотометра в порівнянні з гоніофотометричними методами не перевищує 5%, що дозволяє використовувати такі фотометри для експрес-контролю такої продукції при масовому виробництві та в умовах експлуатації.

Ключові слова: фотометричне тіло; фотометр; світловий потік; просторовий розподіл випромінювання; фокон.

Отримано: 25.09.2020

Відредаговано: 27.11.2020

Схвалено до друку: 08.12.2020

1. Вступ

Відповідно до ДСТУ СІЕ 127:2017 контроль характеристик світлодіодів проводиться в сертифікованих лабораторіях (лабораторний контроль) і в лабораторіях установ виробничого або експлуатаційного характеру з використанням робочих еталонів джерел випромінювання, перевірених у сертифікованих лабораторіях (масовий контроль) [1]. Перевагами масового контролю є вища швидкість і менша собівартість за дещо нижчої, але прийнятної точності. Для проведення масового контролю, що відповідає зазначеним вище вимогам, в умовах виробництва та експлуатації потрібні методики та технічні засоби з досить високою продуктивністю, низькою вартістю вимірювань та достатньою точністю.

У [2] запропоновано метод порівняння двох просторових розподілів сили світла, що виділяє й усуває невідповідності, обумовлені відмінностями під час юстування і калібрування, тобто в абсолютних значеннях світлових потоків джерел світла. Більш того, ці розбіжності є частиною

методу, що дозволяє проводити повномасштабне порівняння наборів результатів вимірювань. Запропонований у [2] метод не може розрізнити неоднаковість світлових потоків ламп при різних калібруваннях гоніофотометрів. Крім того, він не враховує зміни характеристик ламп у процесі вимірювань і потребує дуже тривалого за часом методу розрахунку. Однак при перевірці результатів фотометричних вимірювань двох розподілів розрахунки доводиться проводити тільки раз, і часу на них витрачається менше, ніж для проведення випробувань.

У [3] побудовано математичну модель системи освітлена поверхня – фотокамера, розроблено методику градування матричних оптичних перетворювачів та фотокамер на їх основі, а також проведено вимірювання яскравості та розподілу освітленості по освітленій поверхні порівняно з нормативними параметрами. В [4, 5] детально проаналізовано методи вимірювань характеристик світлодіодів із застосуванням різних конструкцій гоніофотометрів.

Таким чином, удосконалення методів розрахунку і засобів вимірювань світлових величин для забезпечення пришвидшення і полегшення проведення контролю характеристик джерел випромінювання з вузьким кутовим розподілом сили світла є актуальним завданням внаслідок значного поширення цих джерел у сучасних освітлювальних системах і їх наявності зі значним розкидом основних характеристик.

Метою роботи є вирішення актуальної проблеми – підвищення точності вимірювання світлових параметрів світлодіодів із концентрованим просторовим розподілом сили світла і світлового потоку для такого типу фотометрів. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання: запропонувати фотометр, придатний для виконання масового контролю фотометричних характеристик джерел із концентрованим просторовим світлорозподілом; дослідити характеристики фотометра й обґрунтувати відповідність вимогам до масових вимірювань відповідно до чинного стандарту.

2. Фотометр для вимірювання світлових характеристик світлодіодів

У [6, 7] проведено детальний аналіз точності вимірювання фотометричних величин при застосуванні основних методів і засобів вимірювальної техніки. Обґрунтовано необхідність створення приладів та методів вимірювання для виробничих умов, які мали б достатню точність при високій продуктивності й низькій собівартості вимірювання. Цим вимогам відповідає фотометр на базі волоконнооптичного фокону і фотоприймальної матриці з корегуючим світлофільтром (рис. 1) [8].

