

¹Б.Г. Шабашкевич, ¹Ю.Г. Добровольський, ¹В.Г. Юр'єв,
²П.І. Неєжмаков, ³В.М. Сорокін, ³Д.В. Пекур

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ФОТОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯСКРАВСТІ ТА ОСВІТЛЕНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Розроблено спеціалізовану оптичну систему для фотометра Екотензор-03 та побудовано на його основі концепцію методики прямих вимірювань розподілу яскравості дорожнього покриття, створеної, в тому числі, світлодіодними джерелами світла. Спеціалізований фотометр (яскравомір), з відліком показань безпосередньо в одиницях яскравості, був створений на основі фотометра Екотензор-03 українського виробництва, дообладнаного відповідною оптичною системою та механічними пристроями. При цьому, замість вимірювання яскравості на відстані 160 м при куті поля зору приймача 2, кутові мінути по вертикалі та 20 по горизонталі, пропонується наблизити фотометр до освітлюваних площин, яскравість яких визначається, на відстань, при якій усувається протиріччя, пов'язане з вимогами ДСТУ та знімається проблема малого рівня сигналу, який генерує фотометрична головка на великій відстані від об'єкта вимірювання. Враховуючи наднизькі рівні яскравості під час вимірювання відповідно до вимог діючих ДСТУ та ДБН, що складає перешкоди навіть при проведенні вимірювань у контрольованих лабораторних умовах провідних дослідних центрів, запропонований метод має усі необхідні переваги (висока точність вимірювання, простота реалізації в позалабораторних (реальних) умовах, адаптивність моделі вимірювання до вимог нормативних документів). Діапазон вимірювання яскравості фотометра зі спеціалізованою оптичною системою складає від 0,1 Кд/м² до 10⁵ Кд/м². Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості, створеної довільним джерелом, не перевищують $\pm 5\%$. Невизначеність калібрування -1,5%. Метрологічне забезпечення приладу реалізоване з простежуваністю до національних еталонів ННЦ «Інститут метрології», зокрема, до первинного еталона одиниці сили світла.

Ключові слова: фотометрія, дорожнє покриття, світлодіод, яскравість, освітленість, стандарти вимірювання яскравості.

1. ВСТУП

Безпека на дорогах є важливою проблемою у світі. Одним із найважливіших факторів, що впливають на безпеку руху, є освітленість доріг в нічний час. Тому загальним висновком Міжнародної комісії із освітлення (МКО) є необхідність правильного встановлення кількості освітлювальних систем та якісного освітлення, а також використання їх з максимальною ефективністю для комфорту водіїв.

В цьому сенсі завдання метрологічних служб полягає у забезпеченні контролю нормованих показників освітлення доріг [1] та контролю засобів вимірювальної техніки для вимірювання цих показників.

Ця робота присвячена висвітленню результатів досліджень авторів із створення засобу вимірювальної техніки для контролю яскравості дорожнього покриття та метрологічного забезпечення розробленого приладу.

2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЯСКРАВСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОМЕТРА

Питання створення засобу вимірювальної техніки для контролю яскравості дорожнього покриття постало в Україні у зв'язку із декількома причинами. Активне впровадження світлодіодних джерел світла в Україні для освітлення дорожнього покриття поставили питання контролю його якості. Ця проблема була висвітлена під час VI-ої Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи” у лютому 2018 року. У 2019 році вийшла у світ нова редакція ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»[1], яка підтвердила вимоги до вимірювання

© Б.Г. Шабашкевич, Ю.Г. Добровольський, В.Г. Юр'єв,
П.І. Неєжмаков, В.М. Сорокін, Д.В. Пекур, 2022

яскравості дорожнього покриття і підсилила актуальність питання контролю цієї величини. Актуальність цієї проблеми підтвердив і II-й Міжнародний господарський форум «Smart city & екосистема», який відбувся у лютому 2019 року у місті Яремче, де було показано, що фотометр Екотензор-03 Науково - виробничої фірми «Тензор» може бути застосований для контролю світлового середовища на відповідність ДБН В.2.5-28:2018, а також після доопрацювання, і для контролю яскравості дорожнього покриття [2]. Після обговорення цієї проблеми із фахівцями на VII-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми світлотехніки» в рамках міжнародного світлотехнічного форуму «Light forum'2019» у травні 2019 року у місті Харкові були викладені у концептуальній формі основні засади методичного характеру щодо розробки засобу вимірювальної техніки для контролю яскравості дорожнього покриття [3].

