

Analiza wpływu czułości widmowej spektrometru na niedokładność pomiarów kolorymetrycznych

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę niedokładności pomiarów spektrofotometrycznych parametrów kolorymetrycznych i fotometrycznych źródeł światła. Przedstawiono wpływ czułości widmowej używanego spektrometru oraz poziomu światła rozproszonego na ten parametr.

Abstract. The article presents an analysis of the spectrophotometric measurement inaccuracy of light sources colorimetric and photometric parameters caused by spectroradiometer spectral sensitivity and stray light. **(The measurement inaccuracy of light sources colorimetric and photometric parameters caused by spectroradiometer spectral sensitivity)**

Słowa kluczowe: spektrometr, detektor, siatka dyfrakcyjna, źródło światła

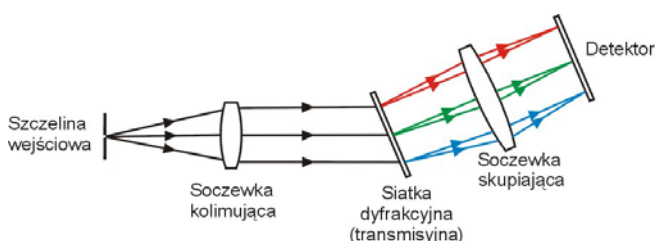
Keywords: spectroradiometer, detector, diffraction grating, light source

Wstęp

Spektroskopy, spektrometry, spektrografy są przyrządami pomiarowymi używanymi współcześnie w różnorodnych dziedzinach działalności człowieka. Stosowane są począwszy od analiz chemicznych poprzez diagnostykę medyczną, monitoring sejsmiczny, badania satelitarne oraz technikę świetlną. W powszechnym mniemaniu, ich obecność w przedsięwzięciach naukowych i technologiach przemysłowych jest wyznacznikiem i gwarantem niezawodności, a także wysokich standardów wykonanych pomiarów oraz jakości całego przedsięwzięcia.

Pierwszym w świecie przyrządem umożliwiającym analizowanie promieniowania świetlnego był spektroskop. Zbudowany on został w 1814 roku przez niemieckiego astronoma i fizyka Josepha von Fraunhofera. Tego typu przyrządem można wyznaczyć długość fal świetlnych analizowanego promieniowania. Gdy przyrząd ten zostanie skalibrowany źródłem wzorcowym o znanym rozkładzie widmowym egzytancji energetycznej, to nosi on nazwę spektrometru.

Konstrukcje tego rodzaju przyrządów podlegają nieustannemu rozwojowi, jednakże zawsze podstawowymi elementami składowymi są: optyka wejściowa, element dyspersyjny (rozdzielający wiązkę promieniowania na poszczególne długości fali) oraz detektor [1] (rys. 1).



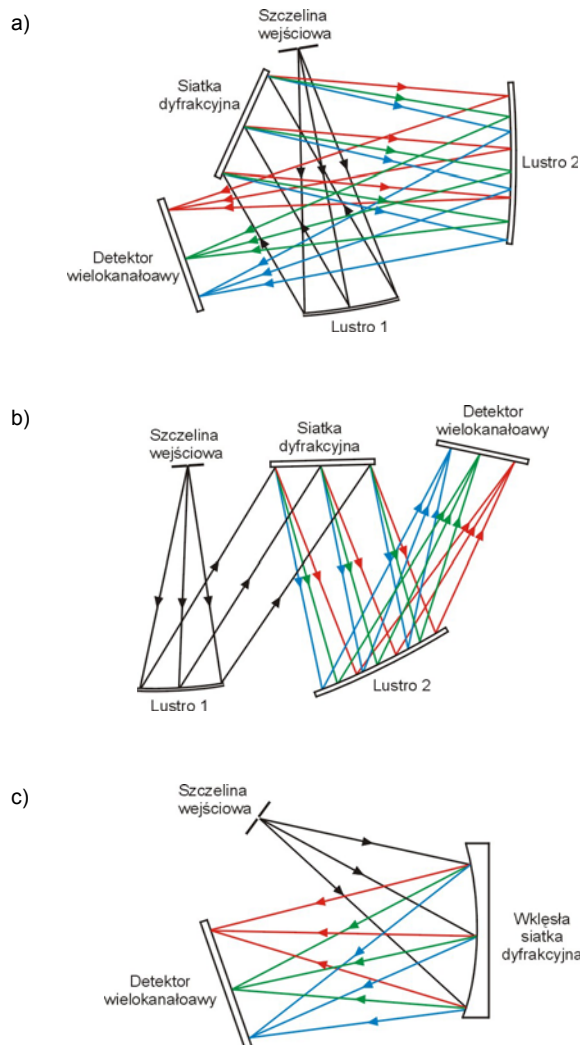
Rys. 1. Poglądowy schemat funkcjonowania spektrometru

