

Zautomatyzowane stanowisko do pomiarów przestrzennych rozsyłów światłości miernikiem matrycowym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano stanowisko do pomiarów brył fotometrycznych urządzeń świetlnych przy wykorzystaniu matrycowego miernika luminancji, goniometru oraz ekranu transmisyjnego. Omówiono problem zastosowania ekranu transmisyjnego o nie Lambertowskim charakterze rozpraszania światła i wpływ światła przeszkadzającego w pomieszczeniu badawczym na wyniki pomiarów. Uzyskane przy użyciu wspomnianego stanowiska wykresy światłości zweryfikowano porównując je ze zmierzonymi za pomocą goniofotometru.

Abstract. This paper describes method for getting total luminous intensity distributions using imaging luminance measurement device, goniometer and transmission screen. The problem of using transmission screen with non-Lambertian scattering distribution function of transmitted light via the screen and influence of diffused light in photometric room were discussed. Obtained results were compared with goniofotometer measurements. (Automated measurement system for getting total luminous distributions using imaging luminance measurement device).

Słowa kluczowe: matrycowy miernik luminancji, przestrzenny rozsył światłości, goniofotometr, dwukierunkowa funkcja rozkładu rozproszenia

Keywords: imaging luminance measurement device (ILMD), luminous intensity distribution, goniofotometr, bidirectional transmittance distribution function,

Wstęp

Przestrzenne rozsyły światłości stanowią najważniejszy parametr opraw oświetleniowych. Są podstawą do obliczeń wymaganych natężeń oświetlenia przez projektantów w pomieszczeniach wewnętrznych oraz terenach zewnętrznych. Do pozyskiwania brył fotometrycznych układów świetlny- optycznych wykorzystuje się zespół głowicy fotometrycznej wraz z goniometrem. Spotyka się różne konfiguracje goniofotometrów [1,2]: fotometry ramienne, goniofotometry wykorzystujące ruchome zwierciadło i inne. Ze względu na fakt, iż pomiarów światłości dokonuje się punktowo na wcześniej określonej siatce pomiarowej to uzyskiwanie brył fotometrycznych o zadowalającej rozdzielczości kątowej jest czasochłonne i może trwać do nawet kilkunastu godzin. Z tego też względu poszukuje się metod alternatywnych skracających czas pomiaru, a jednocześnie zwiększających jakość uzyskanych wyników. Jedną z takich metod jest coraz to bardziej powszechny pomiar goniofotometrem „on the fly” (równoczesny pomiar światłości z obrotem stolika goniometru), która istotnie skraca czas pomiaru. Jednakże sposób ten umożliwia jedynie uzyskanie quasi-ciągłych wyników względem jednej osi obrotu.

Obliczenia światłości z rozkładów luminancji ekranu

Efektywnym i szybkim sposobem pomiaru przestrzennych rozsyłów światłości jest pomiar z wykorzystaniem matrycowego miernika luminancji i ekranu projekcyjnego [3,4]. Urządzenie świetlne skierowane jest na środek ekranu pomiarowego (do projekcji tylnej bądź przedniej), którego luminancję mierzy się za pomocą dwuwymiarowego miernika luminancji. Zmierzoną luminancję powierzchni ekranu przelicza się na światłość w kierunku (H, V) przy wykorzystaniu podstawowych praw fotometrycznych i zależności geometrycznych [5,6]:

$$(1) \quad I(H, V) = \pi \frac{L(x_i, y_j) \times r(x_i, y_j)^2}{\tau} \times \frac{1}{f(\alpha)}$$

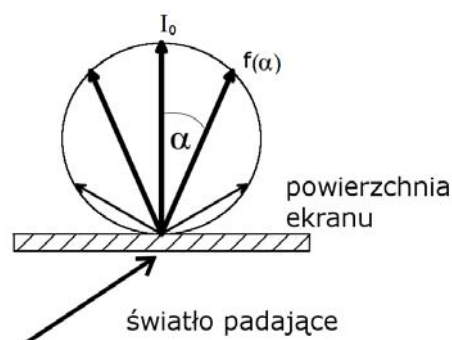
gdzie: $r(x_i, y_j)$ – odległość między elementem powierzchni ekranu dS_{ij} o współrzędnej (x_i, y_j) mającej odwzorowanie optyczne w pikselu miernika matrycowego o współrzędnej (i, j) a środkiem fotometrycznym urządzenia świetlnego, $L(x_i, y_j)$ – luminancja skończonego elementu powierzchni ekranu dS_{ij} , $f(\alpha)$ – funkcja rozkładu rozproszenia zależna od