Завдяки використанню фокону і матричних дискретних фотоприймачів, розташованих у площині, яка перпендикулярна осьовому напрямку випромінювання, досягається отримання кутового просторового розподілу випромінювання джерела світла без пристроїв обертання. Так забезпечується скорочення часу проведення вимірювань порівняно з гоніофотометрами різних типів, зменшення необхідних розмірів приміщення при забезпеченні точності вимірювань, що знижує собівартість проведення випробувань. Характеристики і легкість керування сучасними цифровими фотокамерами дозволили застосування їх як фотоприймальної матриці, що спрощує конструкцію фотометра. Зазначене вище підтверджує доцільність застосування фотометра описаної конструкції для проведення масового контролю світлових характеристик світлодіодів за умови забезпечення похибок резуль-

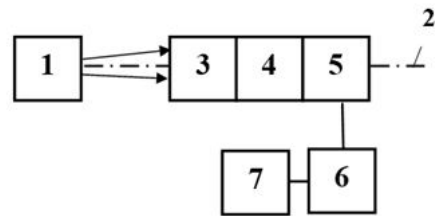


Рис. 1. Схема фотометра для контролю світлових характеристик світлодіодів: 1 – дослідне джерело випромінювання; 2 – вісь головного напрямку випромінювання дослідного джерела; 3 – фокус; 4 – корегуючий світлофільтр; 5 – матричний фотоприймач; 6 – блок оброблення інформації; 7 – блок візуалізації

татів вимірювання, при яких результати масових вимірювань узгоджуються з лабораторними [1].

3. Дослідження якісних характеристик фотометра

Враховуючи значний вплив спектральної чутливості матричного приймача фотометра (готової цифрової фотокамери) на точність вимірювання світлового потоку дослідного джерела випромінювання, було проведено перевірку відповідності відносної спектральної чутливості фотометра $S_f(\lambda)$ функції спектральної світлової ефективності для фотопічного зору $V(\lambda)$ відповідно до СІЕ 202:2011. Унаслідок проведених досліджень було визначено відхилення спектральних характеристик чутливості матричних приймачів (рис. 2) від стандартної кривої відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для фотопічного зору відповідно до ДСТУ ISO/СІЕ 19476:2018. Якість спектральної відповідності фотометра функції $V(\lambda)$ для певного джерела світла відповідно до цього національного стандарту було виражено через поправковий коефіцієнт спектрального неспівпадіння $F(S_N(\lambda))$:

$$F(S_N(\lambda)) = (a^* S_N(\lambda) - 1) \cdot 100\%,$$

де S_N – світлова чутливість фотометра з використанням джерела випромінювання N; $a^*(S_N(\lambda))$ – відносна світлова чутливість, яка є відношенням світлової чутливості фотометра під час використання джерела N до світлової чутливості фотометра при використанні джерела A. Межі інтегрування (λ_{\min} , λ_{\max}) є ділянкою довжин хвиль, де $S_N(\lambda)$ відмінна від нуля.

При заміні $a^*(S_N(\lambda))$ його виразом було отримано:

$$F(S_N(\lambda)) = \left(\frac{\int_{380}^{780} S_N(\lambda) S_f(\lambda) d\lambda \int_{380}^{780} S_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S_N(\lambda) V(\lambda) d\lambda \int_{380}^{780} S_A(\lambda) S_f(\lambda) d\lambda} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $S_A(\lambda)$ – світлова чутливість фотометра під час використання джерела типу А; $S_f(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість фотометра.

Для забезпечення регламентованої точності вимірювань спектральних характеристик випромінювачів необхідно виміряти спектральні чутливості каналів фотоприймача. Однак експериментальне отримання даних ускладнюється неможливістю виконання прямих вимірювань цих характеристик внаслідок залежності чутливості матричних приймачів від сигналу. Для оцінки похибки вимірювань фотометром просторового розподілу інтенсивності випромінювання у видимому діапазоні оптичного спектра в разі використання в якості фотоприймачів матриць сучасних цифрових фотокамер було запропоновано експериментальну установку (рис. 2) і проведено дослідження спектральних характеристик чутливості матричних приймачів для визначення їх відхилень від стандартної кривої відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для фотопічного зору відповідно до процедури стандартизації ДСТУ ISO/CIE 19476:2018 [9].