W zależności od zasady działania, można wyróżnić spektrometry:

- typu Fourierowskiego tj. działające z wykorzystaniem interferometru Michelsona,
- z fotodetektorem punktowym i monochromatorem na bazie ruchomej siatki dyfrakcyjnej,
- z detektorem wielokanałowym i nieruchomą siatką dyfrakcyjną.

Obecnie ze względu na niewielkie rozmiary, małą masę, przystępną cenę oraz krótki czas pomiaru, coraz popularniejsze wśród użytkowników stają się spektrometry z nieruchomą siatką dyfrakcyjną oraz nieruchomym detektorem (CCD lub linijka diodowa). Istnieje

wiele możliwości konfiguracji toru optycznego tego typu przyrządu pomiarowego. Najczęściej są to układy: skrzyżowany Czerny-Turner (rys. 2a), rozłożony Czerny-Turner (rys. 2b) oraz wkłęsło-holograficzny (rys. 2c).



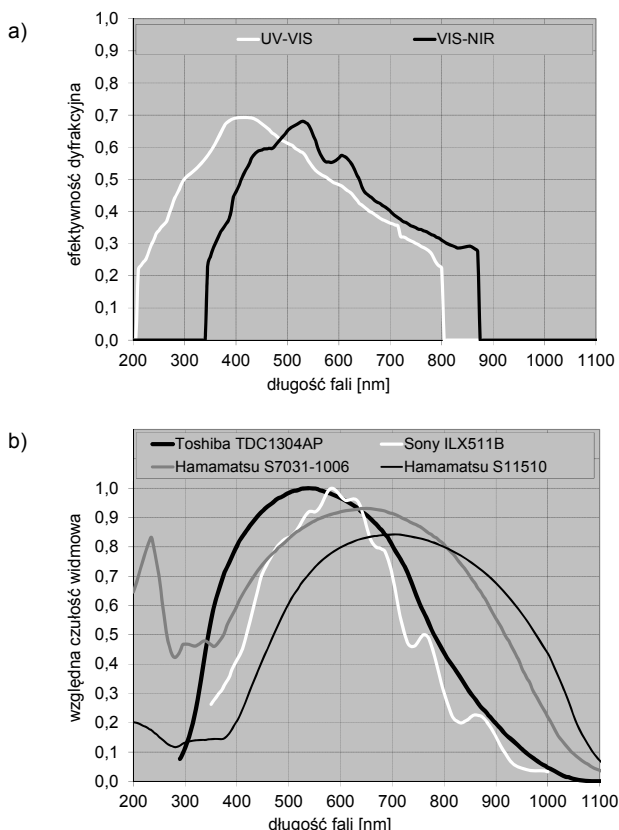
Rys. 2. Typowe konstrukcje torów optycznych spektrometrów kompaktowych: a) skrzyżowany Czerny-Turner, b) rozłożony Czerny-Turner, c) wkłęsło-holograficzny