kąta obserwacji ekranu α - rysunek 1, τ – współczynnik transmisji lub odbicia ekranu przepuszczającego światło. Ekran pomiarowy powinien idealnie rozpraszać przechodzące przez niego światło. W takim przypadku funkcja $f(\alpha)$ we wzorze 1 jest dana Prawem Lamberta:

$$(2) \quad f(\alpha) = I_0 \cos(\alpha)$$

gdzie I_0 to światłość w osi odniesienia.

W rzeczywistości zależność (2) jest dobrze odwzorowana jedynie przez specjalne ekrany dyfuzyjne o niewielkich wymiarach i dla ograniczonych kątów obserwacji α . Często takie ekrany nie przekraczają wymiarów 50 cm×50 cm, co stanowi duże ograniczenie ze względu na małą powierzchnię pomiarową. Niemniej jednak można stosować ekrany o różnym charakterze rozpraszania światła innym niż Lambertowski, ale musi być znana dwukierunkowa funkcja rozkładu rozproszenia BSDF (ang. Bidirectional Scatter Distribution Function) dla danego materiału.



Rys.1. Lambertowskie rozproszenie światła przechodzącego przez ekran transmisyjny

Współczynnik transmisji τ z równania 1 oblicza się według wzoru [7]

$$(2) \quad \tau = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) \times \tau(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}$$

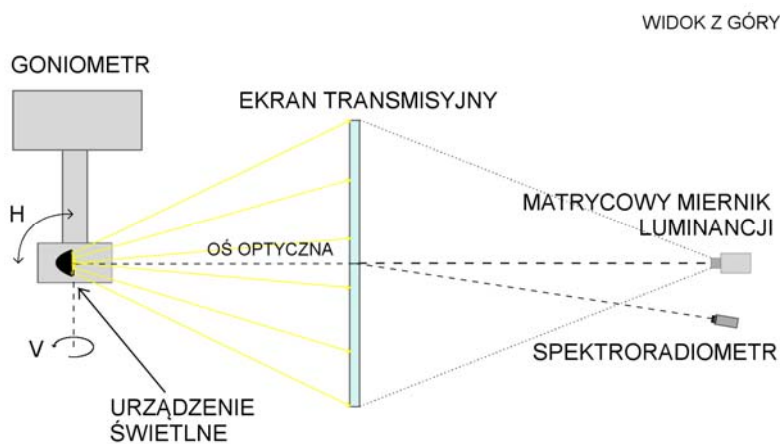
przy czym: $S(\lambda)$ – rozkład widmowy względny światła wyemitowanego przez urządzenie świetlne, $V(\lambda)$ – czułość względna oka ludzkiego, $\tau(\lambda)$ – monochromatyczny współczynnik transmisji.

Z powyższego wzoru wynika, że jeżeli monochromatyczny współczynnik transmisji ekranu $\tau(\lambda)$ jest stały w funkcji długości fali to niezależnie od widma źródła światła współczynnik transmisji będzie ten sam. Jednakże każdy ekran projekcyjny posiada mniej lub bardziej zmienny monochromatyczny współczynnik transmisji/odbicia, stąd też korzystna jest znajomość rozkładu widmowego badanego urządzenia świetlnego.

Schemat stanowiska do pomiarów rozkładów światłości miernikiem matrycowym

Jedną z zalet zastosowania matrycowego miernika luminancji jest czas pomiaru pojedynczej mapy luminancji ekranu, który jest porównywalny z czasem wykonania

zdjęcia aparatem cyfrowym. Niemożliwe jest jednak uzyskanie kompletnego rozsyłu światłości urządzeń świetlnych z jednej mapy luminancji za wyjątkiem małej rodziny źródeł światła o niewielkich wymiarach i wąskich kątach rozsyłu. Przykładowo, ekran o wymiarach około 1070 mm×800 mm pozwala na jednorazowy pomiar rozsyłu światłości lampy oddalonej od ekranu o około 1,9 m w przedziale nie większym niż 30° w płaszczyźnie poziomej. Kąty pomiaru można zwiększyć wykorzystując ekrany o większych wymiarach, o kształcie półsfery bądź też z wykorzystaniem skomplikowanych układów optycznych [8], pamiętać jednak należy, że zwiększając powierzchnię pomiarową przy tej samej rozdzielczości urządzenia pomiarowego jakość uzyskanych wyników spada. Problem ten można ominąć na stanowisku gdzie źródło światła obracane jest za pomocą goniometru (rys. 2).