Вирішення проблеми створення засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) для контролю яскравості дорожнього покриття залишало відкритим питання метрологічного забезпечення новоствореного ЗВТ в Україні. Ця проблема була організаційно обговорена у вересні 2019 року на конференції LED Progress 2019 у місті Києві [4], де ННЦ «Інститут метрології» показав принципову можливість метрологічного забезпечення вимірювача яскравості дорожнього покриття на базі існуючої еталонної бази.

В результаті спільної роботи, наприкінці 2019 року, НВФ «Тензор» на замовлення Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова виконала НДР «Розроблення та виготовлення макетного зразка спеціалізованого фотометра для вимірювання розподілу яскравості дорожнього покриття».

Методичні вимоги до вимірювання яскравості освітлення доріг сформульовані у [1,5,6]. Відповідно до діючих ДСТУ існує два методи вимірювання яскравості дорожнього покриття. Зокрема, прямий метод, який базується на використанні спеціальних яскравомірів з відліком показань безпосередньо в одиницях яскравості. Покази яскравоміра усереднюються в межах кута зору, що визначається фокусною відстанню об'єктива і розміром використовуваної на фотоприймачі діафрагми. При детальному визначенні розподілу яскравості по полю зору використовуються яскравоміри на основі ПЗС-матриць з комп'ютерною обробкою результатів вимірювань. Використання яскравомірів на ПЗС-матрицях дозволяє поліпшити детальність зображення в 100-1000 разів і забезпечити вимірювання яскравості окремих елементів поверхні досліджуваного об'єкта.

Як відомо [6], стандарт пропонує метод *прямого* вимірювання середньої яскравості робочої поверхні за допомогою фотоелектричного яскравоміра, каліброваного в одиницях яскравості, або *опосередкований* метод вимірювання середньої яскравості робочої поверхні, на основі вимірювання яскравості окремих елементарних площадок з наступним усередненням результатів вимірювання. Реалізації вказаних методів потребують вибору засобів вимірювання з переліку існуючих фотометрів, або розробки нових. Для цього потрібні чіткі вимоги щодо вимірюваних фотометричних параметрів дорожнього покриття та умов їхнього вимірювання. Наприклад, у вказаному стандарті [6] приводяться вимоги до яскравості як до середнього значення, з приведенням конкретної її величини. Як зазначалося, світловий потік, що створюється системою освітлення, не повинен бути низьким, але не повинен бути і надмірним, тобто освітлення на проїзній частині не повинно бути сильно яскравим, інакше світловий потік буде сліпити водіїв. Хоча в будівельних нормах [5] вказується відношення мінімальної яскравості покриттів до середнього значення та відношення мінімальної яскравості покриття до максимальної, проте є потреба в проведенні досліджень умов комфортності для водіїв при освітленні доріг та встановлення в нормативних документах не величини, а *діапазону* значень яскравостей для забезпечення цих умов, що може представляти окрему проблему.

Не менш важливо вирішити питання встановлення критерію комфортності та безпеки руху. Оскільки основною ціллю освітлення дороги є створення безпеки руху в нічний час, то

виникає питання про вибір головного контрольного параметра: яскравості, яку створюють в сукупності всі джерела, що попадають в поле зору водія; яскравості дорожнього покриття, яку створює тільки система освітлення дороги; контрастності, визначеної на основі обох видів яскравості.

До цього ж типу проблем можна віднести зменшення впливу сторонніх (фонових) світлових потоків, які не відносяться до освітлювальних систем проїзної частини дороги. Це питання не є простим, але можна щонайменше встановити допустимий рівень таких фонових світлових потоків та обмежити максимальну яскравість, наприклад, яскравість рекламних світлових щитів, світлових вивісок, вітрин тощо.

Для виконання вимірювань параметрів дорожнього покриття визначимо деякі фотометричні величини.

Згідно із стандартом [6], при прямих вимірах яскравості дорожнього покриття яскравомір повинен мати поле зору не більше двох кутових мінут ($2'$) у вертикальній площині і 20 кутових мінут ($20'$) в горизонтальній площині; відстань яскравоміра від найближчої і найдалшої точок контрольної ділянки повинна бути 60 м і 160 м. Окрім цього, центр об'єктива яскравоміра повинен бути на висоті 1,5 м від поверхні дорожнього покриття з кутом нахилу оптичної осі яскравоміра до дорожнього полотна (як рекомендація), рівним $\angle\alpha = 1^\circ$.