Dzięki tego typu konstrukcji, można zarejestrować rozkład widmowy (np. egzytancji energetycznej)

promieniowania w czasie jednej ekspozycji. Mierzone promieniowanie do szczeliny wejściowej (rys. 2) jest doprowadzane światłowodem. Od rozmiaru tej szczeliny (np.: 10 μm , 25 μm , 50 μm , 100 μm , 200 μm) zależy wartość rozdzielczości optycznej. Następnie po ukształtowaniu, np. przy użyciu lustra, geometrii mierzonej wiązki promieniowania, siatka dyfrakcyjna rozdziela to promieniowanie na sygnały o określonej długości fali. Dzięki temu pada ono zawsze na ten sam, ściśle określony piksel fotodetektora wielokanałowego np. typu CCD lub linijki diodowej. Sygnały elektryczne z fotodetektora są digitalizowane przez przetwornik A/C i przetwarzane przez odpowiednie oprogramowanie komputera, na ekranie którego otrzymuje się informację o charakterystyce rozkładu widmowego mierzonego promieniowania optycznego. Producenci oferują wiele możliwości konfiguracyjnych tego typu przyrządów.

Przykładowe konfiguracje układów optycznych popularnych spektrometrów kompaktowych

Jakość danej konstrukcji tego rodzaju przyrządu pomiarowego w znacznej mierze zależy od tego jaki jest ich widmowy zakres pomiarowy, czułość, rozdzielczość widmowa oraz poziom światła rozproszonego. Widmowy zakres pomiarowy zależy od efektywności dyfrakcyjnej używanych w konstrukcji siatek dyfrakcyjnych oraz czułości widmowej detektorów. Popularnie stosowane w konstrukcjach spektrometrów kompaktowych rodzaje siatek dyfrakcyjnych oraz fotodetektorów przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyki widmowe typowych elementów składowych spektrometrów kompaktowych: a) siatek dyfrakcyjnych UV-VIS, VIS-NIR, b) fotodetektorów

W układzie optycznym spektrometrów kompaktowych występuje dość wysoki poziom światła rozproszonego. Jest on wielokrotnie wyższy niż w klasycznych konstrukcjach monochromatorów wyposażonych w ruchomą siatkę dyfrakcyjną i detektor

punktowy. Fakt ten przekłada się na jakość wykonanych pomiarów. Co prawda istnieją metody korygowania wpływu światła rozproszonego na wyniki pomiarów spektrometru kompaktowego ale są one bardzo kosztowne i wymagają dysponowania zaawansowaną technologicznie aparaturą [2, 3]. W związku z tym popularnie i relatywnie tanie spektrometry kompaktowe nie mają wprowadzonych do algorytmu swojego działania systemów korekcji i ten niepożądany efekt wpływa na dokładność wykonywanych nimi pomiarów rozkładów widmowych [4].

Parametry dostępnych handlowo spektrometrów zestawiono w tabeli 1. Chcąc przeanalizować jaki jest wpływ dostępnej handlowo konkretnej konstrukcji toru optycznego (siatka dyfrakcyjna + detektor) na jakość wykonanych nim pomiarów, parametrów kolorymetrycznych źródeł światła, przeprowadzono badania symulacyjne. Założono stały poziom światła rozproszonego w układzie optycznym spektrometru poddawanego analizie (odstąpiono od podawania nazw producentów i numerów katalogowych poszczególnych spektrometrów, zastępując je umownymi symbolami liczbowymi od 1 do 4). Podano deklarowany przez producenta ich widmowy zakres pomiarowy w [nm] oraz typ zastosowanego detektora oraz siatki dyfrakcyjnej (tab. 1).