Спектральні характеристики досліджених цифрових камер із матричними приймачами наведено на рис. 3. Відхилення отриманих спектральних характеристик від стандартної кривої відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору $V(\lambda)$ (рис. 3) визначає похибку вимірювань фотометричного тіла світлових приладів. Для оцінювання результатів вимірної відносної спектральної чутливості матриць цифрових камер було проведено розрахунки за формулою (1) у спектральному інтервалі від 380 до 780 нм із кроком 10 нм. Визначено, що похибка фотометричних вимірювань з викорис-

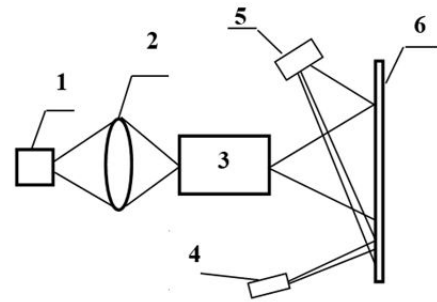


Рис. 2. Схема установки для вимірювання спектральних характеристик цифрових камер: 1 – еталонне джерело випромінювання; 2 – лінза; 3 – монохроматор; 4 – додаткове джерело випромінювання для освітлення екрану; 5 – цифрова фотокамера; 6 – білий екран із дифузним відбиттям

танням тільки “зеленого каналу” цифрової камери знаходиться в діапазоні від 22 до 6%.

Для зменшення спектральної похибки фотометра було відкореговано спектральну характеристику чутливості цифрової фотокамери $S_f(\lambda)$ за допомогою корегуючого світлофільтра. Було використано комбінацію чотирьох кольорових світлофільтрів ЗС 8, СЗС 24, ЖЗС 18 та СЗС-21 [10]. При розрахуванні товщину скла марки СЗС-21 прирівняли до нуля, тому далі наведено дані для комбінації товщин для трьох марок скла. Найкращі результати корегування спектральних характеристик отримано при застосуванні корегуючого комбінованого фільтра зі скла марок ЗС 8, СЗС 24 та ЖЗС 18 із товщинами відповідно 1,37 мм, 10,65 мм і 3,23 мм для фотокамери Sony ICX285AQ (рис. 4, крива 2). Інші дві криві (рис. 4) отримані за таких параметрів марок скла: для кривої 3 – 2,28 мм; 7,28 мм; 2,29 мм; а для кривої 5 – 1,56 мм; 5,83 мм; 4,04 мм відповідно для марок скла ЗС 8, СЗС 24 та ЖЗС 18.

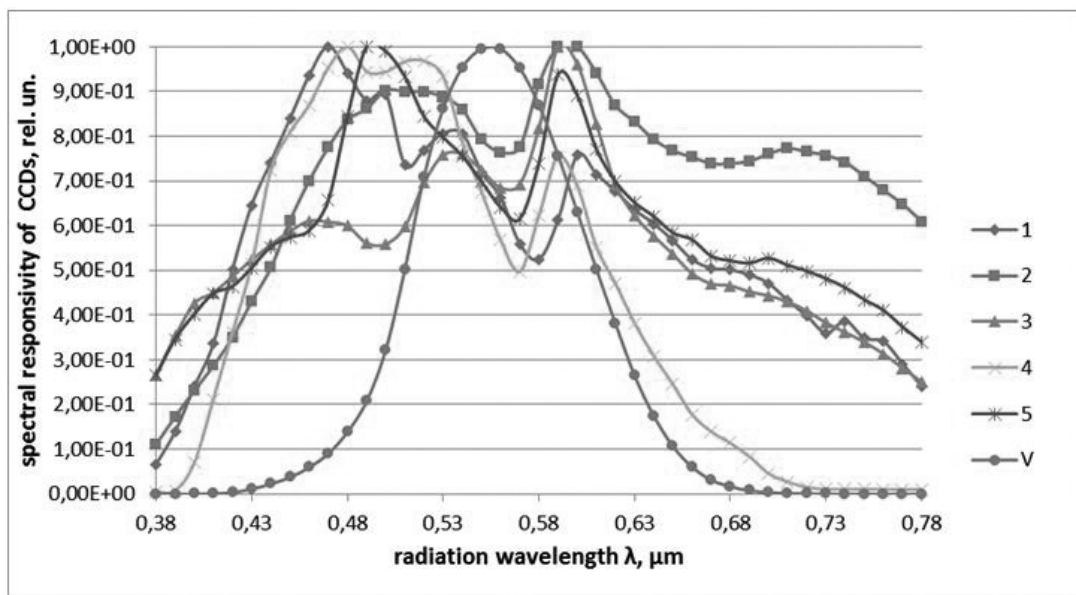


Рис. 3. Сумарні характеристики спектральної чутливості цифрових камер:
1 – Kodak Z981; 2 – Sony ICX285AQ; 3 – Olympus SC50; 4 – NIKON D700; 5 – Sony IMX214