Виходячи з цих вимог, нами проведено розрахунки положення точки перетину оптичної осі яскравоміра з площиною дорожнього покриття; розмірів поля зору; значення фотометричних величин.

На рис. 1 наведено схему перетину оптичної осі яскравоміра O_1B з площиною дорожнього покриття OC .

З висоти $h = 1.5$ м і кути нахилу яскравоміра $\angle DO_1B = \angle\alpha = 1^\circ$ оптична вісь

$$L = \frac{h}{\operatorname{tg}\angle\alpha} = \frac{1.5}{0.0174} = 86\text{ м}$$

яскравоміра буде перетинати дорогу на відстані

Якщо дотриматися вимог щодо поля зору в кутових одиницях - не більше двох кутових мінут ($2'$) у вертикальній площині і 20 кутових мінут ($20'$) в горизонтальній площині, то отримаємо на відстані 86 м поздовжні та поперечні розміри видимої площадки дороги відповідно ($a = 3$ м) та ($b = 0.498$ м). Згідно з [7], освітлювальні системи повинні створювати освітленість дороги із забезпеченням певних рівнів яскравості. Мінімальна з цих рівнів яскравість повинна бути не меншою за $0,4$ кд·м⁻². Таким чином, освітлювана дорога площею $A_{пл} = 3 \cdot 0,498 = 1,5$ м² в напрямку водія (фотометра) повинна відбивати потік із силою світла $I_{дороги} = 0,6$ кд. Таке джерело на відстані $L = 86$ м створює освітленість в площині вхідного вікна фотометра $E_{86\text{м}} = 8,1 \cdot 10^{-5}$ лк.

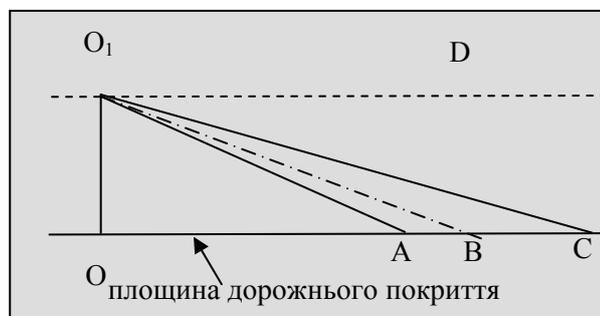


Рис. 1. Схема перетину оптичної осі яскравоміра O_1B з площиною дорожнього покриття OC .

При дотриманні умови стандарту по відстані - відстань яскравоміра від найближчої і найдалшої точок контрольної ділянки повинна бути 60 м і 160 м [6], отримуємо кути нахилу оптичної осі яскравоміра до дорожнього полотна (з висоти $h = 1.5$ м) рівними 1.432° та 0.537° відповідно. Провівши розрахунки, отримуємо освітленість в площині вхідного вікна фотометра $E_{60m} = 5,4 \cdot 10^{-5}$ лк та $E_{160m} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ лк.

З врахуванням того, що кут поля зору обмежений - не більше двох і 20 кутових мінут, це надто малі рівні освітленості, щоб при дотриманні вимог стандарту можна було виконати вимірювання - методом *прямого* вимірювання величини яскравості $0,4 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$.

Таким чином, виконання вимог ДСТУ у спеціалізованому яскравомірі, особливо щодо кута поля зору приладу, є невизначеним, оскільки теоретичні оцінки унеможливають це.

На сьогодні використовують декілька методик вимірювання середньої яскравості робочої поверхні в умовах, які відрізняються від приведених в стандарті. Розглянемо та визначимо їхні переваги і недоліки.

Для метрології є недостатньою вимога щодо вимірювання яскравості за умов: «Дорожнє покриття контрольної ділянки повинно бути сухим, без плям, калюж і т.п.» [2]. Також не зовсім конкретна вимога до стану покриття – «Вимірювана ділянка дороги повинна бути добре вкатоною». Напевно, ця вимога повинна базуватися не на довільному терміні «Добре вкатоною», а на технічному, із заданими параметрами.