Tabela. 1. Zestawienie parametrów wybranych dostępnych handlowo spektrometrów

Numer spektrometru	zakres pomiarowy [nm]	typ siatki dyfrakcyjnej	typ detektora
1.	200-1100	UV-VIS VIS-NIR	Toshiba TDC1304AP
2.	200-1100	UV-VIS VIS-NIR	Sony ILX511B
3.	200-1100	UV-VIS VIS-NIR	Hamamatsu S7031-1006
4.	~200-1180	UV-VIS VIS-NIR	Hamamatsu S11510

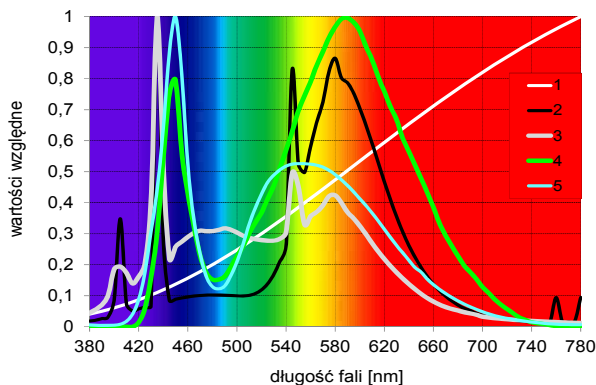
Źródła światła poddane analizie

Współcześnie obserwuje się intensywny rozwój technologii emiterów organicznych OLED, w związku z czym do analizy wybrano źródła tego typu (tab. 2.). Ponadto, w celach porównawczych uwzględniono typowe świetlówki (o barwach ciepłobiałej oraz białej), a także żarówkę. Na potrzeby niniejszej pracy, poszczególnym lampom nadano umowną numerację od 1 do 10, odpowiadającą od prezentowania informacji dotyczących producentów poszczególnych lamp.

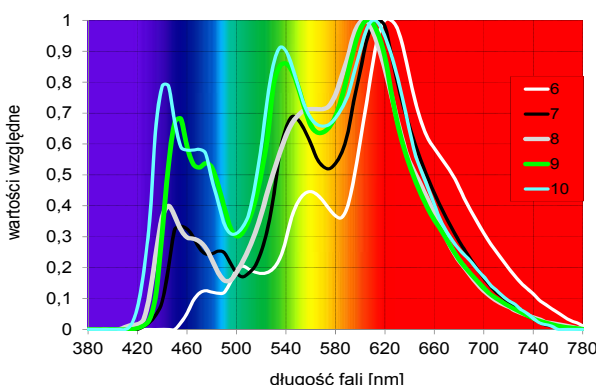
Tabela 2. Zestawienie parametrów analizowanych źródeł światła

L.p.	Typ lampy	x	y	T_b [K]
1	żarówka	0,4475	0,4074	2856
2	świetlówka (warm white)	0,4385	0,4086	3013
3	świetlówka (daylight)	0,3127	0,3320	6477
4	LED	0,4111	0,3807	3289
5	LED	0,3167	0,3316	6266
6	OLED	0,5237	0,4486	2104
7	OLED	0,4486	0,4092	2854
8	OLED	0,4317	0,4050	3098
9	OLED	0,3881	0,3879	3884
10	OLED	0,3709	0,3614	4162

Rozkłady widmowe względnej mocy promienistej (SPDs) tych źródeł światła zamieszczono na rysunku 4 oraz rysunku 5. Dane do tych wykresów pochodzą z kart katalogowych danych lamp. Bazując na wartościach SPDs wyliczono położenie punktu chromatyczności (x, y) w układzie CIE 1931 oraz temperatury barwowej najbliższej T_b dla każdej z lamp (tab. 2).



Rys. 4. Rozkłady widmowe: 1 – żarówki, 2 – świetłówki o barwie ciepłobiałej, 3 – świetłówki o barwie dziennej, 4 – źródła LED o barwie ciepłobiałej, 5 – źródła LED o barwie zimnej



