

doi:10.15199/48.2015.07.24

Matrycowe pomiary luminancji elektroluminescencyjnych źródeł światła i opraw oświetleniowych – stan techniki

Streszczenie. Matrycowane pomiary rozkładów luminancji cieszą się w drugiej dekadzie XXI wieku dużą popularnością. Niestety, korzystając z cyfrowych metod pomiaru, bardzo rzadko zwracamy uwagę na potencjalne źródła błędów pomiarowych, związane z technologią pomiarów i sprzętem pomiarowym. W artykule przedstawiona zostanie analiza potencjalnych błędów, związanych z wykorzystaniem matrycowych mierników luminancji do pomiarów parametrów niewielkich źródeł światła o skomplikowanym rozkładzie luminancji, jakimi są diody LED. Przeanalizowane zostaną również problemy występujące przy pomiarach rozkładów luminancji opraw oświetleniowych z odległości przekraczającej kilka metrów.

Abstract. Digital measurements of luminance distributions are enjoying in the second decade of the twenty-first century popular. Unfortunately, using digital methods of measurement, engineers very rarely pay attention to potential sources of measurement errors associated with the technology of measurement and equipment. In the paper will be presented an analysis of potential errors associated with the use of digital luminance meters for luminance distributions measuring of small light sources with a complex luminance distribution, which are LEDs. Will examine the problems encountered when measuring the luminance distribution of luminaires from a distance of more than a few meters. (**Digital luminance camera measurements of LED and luminaires - state of technology**).

Słowa kluczowe: technika świetlna, pomiary oświetlenia drogowego, matrycowy miernik luminancji, LED

Keywords: lighting technology, street lighting measurements, luminance measuring camera, LED

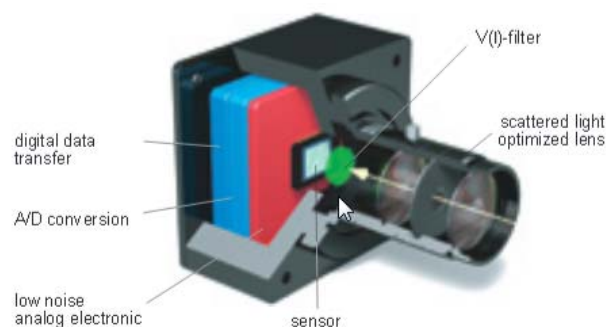
Wstęp

Początkowe lata XXI wieku to dynamiczny rozwój techniki cyfrowej w miernictwie i obliczeniach symulacyjnych związanych z techniką świetlną. Niesamowity wręcz postęp dotyczy wszystkich aspektów związanych z pomiarami luminancji, które z roku na rok stają się coraz łatwiejsze i precyzyjniejsze. Otrzymywane wyniki pomiarów luminancji mogą zawierać wartości średnie luminancji z ustalonego pola pomiarowego lub zestaw wyników, obejmujący miliony punktów jako wynik pomiarów realizowanych przez cyfrowe matrycowe mierniki luminancji. Badania prowadzone w Zakładzie Techniki Świetlnej na Politechnice Warszawskiej [1, 2] dowodzą, iż nie w każdym przypadku matrycowe cyfrowe pomiary luminancji pozwalają na otrzymanie wiarygodnych wyników. Przegląd literatury [5-11] pokazuje, iż wyniki pomiarów pozbawione są najczęściej jakiegokolwiek sceptycyzmu związanego z wiarygodnością wartości, uzyskiwanych w wyniku pomiarów z wykorzystaniem matrycowych mierników luminancji. Zasadniczo wszystkie zagadnienia techniczne są pomijane i sprowadzane do optymalnego wykorzystania istniejącej technologii, przy założeniu bezbłędności pomiarowej w każdym wariancie. Poszczególne pozycje literaturowe [5, 9, 10] stanowią wartościowe opracowania prowadzące do rozszerzenia zakresów pomiarowych używanych mierników i zasadniczo skupiają się wyłącznie na technice HDR (ang. High Dynamic Range). Związek wyników pomiarów w odniesieniu do aparatu wzroku człowieka jest jednak zbyt rzadko dostrzegany [14] i najczęściej nie jest wystarczająco eksponowany. Zdaniem autora artykułu, aby jednoznacznie rozwiązać problem wiarygodności wyników pomiarów, w pierwszej kolejności należy przybliżyć obecnie wykorzystywane technologie, przeprowadzając analizę możliwości pomiarowych, obliczeniowych i kalibracyjnych istniejących urządzeń.