Rys.2. Schemat stanowiska do pomiarów rozsyłu światłości z wykorzystaniem matrycowego miernika luminancji

Oprócz ekranu pomiarowego o znanym monochromatycznym współczynniku transmisji, matrycowego miernika luminancji oraz goniometru zastosowano także spektrometr do pomiaru rozkładu widmowego $S(\lambda) \times \tau(\lambda)$ światła przechodzącego przez ekran w celu obliczenia współczynnika transmisji τ dla światła emitowanego przez badane urządzenie. W opracowanej metodzie, wspomniany pomiar spektrometryczny wykonuje się jednorazowo przed pomiarami map luminancji w osi odniesienia. Dalszą część badań stanowią obliczenia odpowiedniej siatki pomiarowej w przyjętym systemie geometrycznym (na przykład w geometrii $H-V$ stosowanej w motoryzacji) oraz pomiary map luminancji ekranu matrycowym miernikiem luminancji poprzedzone odpowiednim pozycjonowaniem urządzenia świetlnego przez goniometr. Ponadto w celu odjęcia światła rozproszonego w pomieszczeniu badawczym, wykonuje się drugi pomiar map luminancji dla tej samej siatki pomiarowej, jednak z tą różnicą, że na drodze między ekranem pomiarowym a układem świetlnym znajduje się przesłona osłaniająca ekran przed światłem bezpośrednim. Światło rozproszone odbite od ścian pomieszczenia i przyrządów w ciemni fotometrycznej daje zauważalny wkład do obliczonych światłości. Nie uwzględnienie światła rozproszonego podczas pomiarów skutkuje brakiem spójności uzyskanych wyników końcowych.

W ostatnim etapie pomiaru ma miejsce obliczanie rozsyłu światłości z pojedynczych map luminancji, odejmowanie światła rozproszonego i synteza uzyskanych wyników.

Badania funkcji rozkładu rozproszenia dla ekranu transmisyjnego

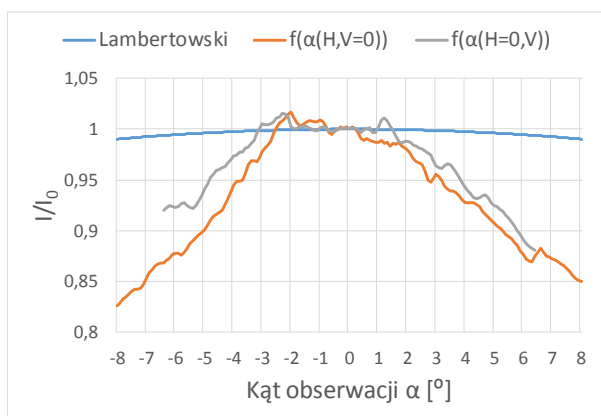
Rzeczywisty charakter rozpraszania światła użytego ekranu transmisyjnego nie jest Lambertowski, a funkcja $f(\alpha)$ we wzorze 1 jest nieznana. Przybliżony cząstkowy rozsył światłości danego układu świetlnego można wyliczyć z pojedynczego rozkładu luminancji przy założeniu, że ekran rozprasza światło w sposób Lambertowski. Dalej wykonując pomiary tego samego układu świetlnego goniofotometrem dla tych samych kątów, można porównać uzyskane wyniki i w oparciu o nie obliczyć funkcję rozkładu światła rozproszonego przechodzącego przez ekran:

$$(3) f(H, V) = I_0 \times \frac{I_{ILMD}(H, V)}{I_{GF}(H, V)} \times \cos(\alpha(H, V))$$

gdzie: $f(H, V)$ – funkcja rozkładu światła rozproszonego zależna od kątów w osi pionowej (kąt V) i w osi prostopadłej do osi V (kąt H), I_0 – światłość w osi odniesienia, $I_{ILMD}(H, V)$ – światłość obliczona z luminancji zmierzonej przez matrycowy miernik luminancji, $I_{GF}(H, V)$ – światłość zmierzona goniofotometrem.