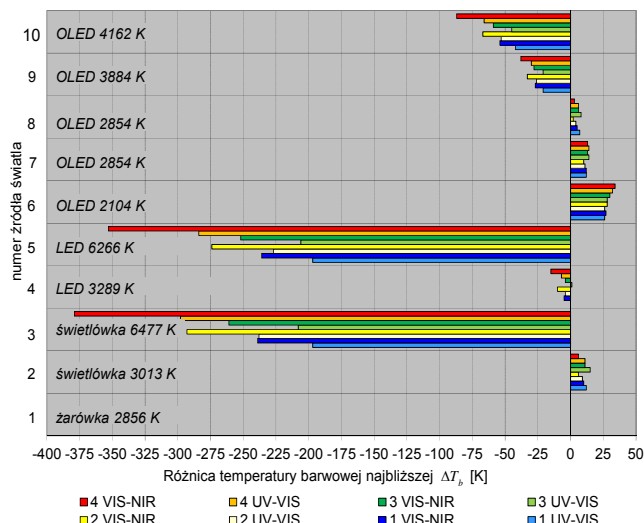
Rys. 5. Rozkłady widmowe źródeł OLED o różnych wartościach temperatury barwowej najbliższej

Wpływ czułości widmowej oraz poziomu światła rozproszonego spektrometru, na wynik pomiaru

W odniesieniu dla dziesięciu rzeczywistych źródeł światła (tab. 1) przeprowadzono modelowanie działania układu określonego spektrometru (z założoną wartością poziomu światła rozproszonego). Założono, że każdy z tych spektrometrów może zostać skonfigurowany jako układ UV-VIS lub też jako układ VIS-NIR. Przyjęto, że każdy z tych spektrometrów został skalibrowany energetycznie przy użyciu rozkładu widmowego zgodnego z promieniowaniem iluminantu A. Uzyskane na podstawie symulacji działania określonego spektrometru, dla danego źródła światła, wartości rozkładu widmowego posłużyły do wyznaczania wartości T_b oraz (x, y) . Wartości te porównano z danymi zestawionymi w tabeli 2 przyjętymi jako odniesieniowe.

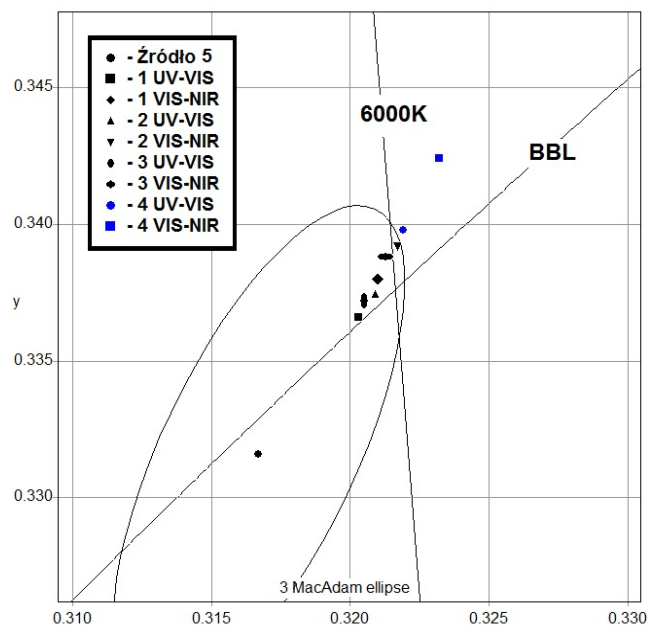
Graficzną ilustrację różnic pomiędzy wartością temperatury barwowej danego źródła światła, a tą wyznaczoną na podstawie symulacji pomiaru danym spektrometrem, przedstawiono na rysunku 6. Z danych zawartych na wykresie (rys. 6) jednoznacznie wynika, że lampy o chłodnobiałej barwie emitowanego światła, mierzone są tymi spektrometrami z większą niedokładnością, niż to ma miejsce przy źródłach światła charakteryzujących się niskimi wartościami temperatury barwowej T_b [K]. Różnice w położeniach punktów chromatyczności są na trzecim i czwartym miejscu po przecinku, co może mieć znaczenie w niektórych aplikacjach. Z danych przedstawionych na rysunku 6 wynika ponadto, że pomiary wykonane przy użyciu spektrometru nr 4 z siatką dyfrakcyjną VIS-NIR są najmniej dokładne. Spośród spektrometrów VIS-NIR najdokładniejsze pomiary temperatury barwowej gwarantuje spektrometr nr 1. Zapewnia on również najdokładniejsze pomiary w grupie spektrometrów

UV-VIS. Przy mierzeniu poszczególnymi spektrometrami promieniowania OLED, wyznaczone wartości (x, y) oraz T_b są prawie niezależne od rodzaju używanego przyrządu.