Можна розглянути три основні методики вимірювання яскравості дорожнього покриття:

1. Проведення вимірювань яскравості покриття в лабораторних умовах [8], попередньо вирізавши з дороги ділянку такого покриття.
2. Методика, описана у патенті [9], на основі використання еталонного зразка, з покриттям, ідентичним за типом покриття вимірюваної ділянки дороги. Такий еталон встановлюється на каркасі автомобіля або на причепі. Фотометр-яскравомір кріпиться з дотриманням вимог стандарту і вимірюване поле яскравоміра повністю вписується в площадку верхньої поверхні еталонного зразка. Еталон підвозиться на місце вимірюваної ділянки дороги і проводяться вимірювання. Вимірювання можуть проводитися в русі вздовж дороги з комп'ютерною обробкою даних.

Методика визначення яскравості за фотографією [10], на якій об'єкти зображені не в реальних кольорах, а в кольорах, які відповідають певним рівням яскравості. Виділивши на фото вимірювану ділянку дороги, порівнюють її колір зі шкалою відповідності колір-яскравість, яка розміщена у вікні фотографії.

Переваги та недоліки розглянутих методик показані в таблиці 1.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ЯСКРАВІСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Спеціалізований фотометр (яскравомір), з відліком показань безпосередньо в одиницях яскравості, може бути створений на основі фотометра Екотензор-03, дообладнаного відповідною оптичною системою та механічними пристроями [3,4]. При цьому, замість вимірювання яскравості на відстані 160 м при куті поля зору приймача 2, кутові міноти по вертикалі та 20 по горизонталі, пропонується наблизити фотометр до освітлюваних площин, яскравість яких визначається, на відстань, при якій усувається протиріччя, пов'язане з вимогами ДСТУ.

Можливим варіантом реалізації вимірювання є визначення яскравості дорожнього покриття методом масштабування (рис. 2), наблизивши фотометричну головку (ФМГ) до об'єкта вимірювання на відстань у 100 разів меншу, ніж вимагає ДСТУ, врахувавши це при вимірюваннях. Таким чином, знімається проблема малого рівня сигналу, який генерує ФМГ на великій відстані від об'єкта вимірювання.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики методів вимірювання яскравості дорожнього покриття

№ з/п	Переваги	Недоліки
1.	<ul style="list-style-type: none"> - виключається вплив погодних умов на результати вимірювань; - немає потреби перекривати рух транспорту впродовж проведення вимірювань; - вимірювання можна проводити в денний час доби. 	<ul style="list-style-type: none"> - громіздкість процесу підготовки до вимірювань; - складність доставки зразка в лабораторію, не пошкодивши його; - вимірювання будуть проведені тільки невеликої частини дороги; - необ'єктивність результатів вимірювань (лабораторні освітлювальні системи і системи освітлення дороги можуть відрізнятися параметрами); - необхідність відновлювати ушкоджену частину дороги.
2.	<ul style="list-style-type: none"> - еталон за будь-яких умов зберігається сухим, чистим, однорідним і накатаним (вимоги стандарту); - оперативність в проведенні вимірювань. 	<ul style="list-style-type: none"> - еталон знаходиться вище полотна дороги (на 0,6-0,8 м), що вносить похибку у вимірювання; - стан еталона (ідеальний стан) відрізняється від реального стану дороги, що спричиняє відмінність результатів; - при вимірюваннях визначається яскравість еталонного зразка, а отже, це перевірка не яскравості покриття дороги, а якості освітлювальної системи; - необхідність постійного контролю дотримання паралельності еталона до поверхні дороги.
3.	<ul style="list-style-type: none"> - використання у фотометрі звичайної оптики широкого застосування значно спрощує конструкцію; - відсутність потреби обмеження кутів поля зору фотометра, що дозволяє виконувати вимірювання яскравості покриття з низькими рівнями світлових потоків. 	<ul style="list-style-type: none"> - складність калібрування фотометра; - суб'єктивність у визначенні яскравості за шкалою відповідності колір-яскравість; - наявність в полі зору фотометра потоків фонових (сторонніх) джерел випромінювання (може погіршити метрологічні характеристики процесу вимірювань).

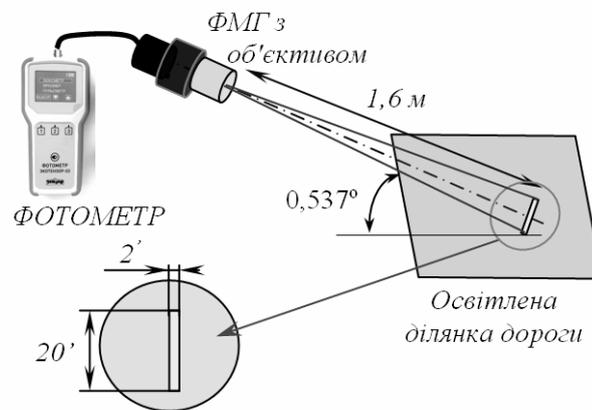


Рис. 2. Визначення яскравості дорожнього покриття методом масштабування.