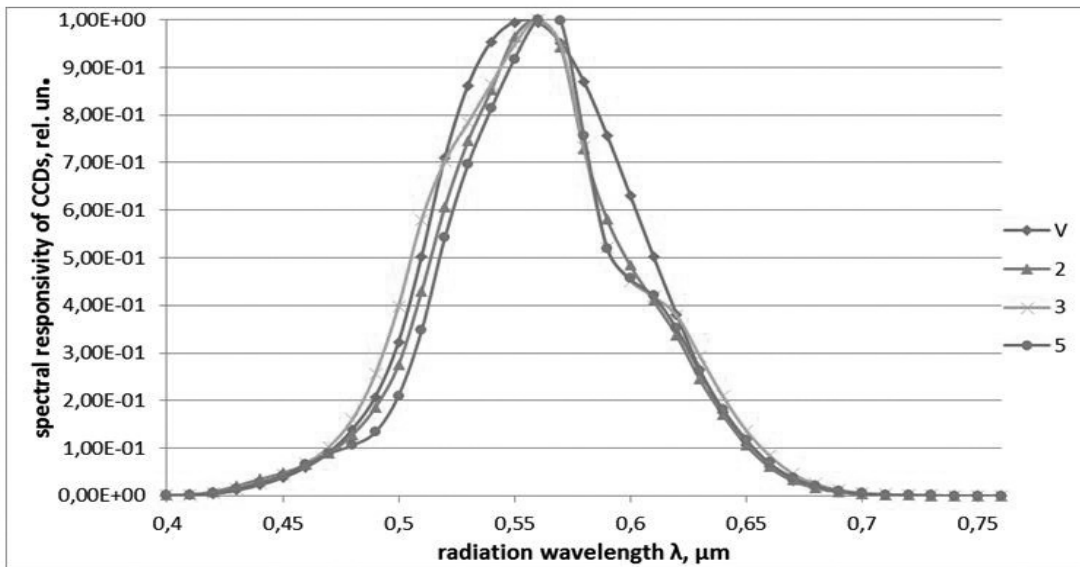


Рис. 4. Спектральні характеристики фотокамер Sony ICX285AQ (крива 2), Olympus SC50 (крива 3) і Sony IMX214 (крива 5) при застосуванні корегуючого світлофільтра і функція спектральної світлової ефективності для фотопічного зору (V)

Результати порівняння відкорегованих спектральних чутливостей (рис. 5) досліджених цифрових камер з інтегральною кривою спектральної чутливості ока $V(\lambda)$ надані шляхом подання їх розрахункового порівняння у вигляді гістограми для найбільш типових світлодіодних джерел світла зі значеннями корельованої колірної температури в діапазоні від 2800 до 5500 К [11]. Аналіз результатів досліджень показав, що при застосуванні комбінованого корегуючого фільтра похибку вимірювань можна зменшити до значення 5%, що свідчить про конкурентоздатність запропонованого фотометра для проведення масових вимірювань характеристик світлодіодів.

Для розрахунку характеристик фокону було прийнято, що центр приймальної поверхні фокону $O(q, p)$ є початковою точкою з координатами $(0; 0)$, а значення координат q, p – в інтервалі $-P \leq q \leq P$ і $P_{\min}(q) \leq p \leq P_{\max}(q)$. При вирішенні питання розміщення світловодів було віддано перевагу рівномірному розподілу порівняно з нерівномірним як більш універсальному для забезпечення прийнятної точності вимірювання для будь-якого розподілу випромінювання. Розподіл сили світла було визначено для рівномірного розташування світловодів із діаметром 2,5 мм по приймальній поверхні фокону та для фотометричної відстані від джерела випромінювання до приймача R . Тоді сумарний світловий потік, що реєструється приймачем, можна визначити за виразом [9]:

$$\Phi_{\Sigma} = \sum_{q=-P}^P \sum_{p=P_{\min}(q)}^{P_{\max}(q)} \Phi_{q,p} = \frac{S_1}{R^2} \sum_{q=-P}^P \sum_{p=P_{\min}(q)}^{P_{\max}(q)} I_{q,p} \cos^3 \theta_{q,p}, \quad (2)$$

