

Andrzej WIŚNIEWSKI
Dariusz GROCHOWINA

OGÓLNY WSKAŹNIK ODDAWANIA BARW JAKO KRYTERIUM OCENY JAKOŚCI ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA STOSOWANE W ROZPORZĄDZENIACH KOMISJI EUROPEJSKIEJ W SPRAWIE WYKONANIA DYREKTYWY 2009/125/WE (EKOPROJEKT)

STRESZCZENIE *Omówiono wymagania określone w Rozporządzeniach Komisji Europejskiej w sprawie wykonania dyrektywy 2009/125/WE, dotyczące właściwości oddawania barw i sposobu weryfikacji tej właściwości. Przedstawiono konsekwencje wynikające z przyjętych tolerancji dla minimalnej wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw, ustalonej w Rozporządzeniach Komisji. Przeanalizowano również problem otrzymywania różnych wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw w zależności od rozdzielczości pomiaru badanego światła jak i od rozdzielczości algorytmów obliczeniowych stosowanych w programach do obliczania wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw. Wskazano także potencjalne zagrożenia, wynikające z możliwości otrzymania różnych wyników obliczeń. Zaproponowano oznaczenie uzupełniające, umieszczane za wartością ogólnego wskaźnika oddawania barw, informujące o rozdzielczości pomiaru i rozdzielczości metody, użytej do obliczenia tej wartości.*

Słowa kluczowe: *widmowy rozkład mocy promieniowania, temperatura barwowa najbliższa, ogólny wskaźnik oddawania barw*

1. WŁAŚCIWOŚĆ ODDAWANIA BARW, JAKO CECHA JAKOŚCIOWA ŹRÓDŁA ŚWIATŁA

Człowiek, jak wszystkie lądowe organizmy żywe posiadające narząd wzroku, jest przystosowany do środowiska świetlnego wytwarzanego przede wszystkim przez

dr inż. Andrzej WIŚNIEWSKI
e-mail: andrzej.wisniewski@ien.pw.edu.pl,
Politechnika Warszawska
Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa

inż. Dariusz GROCHOWINA
d.grochowina@iel.waw.pl
Instytut Elektrotechniki
ul. M. Pozaryskiego 28, 04-703 Warszawa