Враховуючи наднизькі рівні яскравості під час вимірювання відповідно до вимог діючих ДСТУ та ДБН, що складає перешкоди навіть при проведенні вимірювань у контрольованих лабораторних умовах провідних дослідних центрів (схожі вимірювання виконуються у підземних полігонах BMW), запропонований метод має усі необхідні переваги (висока точність вимірювання, простота реалізації в позалабораторних (реальних) умовах, адаптивність моделі вимірювання до вимог нормативних документів).

З точки зору налагодження метрологічного забезпечення, запропонований варіант може бути реалізований з простежуваністю до національних еталонів ННЦ «Інститут метрології» (рис. 3 – 5).



Рис. 3. Національний первинний еталон одиниці сили світла.

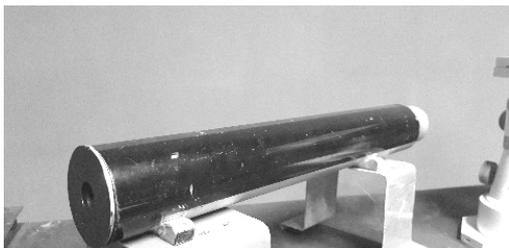


Рис. 4. Первинний приймач.



Рис. 5. Установка для калібрування яскравомірів.

Оскільки в Україні на сьогодні спеціалізованого первинного еталона одиниці яскравості не існує, то простежуваність вимірювань забезпечено до первинного еталона одиниці сили світла. Модель реалізації одиниці яскравості полягає у використанні декількох установок, одна з яких спеціалізована, для швидкого калібрування цифрових фотометрів ТЕС0693 та Екотензор-03 в режимі яскравомірів. Простежуваність забезпечується з використанням первинного фотометра, спроектованого для передавання одиниці яскравості між еталоном та установкою.

4. ОБРАННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЯСКРАВСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Аналіз раніше отриманих результатів показав, що мінімальні рівні фотосигналів, що генеруються при вимірюваннях яскравості дорожнього покриття на відповідність [1,6], вимагають здійснення низки заходів, що дозволять забезпечити такі вимірювання.

Зокрема, запропоновано визначати яскравість дорожнього покриття методом покрокового прямого вимірювання яскравості шляхом розташування фотометра на менших відстанях та менших висотах, пропорційно до вказаних у ДБН В.2.5-28:2018, ДСТУ Б В.2.2-30:2011, ДСТУ EN 13201-4: 2016 (EN 13201-4:2015, IDT), що відповідає методу масштабування (рис. 2). Таким чином, знімається проблема малого рівня сигналу, який генерує ФМГ на великій відстані до об'єкта вимірювання.

5. СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ФОТОМЕТР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЯСКРАВСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Для реалізації запропонованого методу вимірювання яскравості дорожнього покриття було створено спеціалізований фотометр. Оптична система приладу складається з ФМГ, об'єктива типу Юпітер 11, бленди з комплексу об'єктива, перехідного кільця між об'єктивом та фотометричною головкою, тубусу та діафрагми, що враховує вимоги ДСТУ [6]. Зовнішній вигляд складових частин приладу наведений на рис. 7. Зовнішній вигляд приладу у зібраному стані наведений на рис. 8.