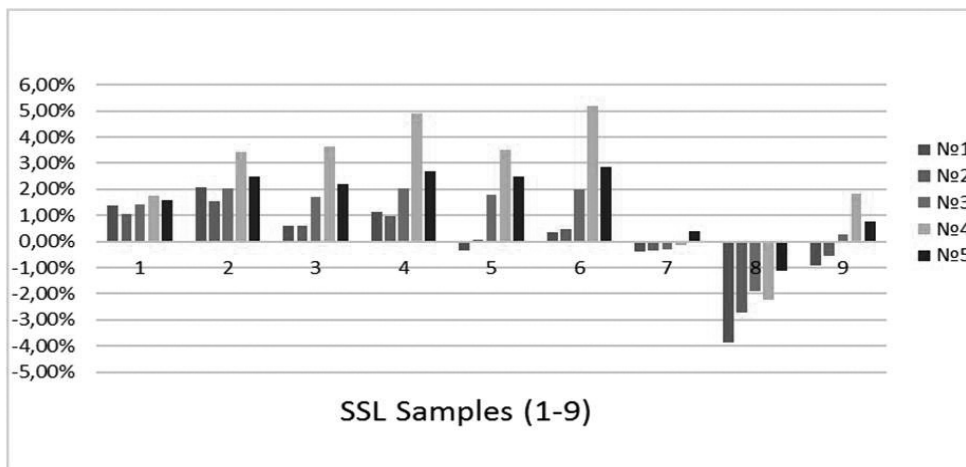


Рис. 5. Гістограма величини $F(S_N(\lambda))$ при використанні світлодіодних джерел [11] для реєстрації спектральних характеристик камер при застосуванні корегуючого фільтра № 1 – Kodak Z981; № 2 – Sony ICX285AQ; № 3 – Olympus SC50; № 4 – NIKON D700; № 5 – Sony IMX214

де $\Phi_{q,p}$ – світловий потік, що падає на елемент приймача з координатами (q, p) ; $I_{q,p}$ – сила світла досліджуваного джерела світла або світильника в певному напрямку, що випромінюється в межах тілесного кута $\omega_{q,p}$; S_1 – ефективна площа елемента приймача; R – відстань фотометрування; $\theta_{q,p}$ – конусний кут, у межах якого випромінювання джерела світла потрапляє на поверхню приймача з координатами q, p .

Калібрування фотометра виконано із застосуванням джерела випромінювання з постійною в межах кута θ_{\max} силою світла I_0 з рівномірною КСС $I_\alpha = I_{\text{const}} = I_0$ за стандартною методикою. Значення сили світла для напрямів із заданим кутовим кроком досліджуваного випромінювача розраховуються на комп'ютері.

Таким чином, запропонована конструкція фотометра забезпечує можливість вимірювання світлотехнічних характеристик випромінювання, що надходить під різними кутами, і дозволяє використовувати фотометр у режимі гоніофотометра, не застосовуючи при цьому пристрої обертання

джерела світла, а крім того, одночасно вимірювати повний світловий потік.

4. Висновки

1. Досліджено матричні приймачі цифрових фотокамер для застосування в якості фотоприймальних матриць.

2. Визначено відхилення спектральних характеристик чутливості матричних фотоприймачів від стандартної кривої для фотопічного зору, розраховано параметри оптичних фільтрів для корекції спектральної чутливості фотоприймачів, проведено калібрування дослідного зразка та оцінено похибки при вимірюваннях дослідним зразком.

3. Показано, що фотометр на основі стандартних цифрових камер із використанням волоконнооптичного фокону та корегуючого світлофільтра може забезпечувати похибку вимірювання просторового розподілу випромінювання джерел спрямованого світла на рівні 5%, що дозволяє використовувати такі фотометри для експрес-контролю такої продукції замість гоніофотометрів при масовому виробництві та в умовах експлуатації.