Matrycowe mierniki luminancji - technologia

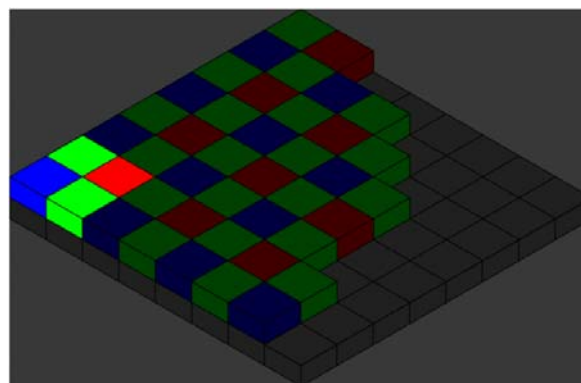
Konstrukcja matrycowego miernika luminancji oparta jest o technologię zbliżoną do cyfrowych aparatów fotograficznych. Urządzenie takie typowo składa się z kilku podstawowych elementów, takich jak obiektyw, cyfrowa matryca rejestrująca, elektronika i oprogramowanie dedykowane do przetworzenia zapisanej informacji na „obraz luminancyjny” (rys. 1).

Zgłębiając kluczowy temat niniejszej publikacji, należy zwrócić uwagę na technologię wykonania i przetwarzania informacji cyfrowych matryc rejestrujących, dominujących w rynkowych rozwiązaniach cyfrowych mierników luminancji. Podstawowy podział związany jest z fizyczną konstrukcją matryc cyfrowych.



Rys. 1. Schemat budowy matrycowego miernika luminancji [4]

Oprócz podziału związanego z technologiami CCD i CMOS, bogato opisanymi w literaturze, należy zwrócić szczególną uwagę na format rejestrowanej informacji. Pod tym względem można wyodrębnić matryce „monochromatyczne” oraz RGB – najczęściej wyposażone w matrycę z filtrem Bayera (rys. 2).



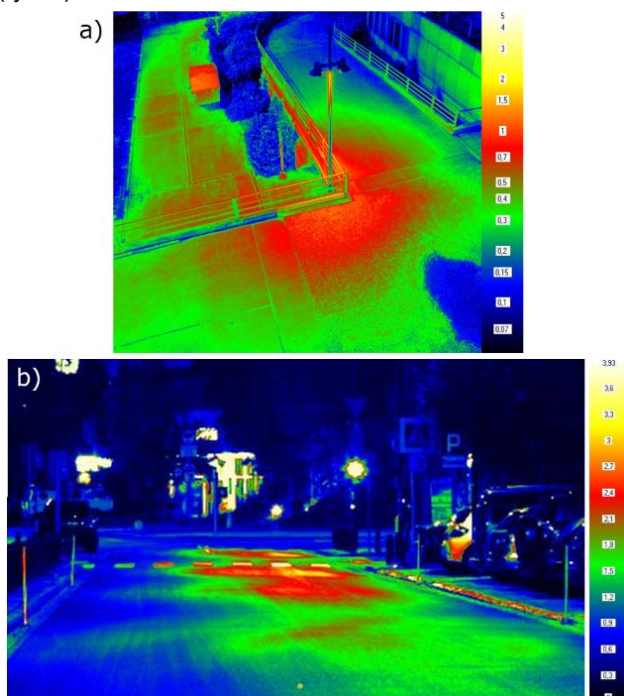
Rys. 2. Schemat struktury sub-komórki światłoczułej w schemacie filtru Bayera

Tabela 1. Przegląd typowych matryc stosowanych w miernikach luminancji na przykładzie produktów firmy LMK