Rys. 6. Różnice pomiędzy rzeczywistą wartością temperatury barwowej danego źródła światła, a wartością wyznaczoną na podstawie pomiaru określonym spektrometrem

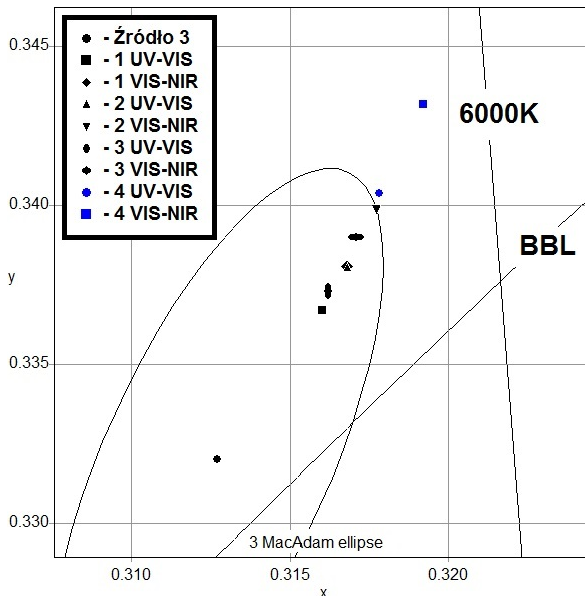
Niedoskonałość analizowanych przyrządów nie jest jedynie problemem metrologii teoretycznej. Na rysunku 7 zaprezentowano współrzędne położenia punktu chromatyczności lampy numer 5 tj. źródła LED o temperaturze barwowej wynoszącej 6266 K oraz wartości chromatyczności wyznaczone przy użyciu podczas pomiaru poszczególnych spektrometrów.



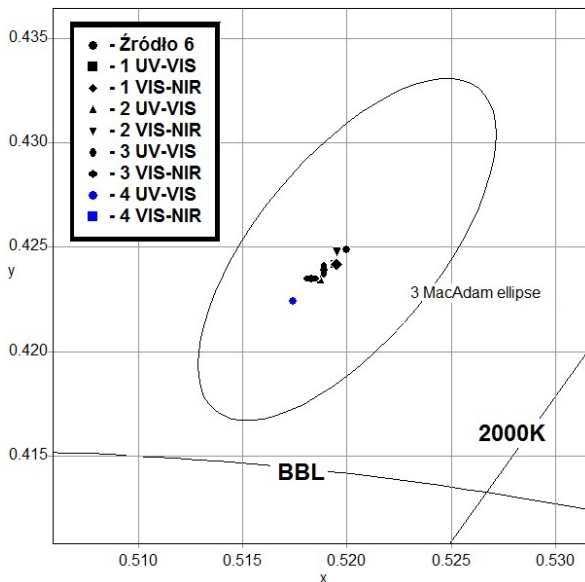
Rys. 7. Współrzędne położenia punktu chromatyczności analizowanego źródła numer 5 (LED chłodno-biały) oraz wartości uzyskane przy pomiarze poszczególnymi spektrometrami

Większość punktów mieści się tuż przy granicy 3-ciej elipsy MacAdama, z centrum w punkcie współrzędnych źródła numer 5. Wyniki pomiarów spektrometrem nr 4 zarówno w układzie UV-VIS jak i VIS-NIR wykraczają poza obszar tej elipsy. Oznacza to, że różnice w postrzeganiu mierzonego światła mogą być dostrzegalne przez