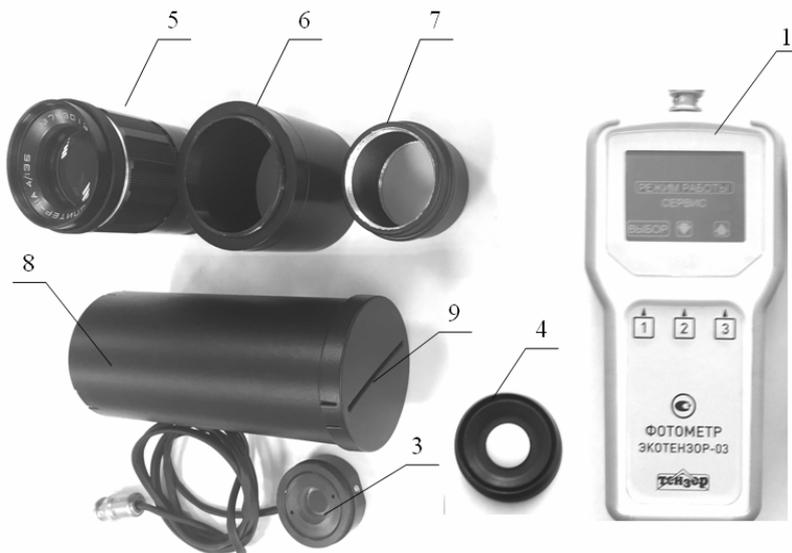


Рис. 7. Зовнішній вигляд складових частин спеціалізованого фотометра.

Прилад для вимірювання яскравості дорожнього полотна складається із вимірювального блока фотометра Екотензор-03 (1) з фотометричною головою (2) на основі фотодіода ФД-288, яка призначена для забезпечення вимірювання освітленості та низьких рівнів яскравості дорожнього покриття, у відповідності з [6]. При вимірюванні освітленості використовується косинусна насадка (4).

При вимірюванні яскравості ділянок дорожнього покриття використовується оптична система, яка складається з об'єктива типу Юпітер-11 (5), бленди з комплекту об'єктива (6) та перехідного кільця (7), яке з'єднує фотометричну головку (3) та об'єктив (5). Тубус (8) приєднується до бленди (6). Діафрагма (9) насаджується на тубус (8).



Рис. 8. Зовнішній вигляд спеціалізованого фотометра у зібраному стані.

6. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЯСКРАВОСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ, ВИКОНАНОГО СПЕЦІАЛІЗОВАНИМ ФОТОМЕТРОМ

Вимірювання здійснюються методом покрокового прямого вимірювання яскравості шляхом розташування фотометра на менших відстанях та менших висотах, пропорційно до вказаних у [1, 5, 6].

За результатами дослідження спеціалізованого фотометра для вимірювання розподілу яскравості дорожнього покриття встановлено, що створений макетний зразок має технічні характеристики, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Технічні характеристики спеціалізованого фотометра.

Параметри і характеристики	Значення параметра
Діапазон вимірювання освітленості від довільно розташованого протяжного (неточкового) джерела.	$10^{-1} - 2 \cdot 10^5$ Лк.
Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання освітленості від джерела типу А (δ_{EA}).	$\pm 2.8 \%$.
Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання освітленості (δ_E) від довільного джерела, окрім джерел типу А.	$\pm 4.5 \%$.
Діапазон вимірювання яскравості.	від $0,1 \text{ Кд/м}^2$ до 10^5 Кд/м^2
Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості від джерел типу А (δ_{LA}).	$\pm 3.1 \%$
Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості від довільного джерела, окрім джерел типу А (δ_L).	$\pm 5 \%$
Невизначеність калібрування.	1,5 %

Слід відмітити, що створений зразок спеціалізованого фотометра для вимірювання розподілу яскравості дорожнього покриття базується на сформованому на основі серійного фотометра Екотензор-03. Створений прилад може поставлятися як комплекс, що складається зі стандартного фотометра, придатного для вимірювання параметрів світлового середовища згідно з його настановою з експлуатації, а саме - для вимірювання освітленості, яскравості та коефіцієнта пульсації світла, а також із оптичною системою для вимірювання яскравості дорожнього покриття.

Під час виконання роботи проведено порівняння результатів вимірювання яскравості дорожнього покриття створеним приладом і на основі цифрової камери LMK Mobile Air, виробництва Techno Team Vision USA Inc (США) [11]. Згадана камера застосовується для отримання високоякісних яскравих зображень. Для оцінки яскравості зображення дорожнього покриття можна використовувати повний функціонал програмного забезпечення LMK LabSoft.

Як видно з [11], камера не є засобом вимірювальної техніки для прямих вимірювань яскравості. Вона призначена лише для оцінки яскравості шляхом непрямих вимірювань, а саме – спеціалізованої обробки даних, отриманих з камери у вигляді зображення дорожнього покриття у одиницях яскравості за допомогою відповідного програмного забезпечення. У таблиці 3 наведено технічні характеристики обох приладів та вимоги відповідних ДСТУ.

Таблиця 3. Порівняльна таблиця технічних характеристик цифрової камери LMK Mobile Air та розробленого фотометра, а також вимоги відповідних ДСТУ.