Typ miernika	Matrycowy miernik luminancji				
Nazwa urządzenia	LMK 5/ LMK 5 Color	LMK 5/ LMK 5 Color	LMK 50 Color	LMK 50 Color	LMK mobile advanced
Oznaczenie matrycy	Sony-CCD [ICX 285 AL (2/3"); 14 Bit digital, progressive scan]	Sony-CCD [ICX 655 AL (2/3"); 14 Bit digital, progressive scan]	Kodak-CCD [KAI-11002M, square pixel; 12 Bit digital, progressive scan (1-3 fps)]	Kodak-CCD [KAI-16000M, square pixel; 12 Bit digital, progressive scan (1-3 fps)]	CMOS Canon APS-C
Typ matrycy	B/W	B/W	RGB Bayer (1B 1R 2G)	RGB Bayer (1B 1R 2G)	RGB Bayer (1B 1R 2G)
Rozdzielczość	1380 x 1030	2448 x 2050	4008 x 2672	4008 x 4008	5184 x 3456 (2592 x 1728 efektywnie)
Przekątna matrycy [mm]	11mm	11mm	43,3mm	43,3mm	27mm
Rozmiar komórki światłoczułej	6.45µm (H) x 6.45µm (V)	1.68µm (H) x 1.68µm (V)	9.0µm (H) x 9.0µm (V)	7.4µm (H) x 7.4µm (V)	b/d

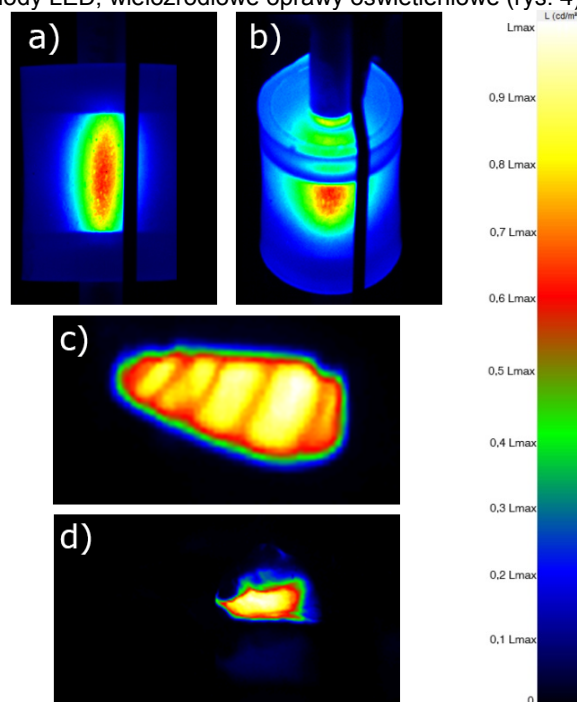
Zasada budowy matrycowych mierników luminancji przy wykorzystaniu obu technologii jest nieco inna. W przypadku matryc monochromatycznych, wartość luminancji jest proporcjonalna do „ilości światła” docierającego do każdej z komórek matrycy, po wcześniejszej kalibracji miernika. W przypadku matryc z filtrem Bayera, najczęściej rozdzielczość miernika luminancji nie jest bezpośrednio związana z fizyczną rozdzielczością matrycy, a wartość rejestrowanej luminancji to wartość uśredniona z co najmniej 4 pikseli (tab. 1), z których każdy przykryty jest filtrem barwnym R, G lub B.

Każda z technologii, po poprawnym wzorcowaniu jest w stanie zaoferować prawidłowe wyniki pomiarów rozkładów luminancji obiektów o stosunkowo niewielkim gradientie zmienności luminancji na całej rejestrowanej powierzchni. Takimi obiektami są np. powierzchnia drogi, powierzchnie ścian, sufitu i podłogi pomieszczeń, powierzchnia źródeł światła takich jak świetlówki liniowe i kompaktowe, etc (rys. 3).



Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów dla obiektów o niewielkim gradientie zmienności rozkładu luminancji

Problemy zaczynają się przy niewielkich obiektach, o skomplikowanym rozkładzie luminancji, którego gradient zmian jest dodatkowo bardzo duży. Przykładami takich obiektów są wyładowcze wysokoprężne źródła światła, diody LED, wieloźródłowe oprawy oświetleniowe (rys. 4).