Kluczowym jest także obliczenie kątów widzenia ekranu przez matrycowy miernik luminancji dla parametrów geometrycznych stanowiska i użytego obiektywu w celu obliczenia kątów „obserwacji” elementarnych powierzchni ekranu przez pojedyncze piksele w matrycowym mierniku luminancji.

Przedstawionym wyżej sposobem przeprowadzono badania funkcji rozkładu światła rozproszonego ekranu w dwóch osiach z rozdzielczością $0,1^\circ$. Wyniki w płaszczyźnie poziomej i pionowej zobrazowano na rysunku 3.



Rys.3. Funkcja rozkładu światła rozproszonego przechodzącego przez ekran pomiarowy

Wartości funkcji $f(\alpha(H,V))$ w postaci macierzy wykorzystuje się dalej do obliczeń światłości z pojedynczej mapy luminancji. Efektem przyjęcia do obliczeń błędnego rozkładu funkcji rozpraszania światła skutkuje również brakiem spójności uzyskanych wyników.

Wyniki pomiarów

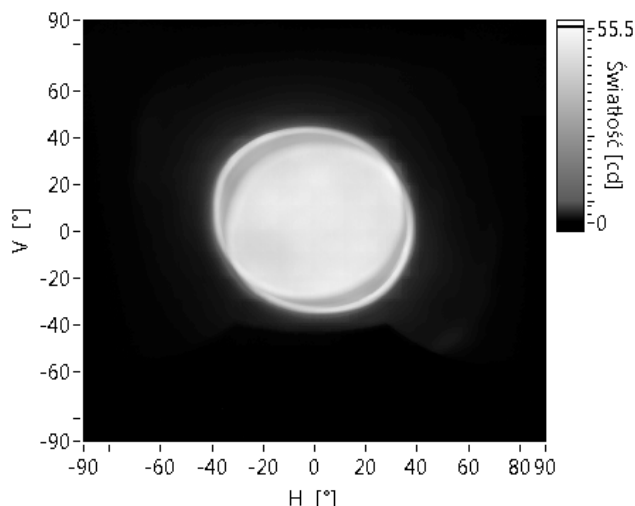
Badaniom poddane zostało źródło LED emitujące światło barwy białej o niewielkich wymiarach w stosunku do odległości między źródłem światła i ekranem. Do badań wykorzystano miernik matrycowy LumiCam 1300 Advanced o rozdzielczości matrycy 1370×1020 i wymiarach piksela $6,45 \times 6,45 \mu\text{m}$. Parametry stanowiska badawczego podczas pomiarów:

- odległość między środkiem świetlnym źródła a środkiem ekranu: 5,1 m;
- odległość między środkiem ekranu a matrycowym miernikiem luminancji: 5,1 m;
- obiektyw o ogniskowej 28 mm;
- wymiary efektywnej powierzchni pomiarowej objętej przez miernik: 1540 mm \times 1150 mm (szerokość \times wysokość).

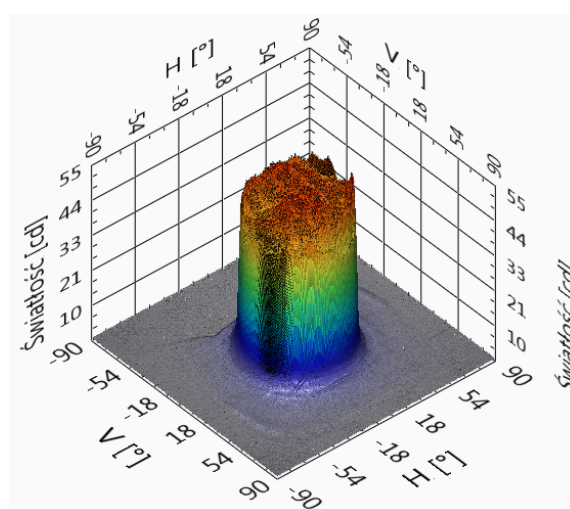
Obliczony numerycznie współczynnik transmisji dla badanego źródła wyniósł $\tau=53,2\%$.