№ з/п	Параметри	Вимоги ДСТУ EN 13201-4:2016; ДСТУ EN 13201-2:2016 ДБН В.2.3-5-2001	Цифрова камера LMK Mobile Air	Розроблений фотометр
1.	Кут поля зору.	2' (V); 20' (H).	28°(H); 19°(V)	Відповідає ДСТУ
2.	Відстань яскравоміра від точки вимірювання, м.	60 м та 160 м	-	Відповідає ДСТУ.
3.	Мінімальне значення яскравості, виміряне методом прямого вимірювання, кд·м ⁻² .	0,15 за ДСТУ EN 13201-2:2016 0,4 за ДСТУ EN 13201-4:2016)	-	0,1
4.	Діапазон вимірювання яскравості, кд·м ⁻² .	-	-	0,1 - 10 ⁵
5.	Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості від джерел типу А, %.	-	-	± 3.1
6.	Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості від довільного джерела, в тому числі світлодіодного, окрім джерел типу А, %.	-	-	± 5
7.	Невизначеність калібрування, %.	-	2,5	1,5
8.	Обмеження застосування.	Усі джерела.	Не можна використовувати для вимірювання кольорових джерел світла (наприклад, світлодіодів).	Усі джерела.

Аналіз даних, наведених у таблиці 3, показує, що параметри створеного фотометра відповідають вимогам нормативної документації. Зокрема, методичним чином забезпечена вимога відстані яскравоміра від точки вимірювання, чого, за даними виробника [11], немає у аналога. Також у аналога не вказано, яке мінімальне значення яскравості може бути виміряне, хоча ДСТУ EN 13201-2:2016 вимагає вимірювати яскравість 0,15 кд·м⁻² на мокрих ділянках асфальту. Розроблений фотометр забезпечує вимірювання від 0,1 кд·м⁻², що цілком задовольняє вимоги стандарту. З метрологічних параметрів цифрової камери LMK Mobile Air розробник подає лише невизначеність калібрування, яка складає 2,5 %. У випадку створеного фотометра невизначеність калібрування складає 1,5 %.

Суттєвим недоліком цифрової камери LMK Mobile Air є обмеженість її застосування для вимірювання кольорових джерел світла (наприклад, світлодіодних). В той же час запропонований фотометр такого обмеження не має.

Також суттєвою перевагою створеного фотометра є можливість вимірювання у безпосередній близькості до об'єкта дослідження, що суттєво зменшує вплив фонового освітлення на результати вимірювання.

Таким чином, можна стверджувати, що в Україні вперше реалізована конструкція фотометра для прямого вимірювання яскравості дорожнього покриття. Конструкція відповідає вимогам державних та міжнародних стандартів. Також розроблено метрологічне забезпечення приладу, яке може бути реалізоване з простежуваністю до національних еталонів ННЦ «Інститут метрології», зокрема, до первинного еталона одиниці сили світла.

7. ВИСНОВКИ

1. Розроблено концепцію побудови методики вимірювання розподілу яскравості дорожнього покриття за допомогою спеціалізованого фотометра Екотензор-03, яка базується на покроковому, прямому вимірюванні, шляхом розташування фотометра на зменшених відстанях та зменшених висотах, пропорційно до вказаних у відповідних ДСТУ.

2. Вперше в Україні розроблено спеціалізований фотометр для вимірювання розподілу яскравості дорожнього покриття, діапазон вимірювання яскравості якого складає від $0,1 \text{ Кд/м}^2$ до 10^5 Кд/м^2 . Межі допустимої основної відносної похибки вимірювання яскравості від джерел типу А складають $\pm 3,1 \%$ від довільного джерела, окрім джерел типу А $\pm 5 \%$. Невизначеність калібрування $-1,5 \%$.

3. Метрологічне забезпечення приладу може бути реалізоване з простежуваністю до національних еталонів ННЦ «Інститут метрології», зокрема, до первинного еталона одиниці сили світла. Простежуваність забезпечується з використанням первинного фотометра, спроектованого для передавання одиниці яскравості між еталоном та установкою.