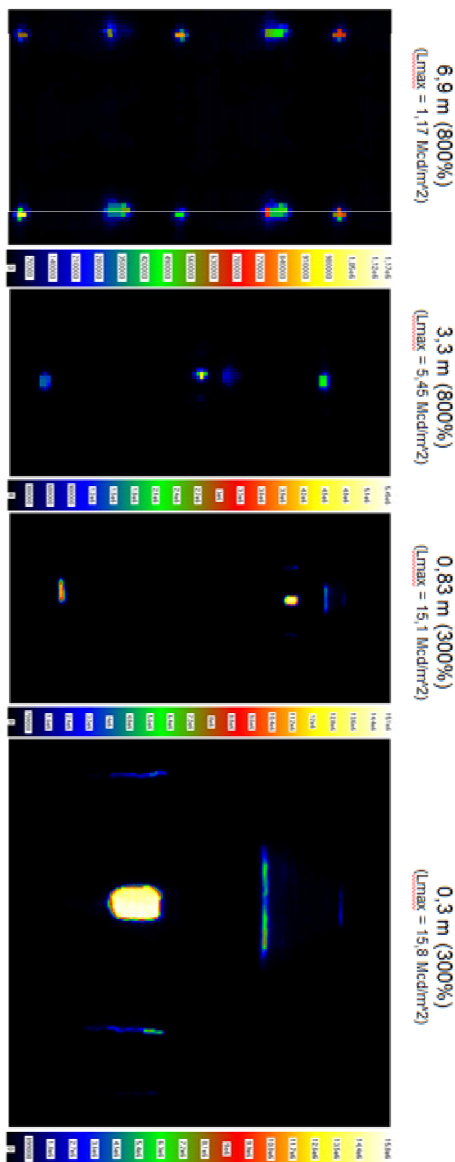


Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów dla obiektów o dużym gradientie zmienności rozkładu luminancji. a), b) jarznik lampy metalohalogenkowej – $L_{max} = 36 \cdot 10^6 \frac{cd}{m^2}$, c), d) powierzchnia chipu LED – c) $L_{max} = 10,4 \cdot 10^6 \frac{cd}{m^2}$, d) $L_{max} = 4,16 \cdot 10^6 \frac{cd}{m^2}$

Powód potencjalnych problemów pomiarowych może wyjaśnić szczegółowa analiza technologii konstrukcji urządzeń pomiarowych. Podstawowe parametry cyfrowych matryc rejestrujących zestawiono w tabeli 1.

Na podstawie analizy danych zawartych w tabeli 1, można wyciągnąć wnioski, iż urządzeniami obciążonymi potencjalnie najmniejszymi błędami są rejestratory wyposażone w matryce B/W, pozbawione filtrów barwnych przykrywających komórki światłoczułe. W takich urządzeniach pomiar obejmuje bezpośrednią rejestrację luminancji. Wymaga jedynie podstawowych korekt

linearyzujących cały zakres wykorzystywanego urządzenia oraz dopasowującego rejestrowane wielkości do krzywej czułości oka ludzkiego. W przypadku mierników tego typu, należy jedynie zadbać, aby rejestrowany obszar rzutowany był na wystarczająco dużą liczbę komórek światłoczułych matrycy urządzenia [13] (rys. 5).

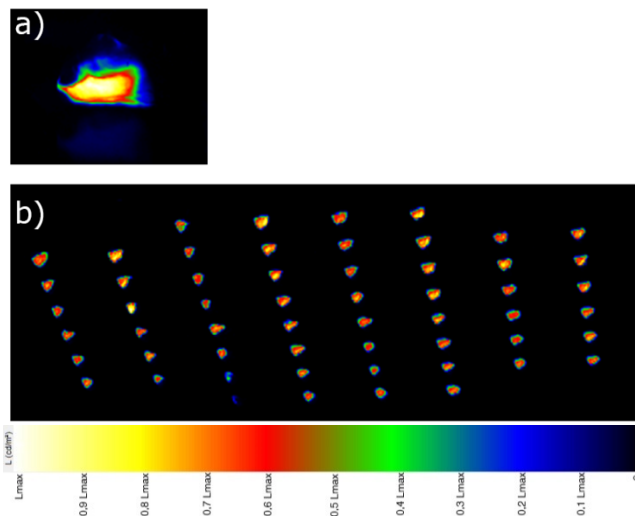


Rys. 5. Wyniki pomiarów rozkładu luminancji matrycy diodowej z różnych odległości pomiarowych przy wykorzystaniu miernika luminancji ze standardowym obiektywem o ogniskowej 50mm

W takim przypadku, każda komórka światłoczuła rejestruje średnią luminancję obszaru, który sama „widzi”/pokrywa. Należy zatem zastanowić się co w rzeczywistości rejestrują urządzenia, wykorzystujące do pomiarów matryce z filtrami barwnymi, umieszczonymi nad siatką komórek. Każda komórka przykryta jest innym filtrem z zestawu R(czerwony), G(zielony), B(niebieski). Finalna wartość luminancji wynika z przeliczenia składowych R, G, B, rejestrowanych przez od 4 do 16 sąsiednich punktów matrycy miernika. Oczywiście, analogicznie do wersji B/W przeprowadzane są odpowiednie korekty zarejestrowanego sygnału.