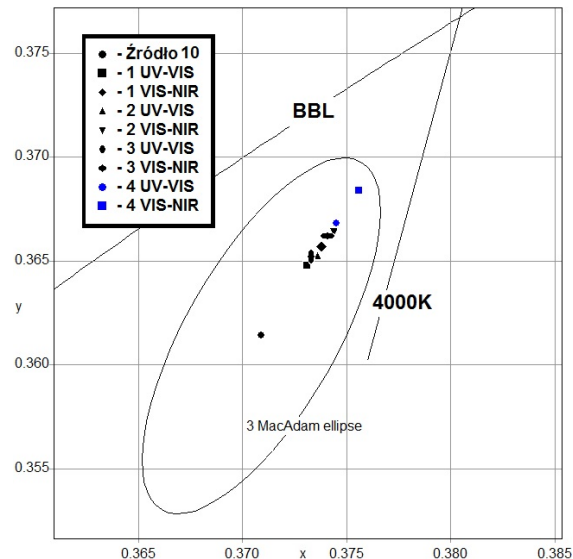
obserwatora. Ponadto, wyniki pomiarów położenia punktu chromatyczności uzyskane tym przyrządem, znajdują się powyżej krzywej Planka, co mogłoby sugerować, że barwa emitowanego światła „wpada” w odcień zieleni. W rzeczywistości jest zupełnie inaczej, gdyż współrzędne położenia punktu chromatyczności rozpatrywanego źródła są położone poniżej krzywej promieniowania ciała doskonale czarnego, czyli „zmiernają barwnie” w kierunku barw purpurowych.



Rys. 8. Współrzędne położenia punktu chromatyczności analizowanego źródła numer 3 (świetlówka o barwie dziennej) oraz wartości uzyskane przy pomiarze poszczególnymi spektrometrami



Rys. 9. Współrzędne położenia punktu chromatyczności analizowanego źródła numer 6 (OLED ciepły) oraz wartości uzyskane przy pomiarze poszczególnymi spektrometrami



Rys. 10. Współrzędne położenia punktu chromatyczności analizowanego źródła numer 10 (OLED biały) oraz wartości uzyskane przy pomiarze poszczególnymi spektrometrami

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można sformułować następujące wnioski:

- wyniki uzyskanych pomiarów uzależnione są od modelu spektrometru,
- charakter rozkładu widmowego mierzonego źródła światła ma istotny wpływ na niedokładność pomiaru,
- kalibracja spektrometru źródłem wzorcowym (iluminatorem A) nie jest gwarantem dużej dokładności realizowanych pomiarów w przypadku mierzenia innych niż żarowe źródła światła.

Przedstawione w pracy zagadnienie dotyczy wyłącznie kwestii światła rozproszonego, a zatem nie może być ono uznane za zakończone. Pozostałe aspekty autorzy zamierzają uwzględnić w kolejnych pracach.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/4/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

Autorzy: dr inż. Przemysław Tabaka, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl; mgr inż. Piotr Jakubowski, członek Polskiego Komitetu Oświetleniowego SEP, E-mail: piotr.jakubowski@gmail.com; dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d, E-mail: i.fryc@pb.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kostkowski J.H.: Reliable Spectroradiometry, Spectroradiometry consulting, 1997
- [2] Zong Y, Brown S. W, Johnson B. C., Lykke K. R., Ohno Y.: Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers, *Applied Optics*, Vol. 45, Issue 6, pp. 1111-1119, 2006
- [3] Stray light correction for array spectroradiometers https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/White_Papers/Application_note_-_Stray_light_correction_en.pdf, [dostęp: 8.05.2017 r.]
- [4] Barlier-Salsi A.: Stray light correction on array spectroradiometers for optical radiation risk assessment in the work place, *J Radiol Prot.* 2014 Dec; 34(4):915-3