Фотометр для контроля светотехнических параметров светодиодов

П.И. Неижмаков¹, Е.Н. Ляшенко², Е.П. Тимофеев¹, А.Д. Купко¹,
А.С. Литвиненко², Ю.О. Васильева²

¹ Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина
pavel.neyehzhtakov@metrology.kharkov.ua

² Харьковский национальный университет городского хозяйства, ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харьков, Украина
happy.light9574@gmail.com

Аннотация

Для проведения массового контроля характеристик светодиодных светильников в соответствии с требованиями стандарта в условиях производства и эксплуатации нужны методики и технические средства с достаточно высокой производительностью, низкой стоимостью измерений и достаточной точностью. Целью работы является решение актуальной проблемы – повышение точности измерения световых параметров светодиодов с концентрированным пространственным распределением силы света и светового потока для такого типа фотометров. Показано, что фотометр на основе стандартных цифровых камер с использованием волоконнооптического фоконя и корректирующего светофильтра может обеспечивать достаточную точность измерения пространственного распределения излучения источников направленного света. Характеристики и легкость управления современными цифровыми фотокамерами позволяют применять их в качестве фотоприемной матрицы, что упрощает конструкцию фотометра. Погрешность измерения спектральных характеристик фотометром была уменьшена коррекцией спектральной характеристики чувствительности цифровой фотокамеры до значений менее 5% за счет введения корректирующего светофильтра.

Ключевые слова: фотометрическое тело; фотометр; световой поток; пространственное распределение излучения; фокон.

Photometer for controlling the lighting parameters of LEDs

P. Nevezhnikov¹, O. Liashenko², Ye. Tymofeiev¹, O. Kupko¹, A. Litvinenko², Yu. Vasyliieva²

¹ National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
pavel.nevezhnikov@metrology.kharkov.ua

² O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine
happy.light9574@gmail.com

Abstract

According to DSTU CIE 127:2017, control of characteristics of light-emitting diodes can be carried out in the laboratories of industrial or operational institutions with the use of working standards of radiation sources checked in the certified laboratories. The advantages of mass control of photometric characteristics of radiation sources are the following: higher speed and lower cost at a slightly lower but acceptable accuracy. In order to carry out mass control that meets the above requirements, in terms of production and operation, methods and technical means with a fairly high productivity, low cost of measurements and sufficient accuracy are required. The aim of the work is to solve an urgent problem – to increase the accuracy of measuring the light parameters of LEDs with a concentrated spatial distribution of luminous intensity and luminous flux for photometers without the use of rotating devices. It is shown that a photometer based on standard digital cameras, using a fiber optic focus and a correcting light filter, can provide sufficient accuracy in measuring the spatial distribution of radiation from directional light sources. Due to the use of a focon and matrix discrete photodetectors located in a plane perpendicular to the axial direction of radiation, it is possible to obtain an angular spatial distribution of light source radiation without rotating devices, which in turn reduces the cost of testing. The characteristics and ease of operation of modern digital cameras have allowed their use as a photodetector array, which simplifies the design of the photometer. The error of measuring the characteristics of sources with concentrated types of curves of light using a photometer in comparison with goniophotometric methods does not exceed 5%, which allows the use of such photometers for rapid control of such products in mass production and operating conditions.

Keywords: photometric body; photometer; luminous flux; spatial distribution of radiation; focon.

Список літератури

1. ДСТУ СІЕ 127:2017 (СІЕ 127:2007, ІДТ). Вимірювання світловипромінювальних діодів. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2019.
2. Берген А. Практический метод сравнения пространственных распределений силы света. *Светотехника*. 2012. № 3. С. 52–57.
3. Андрійчук В., Осадца Я. Вимірювання світлотехнічних характеристик світних об'єктів за допомогою фотокамер з матричними оптичними перетворювачами. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*. 2011. Т. 16. № 1. С. 126–132.
4. Назаренко Л.А., Сорокін В.М. Основи радіометрії та фотометрії: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. 352 с.
5. Никоненко С.В., Луценко Е.В., Зубелевич В.З., Ржеуцкий Н.В., Ждановский В.А. и соавт. Установка для измерения пространственного распределения излучения лазерных диодов и силы света светодиодов и светодиодных осветителей. Минск: *Доклады БГУИР*. 2011. № 4(58). С. 101–106.
6. Неєжмаков П., Тимофєєв Є., Ляшенко О. Фотометр для вимірювання характеристик джерел світла зі спрямованим світлорозподілом. *Метрологія та прилади*. 2018. № 4. С. 27–32.
7. Ляшенко О.М. Розробка і дослідження апаратури для автоматизації вимірювань світлотехнічних характеристик. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2018. № 1(51). С. 27–31.
8. Фотометр: пат. 130004 Україна. МПК G01J 1/04, U201804781; заявл. 02.05.2018; опубл. 26.11.18, Бюл. № 22.
9. ДСТУ ISO/CIE 19476:2018. Вимоги до характеристик приладів для вимірювання освітленості та яскравості. Київ, 2020. 54 с.
10. Nevezhnikov P.I., Lyashenko O.M., Tymofeiev E.P., Kupko O.D., Litvinenko A.S. Increasing the measurement accuracy of wide-aperture photometer based on digital camera. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2019. Т. 11. № 3. С. 03029-1–03029-6. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(3\).03029](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03029)
11. Добровольський Ю.Г., Калустова Д.О., Купко О.Д., Неєжмаков П.І., Рибалочка А.В., Шабашкевич Б.Г., Юр'єв В.Г. Спектральні