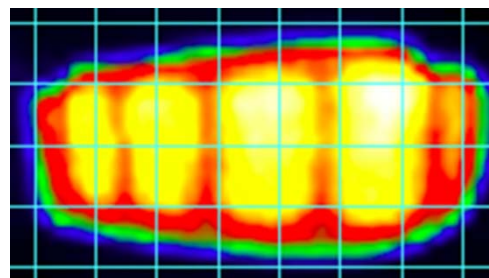
Skupiając się jednak na samym aspekcie rejestracji wartości luminancji, czy inaczej, ilości światła docierającego do matrycy miernika należy zdać sobie sprawę z jak szybkimi zmianami luminancji mamy do czynienia w

przypadku wysokoprężnych źródeł światła oraz diod LED. Powierzchnia chipu świecącego diody LED w skrajnym przypadku może nie przekraczać 1mm², dodatkowo mając rozkład luminancji zbliżony do przedstawionego na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkłady luminancji LED a) $L_{max} = 4,16 \cdot 10^6 \frac{cd}{m^2}$

Gdyby teraz została zbudowana wieloźródłowa oprawa oświetleniowa, składająca się z kilkudziesięciu takich diod, w prosty sposób można wyobrazić sobie, ile punktów matrycy miernika luminancji przypadnie na pojedynczy chip diody, gdybyśmy chcieli podczas jednego pomiaru zarejestrować rozkład luminancji całej oprawy oświetleniowej. Gdy na powierzchnię całej diody przypadnie ok. 30 punktów pomiarowych (rys. 7), każda komórka, przykryta barwnym filtrem będzie rejestrowała inną wartość luminancji, natomiast odpowiednie zestawy sąsiednich 4 lub 16 komórek, będą służyły do wyliczenia wartości luminancji rejestrowanej przez taki piksel „wypadkowy”.



Rys. 7. Przykładowy podział chipu diody LED na 32 jednakowe (wirtualne) pola pomiarowe

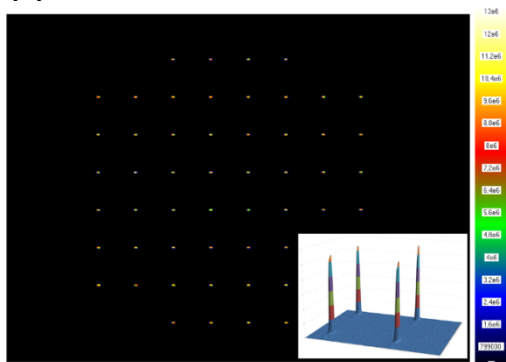
Dodatkowo należy zauważyć, że na pojedynczy sub-piksel, przypadają co najmniej 4 piksele, które w przypadku matrycy Bayera, przykryte są przez 2 filtry zielone, jeden niebieski i jeden czerwony. Współczynniki proporcji rejestrowanych wartości, niezbędne do przeliczenia na wartość luminancji kształtują się na poziomie (wzór 1).

$$(1) \quad L_n = V_n \cdot k_L \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

$$V_n = k_R \cdot R_n + k_G \cdot G_n + k_B \cdot B_n$$

gdzie: L_n - luminancja n-tego piksela obrazu, V_n - jasność n-tego piksela obrazu, k_L - współczynnik kalibracji, R_n, G_n, B_n - wartość składowej czerwonej, zielonej i niebieskiej, n-tego piksela obrazu, k_R, k_G, k_B - współczynniki proporcjonalności składowej czerwonej, zielonej i niebieskiej.

W związku z tym, wykonując prosty test, można uzmysłowić sobie, jak trudny jest pomiar luminancji przy pomocy takiego urządzenia. Analizując wartości luminancji 16 kolejnych pikseli, zawierających luminancję diody LED, wchodzącej w skład wieloźródłowej oprawy oświetleniowej (rys. 8), można bez trudu zauważyć jak dynamiczne zmiany luminancji rejestrowane są przez sąsiednie komórki matrycy.