Do objęcia całej półprzestrzeni w którą emitowane było światło konieczne było wykonanie 176 pomiarów map luminancji i tyle samo pomiarów dla światła rozproszonego. Ze zmierzonej luminancji przez pojedynczy piksel została obliczona światłość, a następnie wyniki zostały uśrednione numerycznie co $0,1^\circ$ w osiach H i V . Do średniej wzięte zostały piksele posiadające współrzędną jego środka $(H(x_i,y_j), V(x_i,y_j))$ wewnątrz przedziału $(H \pm dH, V \pm dV)$ przy czym dH i dV w tym przypadku wynoszą $0,05^\circ$. Ponieważ siatka kątów $H-V$ odwzorowana na płaszczyźnie ekranu nie jest izotropowa, dlatego liczba pikseli będzie się zmieniać dla innych kątów H i V (od około 8 do 64). W pobliżu kąta $V=\pm 90$ gdzie odwzorowana siatką kątów $H-V$ jest najgęstsza, do średniej brano jedynie przedział o szerokości jednego piksela o współrzędnej najbliższej danego kąta (H,V) .

Wykresy powierzchniowe uzyskanej bryły fotometrycznej umieszczono na rysunkach 4 i 5. Czas badań fotometrycznych układu świetlnego nie przekroczył 120 minut.

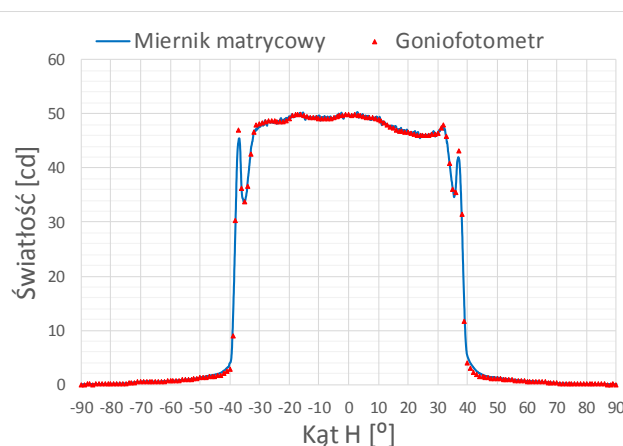


Rys.4. Bryła fotometryczna badanego urządzenia świetlnego – widok w postaci mapy dwuwymiarowej

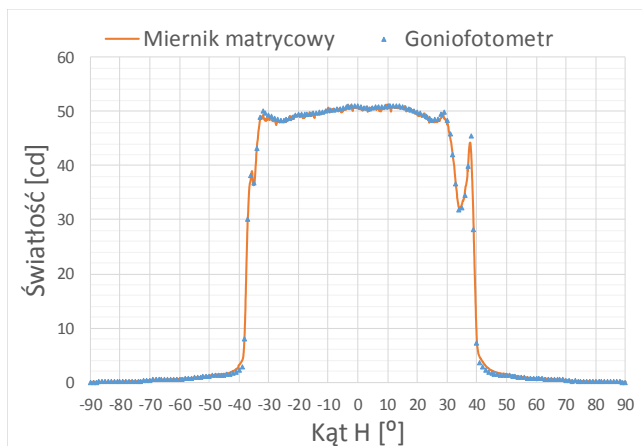


Rys.5. Wykres powierzchniowy rozsyłu światłości

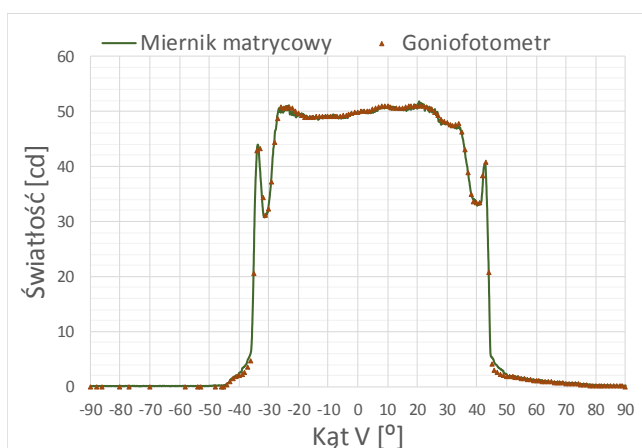
W celu walidacji uzyskanych wyników wykonano pomiar goniofotometrem z odległości 10,1 m w płaszczyznach $H=0$, $H=10$, $V=0$ oraz $V=10$ z krokiem kątowym wynoszącym 1° i porównano je z wykresami światłości wyodrębnionymi z uzyskanej bryły fotometrycznej zmierzonej z wykorzystaniem omówionego w artykule stanowiska. Zestawione wykresy światłości umieszczono na rysunkach 6–9.