похибки серійних вітчизняних люксометрів при вимірюванні випромінювання світлодіодних джерел. *Український метрологічний журнал*. 2017. № 2. С. 19–26. doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109655

References

1. DSTU CIE 127:2017 (CIE 127:2007, IDT). Measurement of LEDs. Kyiv, 2019 (in Ukrainian).
2. Bergen A. Prakticheskiy metod sravneniya prostranstvennykh raspredeleniy sily sveta [A practical method for comparing the spatial distributions of light]. *Light & Engineering*, 2012, no. 3, pp. 52–57 (in Russian).
3. Andriychuk V., Osadtsa J. Vymiryuvannya svitlotekhnichnykh kharakterystyk svitnykh ob'ektiv za dopomohoyu fotokamer z matrychnymy optychnymy peretvoryuvachamy [Measurement of lighting characteristics of luminous objects using cameras with matrix optical transducers]. *Scientific journal of TNTU*, 2011, vol. 16(1), pp. 126–132 (in Ukrainian).
4. Nazarenko L.A., Sorokin V.M. Osnovy radiometriyi ta fotometriyi: monohrafiya [Fundamentals of radiometry and photometry: monograph]. Kharkiv, KhNUUE named O.M. Beketov, 2014. 352 p. (in Ukrainian).
5. Nikonenko S.V., Lutsenko E.V., Zubelevich V.Z., Rzhetsky N.V., Zhdanovsky V.A. et al. Ustanovka dlya izmereniya prostranstvennogo raspredeleniya izlucheniya lazernykh diodov i sily sveta svetodiodov i svetodiodnykh osvetiteley [Installation for measuring the spatial distribution of the heating of laser diodes and the light intensity of LEDs and LED luminaires]. Minsk, *BGUIR reports*, 2011, no. 4(58), pp. 101–106 (in Russian).
6. Neyezhnikov P., Tymofeiev Ye., Liashenko O. Fotometr dlya vymiryuvannya kharakterystyk dzherel svitla z sryamovanyim svitlorozpodilom [Photometer for measuring the characteristics of light sources with directional light distribution]. *Metrology and Instruments*, 2018, no. 4. pp. 27–32 (in Ukrainian).
7. Liashenko O. Rozrobka i doslidzhennya aparatury dlya avtomatyzatsiyi vymiryuvan svitlotekhnichnykh kharakterystyk [Development and research of the apparatus for automation of measurements of light-technical characteristics]. *Lighting Engineering and Power Engineering*, 2018, no. 1(51), pp. 27–31 (in Ukrainian).
8. Pat. 130004 UA, IPC G01J 1/04. Fotometr [Photometer]. Litvinenko A.S., Liashenko O.M., Tymofeiev Ye.P. Publ. 26.11.2018 (in Ukrainian).
9. DSTU ISO/CIE 19476:2018. Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters. Kyiv, 2020. 54 p. (in Ukrainian).
10. Neyezhnikov P.I., Lyashenko O.M., Tymofeiev E.P., Kupko O.D., Litvinenko A.S. Increasing the measurement accuracy of wide-aperture photometer based on digital camera. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2019, vol. 11, no. 3, 03029(6 pp.). doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(3\).03029](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03029)
11. Dobrovolskyi Yu.H., Kalustova D.O., Kupko O.D., Neyezhnikov P.I. et al. Spektralni pokhybky seriynykh vitchyznyanykh lyuksmetriv pry vymiryuvanni vprominyuvannya svitlodiodnykh dzherel [Spectral errors of serial domestic light meters when measuring the radiation of LED sources]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2017, no. 2, pp. 19–26 (in Ukrainian). doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109655