Rys. 8. Rozkład luminancji wieloźródłowej oprawy LED wraz z wykresem obrazującym różnice wartości dla reprezentatywnego fragmentu oprawy zawierającego 4 chipy świecące

Luminancja maksymalna w obrębie analizowanej diody wynosi $13 \cdot 10^6$ cd/m². Luminancje średnie z 4 bezpośrednio sąsiadujących ze sobą pikseli mogą różnić się ponad 1000-krotnie. Finalna luminancja średnia z 16 sąsiadujących ze sobą komórek matrycy może stanowić mniej niż 2% wartości średnich luminancji dla każdego ze składowych pikseli (rys. 8). W związku z tym, technologia urządzeń rejestrujących rozkłady luminancji, których matryce składają się z komórek światłoczułych dedykowanych do celów fotografii (posiadają filtry barwne – najczęściej filtr Bayera), musi zostać precyzyjnie zweryfikowana, zanim zostanie wykorzystana do pomiarów rozkładów luminancji obiektów, charakteryzujących się bardzo dużą zmiennością gradientu luminancji.

Podsumowanie

Po przeanalizowaniu rozwiązań dostępnych na rynku, biorąc pod uwagę wyniki pomiarów przedstawione w artykule, końcowe wnioski można podzielić na dwie części. Pierwsza, związana jest z maksymalizacją wykorzystania obecnej technologii w procesie projektowym. Gdy pomiary rozkładów luminancji potrzebne są do wykonania modelu źródła światła w celu wykorzystania do obliczeń symulacyjnych lub w procesie świadomego projektowania układów optycznych opraw oświetleniowych – podstawowym kryterium pomiarowym jest to, aby rozdzielczość oraz precyzja pomiaru były możliwie największe. Z drugiej jednak strony, gdy pomiary rozkładów luminancji mają być pomocne w określeniu np.

potencjalnego olśnienia przykrego – rozdzielczość i parametry sprzętu pomiarowego powinny być dopasowane do „rozdzielczości oka ludzkiego”. Zdaniem autora niniejszej publikacji są to podstawowe kryteria, które powinny być brane pod uwagę podczas doboru sprzętu i optymalizowaniu stanowiska pomiarowego w celu rejestracji optymalnego i wiarygodnego rozkładu luminancji.

LITERATURA

- [1] Słomiński S., „The dynamic mapping of luminance in analytical model of light source”, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 8/2008, 101-104.
- [2] Słomiński S., „Luminance mapping to the light source model - possibilities to use a MML in the lighting technology field”, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 4/2011, 87-89
- [3] Polska Norma PN-EN 13201 „Oświetlenie dróg”; PKN, Warszawa 2007 r.
- [4] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH. (n.d.). Video Photometer Imaging light and colour measuring technique, 2014, from http://www.technoteam.de/product_overview/lmk/products/index_eng.html
- [5] H Cai, „High dynamic range photogrammetry for synchronous luminance and geometry measurement”, *Lighting Research and Technology*, 2013, 45: 230-257
- [6] RD Clear, „Discomfort glare: What do we actually know?”, *Lighting Research and Technology*, 2013, 45: 141-158
- [7] JD Bullough, JA Brons, R. Qi, MS Rea, “Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations”, *Lighting Research and Technology*, 2008, 40: 225-242
- [8] T Tashiro, S Kawanobe, T Kimura-Minoda, S Kohko, T Ishikawa, M Ayama, „ Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements”, *Lighting Research and Technology*, online published on April 24, 2014
- [9] Cai, H. & Chung, T. M. Improving the quality of high dynamic range images. *Lighting Research & Technology*, 2011, 43 (1): 87-102.
- [10] Inanici M. N. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. *Lighting Research and Technology*, 2006, 38: 123–136.
- [11] Cai, H. & Chung T. M. Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources. *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(3): 267-294.
- [12] Kaźmierczak P. “Badania eksploatacyjne stanu oświetlenia obiektów iluminowanych”, *Rozprawa Doktorska*, Warszawa 2006
- [13] Słomiński S., „Możliwości wykorzystania matrycowych mierników luminancji w pomiarach olśnienia drogowych opraw oświetleniowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 9/2014, 180-182
- [14] Cai H. Luminance gradient for lighting evaluation. *Lighting Research & Technology*, published online 27 November 2013, DOI: 10.1177/1477153513512501, 0: 1-21

Autor: Sebastian Słomiński, dr inż., Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Techniki Świetlnej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: sebastian.slominski@ien.pw.edu.pl