¹B.G. Shabashkevich, ¹Y.G. Dobrovolskyi, ¹V.G.Yuryev, ²P.I. Neezhmakov, ³V.M. Sorokin, ³D.V. Pekur

SPECIALIZED PHOTOMETER FOR MONITORING THE BRIGHTNESS AND ILLUMINATION OF THE ROAD SURFACE

A specialized optical system for the Ekotensor-03 photometer was developed and based on it, the concept of direct measurements of the distribution of the brightness of the road surface, created, among other things, by LED light sources, was built. The specialized photometer (brightness meter), with readings directly in brightness units, was created on the basis of the Ekotensor-03 photometer of Ukrainian production, equipped with the appropriate optical system and mechanical devices. At the same time, instead of measuring brightness at a distance of 160 m at an angle of the receiver's field of view of 2 arc minutes vertically and 20 horizontally, it is suggested to bring the photometer closer to the illuminated planes, the brightness of which is determined, at a distance that eliminates the contradiction associated with the requirements of the DSTU and the problem of a small signal level generated by the photometric head at a long distance from the measurement object is removed. Taking into account the ultra-low levels of brightness during measurement in accordance with the requirements of the current DSTU and DBN, which is an obstacle even when carrying out measurements in controlled laboratory conditions of leading research centers, the proposed method has all the necessary advantages (high measurement accuracy, ease of implementation in non-laboratory (real) conditions, adaptability of the measurement model to the requirements of regulatory documents). The brightness measurement range of the photometer with a specialized optical system is from 0.1 Кд/м^2 to 10^5 Кд/м^2 . The limits of the permissible main relative error of brightness measurement created by an arbitrary source do not exceed $\pm 5\%$. The uncertainty of calibration is 1.5%. The metrological support of the device is implemented with traceability to the national standards of the NSC "Institute of Metrology", in particular, to the primary standard of the unit of light power.

Keywords: photometry, road surface, LED, brightness, luminance, luminance measurement standard.

1. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28:2018. [чинний від 2019-03-01]. К.: Мінрегіонбуд. 2018. 157 с.
2. Шабашкевич Б.Г., Добровольський Ю.Г. «Фотометр Екотензор-03» для контролю світлового середовища на відповідність ДБН В.2.5-28:2018». II Міжнародний господарський форум «Smart city & екосистема» 05-10.02.2019, м. Яремче. С.17.
3. Шабашкевич Б.Г., Добровольський Ю.Г., Юр'єв В.Г. Контроль яскравості освітленого дорожнього полотна. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СВІТЛОТЕХНІКИ» в рамках міжнародного світлотехнічного форуму «LIGYT FORUM'2019». 14 – 16 травня 2019 р., Харків. ХНУМГ ім. Бекетова. С. 20 -21.
4. Шабашкевич Б.Г., Добровольський Ю.Г., Несжмаков П.І., Купко О.Д., Терещенко В.В. Метрологічне забезпечення вимірювання яскравості дорожнього полотна, освітленого світлодіодними джерелами. Конференція LED Progress 2019. 6-я международная конференция светодиодного освещения. Київ, 10 - 12 вересня 2019. С.36-37.
5. ДСТУ Б В.2.2-30:2011. Будинки і споруди. Методи вимірювання яскравості (ГОСТ 26824-86, MOD).
6. ДСТУ EN 13201-4: 2016 (EN 13201-4:2015, IDT). Вуличне освітлення. Частина 4. Методи вимірювання світлових характеристик.

7. ДБН В.2.3-5-2018. Вулиці та дороги населених пунктів.
8. Назаренко Л. А., Іоффе К. І. Штучне зовнішнє освітлення. Навчальний посібник. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2017.
9. Патент РФ 2286419. Способ измерения яркости дорожного покрытия. Боос В.Г., Зайцев С.Л., Коробко А.А., Пятигорский В.М. Електронний ресурс. Режим доступу:
<http://www.findpatent.ru/patent/228/2286419.html>.
10. Gibbons R. B., Meyer J., Edwards C.J., Development of a Mobile Measurement System for Roadway Lighting, NSTSCE, 2018.
11. LMK Mobile Air. Technical data. Електронний ресурс. Режим доступу:
https://www.technoteamvision.com/product_overview/photometer_colorimeter/products/lmk_mobile_air/index_eng.html.

¹ТОВ «Науково-виробнича фірма «Тензор»,
1є, вул. П.Орлика, 58026 Чернівці, Україна
E-mail: td_tenzor@ukr.net

Отримано 16.08.2022.

²Національний науковий центр «Інститут метрології»,
42, вул. Миросицька, 61002 Харків, Україна

³Інститут фізики напівпровідників
ім.В.С. Лашкарьова НАН України
41, просп. Науки,
03028 Київ, Україна