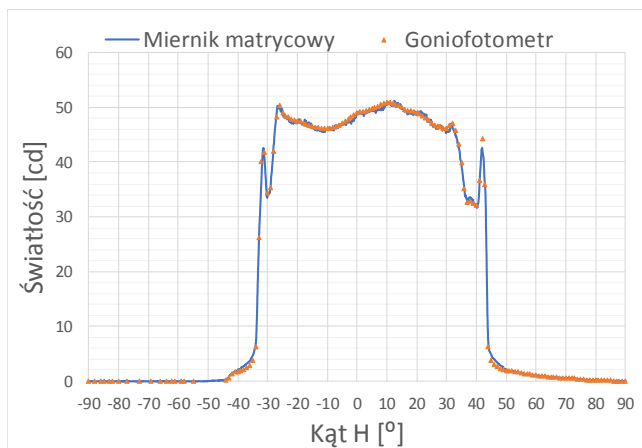
Rys.6. Porównanie wykresów światłości badanego urządzenia zmierzonych z wykorzystaniem stanowiska opartego o matrycowy miernik luminancji oraz goniofotometrem (oś pozioma $V=0$)



Rys.7. Porównanie wykresów światłości w płaszczyźnie $V=10$



Rys.8. Porównanie wykresów światłości badanego urządzenia zmierzonych z wykorzystaniem stanowiska opartego o matrycowy miernik luminancji oraz goniofotometrem (oś pozioma $H=0$)



Rys.9. Porównanie wykresów światłości w płaszczyźnie $H=10$

Niepewności względne rozszerzone wynoszą 5,2% przy pomiarach miernikiem matrycowym oraz 4,2% goniofotometrem (przy $k=2$ i poziomie ufności około 95% dla rozkładu normalnego).

Podsumowanie

Po odjęciu światła rozproszonego i uwzględnieniu funkcji rozkładu światła rozproszonego przez ekran uzyskano spójne wyniki pokrywające się w granicach przyjętych niepewności z wykresami światłości zmierzonymi goniofotometrem. Rozsył światłości badanego urządzenia świetlnego z rozdzielczością kątową $0,1^\circ$ uzyskano w niespełna dwie godziny co jest trudne do osiągnięcia wykorzystując klasyczny goniofotometr. Niezbędna jest kontynuacja badań źródeł światła o większych strumieniach świetlnych i różnych rozkładach spektralnych w celu dalszej optymalizacji metody.

Zaproponowana metoda może być wykorzystana w celu unowocześnienia istniejących systemów do pomiaru brył fotometrycznych.

Autorzy:

mgr. Inż. Marcin Legierski, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., ul Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko Biała, E-mail: Marcin.Legierski@bosmal.com.pl ;

mgr. Inż. Piotr Michałek, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., ul Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko Biała, E-mail: Piotr.Michalek@bosmal.com.pl

LITERATURA

- [1] CIE 70-1987 Technical Report; The measurement of absolute luminous intensity distributions, Photocopy Edition 2008
- [2] Żagan W. *Podstawy techniki świetlnej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [3] J2382 Surface vehicle information report: *Video Based Light Measurement Techniques*. SAE International, July 2014
- [4] LM-77-09, approved Method: Intensity Distribution of Luminaires and Lamps *Using Digital Screen Imaging Photography*. Illuminating Engineering Society, New York 2009
- [5] Legierski M., Michałek P. (2016), *Zastosowanie matrycowego miernika luminancji do pomiarów przestrzennego rozsyłu światłości lamp i opraw*, "Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe" 12/2016
- [6] Legierski M., *Pomiary rozsyłu światłości układów świetlnooptycznych przy użyciu goniofotometru oraz kamery fotometrycznej LumiCam 1300 Advanced. Zestawienie i porównanie obydwu metod*. Rozprawa magisterska, Kraków 2016
- [7] CIE 130-1998 Technical Report: *Practical methods for the measurement of reflection and transmittance*,
- [8] Karamata B., Zndersen M., *A review and analysis of parallel goniophotometry*, Proceedings LuxEuropa 2013, Krakow, Poland, Sept 17-19, 2013