słońce, warunki klimatyczne i ruch obrotowy ziemi. Naturalne środowisko świetlne wskutek wzajemnego nakładania się tych czynników jest bardzo zmienne, stąd postrzegane barwy przedmiotów znajdujących się w polu obserwacji mogą mieć różny wygląd. Naturalne środowisko świetlne oprócz zapewnienia możliwości zaspokajania normalnych potrzeb bytowych i wykonywania czynności z tym związanych ma również zdolność oddziaływania na stan emocjonalny człowieka. W zależności od wzajemnej kompilacji czynników tworzących środowisko świetlne, człowiek może doznawać bardzo różnych wrażeń. Może on odczuwać euforię lub zachwyt, doznawać przypływu energii, nie odczuwać żadnych bodźców (neutralność środowiska), mieć poczucie bezpieczeństwa lub zagrożenia, odczuwać przygnębienie lub niepokój. Stany te są również pochodną aktualnego stanu psychiki człowieka. Inaczej będzie odbierany widok wschodzącego słońca przez osobę pogodnie usposobioną a inaczej przez osobę przygnębianą. Funkcjonując w tak zmiennym środowisku świetlnym człowiek wykształcił w sobie mechanizm prawidłowego rozpoznawania barw, niezależnie od ich zniekształcenia w wyniku zmian czynników kształtujących środowisko świetlne. Przykładowo: człowiek wie, że jabłko jest czerwone niezależnie od tego, jaki odcień czerwieni ma jabłko w danych warunkach oświetlenia. Mechanizm ten nazywamy adaptacją chromatyczną. Umiejętność wytwarzania sztucznego oświetlenia człowiek posiadał stosunkowo wcześnie. Dzięki temu mógł on wydłużyć swoją aktywność dobową. Początkowo było to światło pochodzące głównie z procesu spalania różnych paliw (drewno, tłuszcz, węgiel czy gaz ziemny). Sztuczne oświetlenie i ciepło z nim związane zwiększyło szanse na przetrwanie i przewagę ewolucyjną w porównaniu do innych gatunków. Człowiek przez tysiąclecia przywykł do tego rodzaju sztucznego oświetlenia. Jego cechy to: niska temperatura barwowa najbliższa i ciągle widmo energetyczne w widzialnym obszarze promieniowania elektromagnetycznego. Do dziś ten rodzaj oświetlenia daje nam poczucie bezpieczeństwa i komfortu oraz kojarzy się nam z wypoczynkiem. Elektryczne źródła światła i środowisko świetlne, przez nie wytwarzane, mają dość krótką historię w aspekcie ewolucyjnej adaptacji człowieka do warunków oświetleniowych. Pierwszym, powszechnie stosowanym do oświetlenia wnętrz, elektrycznym źródłem światła było temperaturowe źródło światła (żarówka). Jego właściwości są bardzo zbliżone do wcześniej stosowanych źródeł światła. Światło emitowane przez temperaturowe źródła światła bardzo dobrze oddaje barwy. Do dziś światło temperaturowego źródła światła jest światłem odniesienia w kolorymetrii. W latach czterdziestych ubiegłego wieku pojawiły się źródła światła o innej naturze świecenia. Zaletą tych źródeł światła była przede wszystkim ich energooszczędność. Wadą w aspekcie fizjologii widzenia nieciągle widmo energetyczne w widzialnym obszarze promieniowania optycznego. Dzięki zjawisku addytywności barw (podstawowa zasada kolorymetrii) można stworzyć wrażenie, że światło emitowane przez takie źródła światła jest białe. Otoczenie oświetlone takim światłem nie jest już takie samo. Barwy obiektów nie są wysycone w taki sposób, do jakiego jesteśmy przyzwyczajeni, tj. wtedy, gdy są one oświetlone światłem naturalnym lub światłem pochodzącym od temperaturowego źródła światła. Przyczyną tego stanu jest brak emisji lub szczątkowa emisja energii w wielu obszarach promieniowania widzialnego. Środowisko świetlne, w którym przedmioty i ludzie mają nienaturalne barwy, może spowodować u osób w nim przebywających (podobnie jak w czasie niekorzystnych warunków oświetlenia naturalnego) niepokój, przygnębienie, dyskomfort, frustrację, fałszywą interpretację: wyglądu przedmiotu, znaczenia znaków, symboli lub stanu obiektu.

Nieciągłe widmo energetyczne światła emitowanego przez niektóre typy źródeł światła może również powodować częściową lub całkowitą utratę zdolności widzenia u osób z upośledzonym narządem wzroku.

Do tej pory człowiek miał głównie styczność z nietemperaturowymi źródłami światła, emitującymi światło o nieciągłym widmie energetycznym, głównie w miejscu pracy lub nauki, gdzie ich wpływ na środowisko świetlne, przynajmniej częściowo, był kompensowany naturalnym światłem dziennym. W domach powszechnie stosowano temperaturowe źródła światła. Obecnie wskutek nowych regulacji prawnych i rosnących kosztów zużywanej energii elektrycznej, nowoczesne, nietemperaturowe źródła światła są coraz częściej stosowane w domach.

Prawie równocześnie z chwilą wprowadzenia do użytkowania nietemperaturowych źródeł światła rozpoczęto prace badawcze, których celem było stworzenie metod oceny ich właściwości oddawania barw i poprawy tych właściwości. Już w 1948 roku Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa opublikowała pierwsze zalecenia w tym zakresie. Proces ten doprowadził do stworzenia metod oceny właściwości oddawania barw (np. Publikacja Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej Nr 13.3:1995 lub amerykański CQS), a także wprowadzenia wymagań minimalnych w aktach prawnych i normach dotyczących źródeł światła i projektowania oświetlenia.

Zgodnie z definicją podaną w Polskiej Normie PN-90/E-01005 [11], w rozdziale 845, termin: oddawanie barw ma następującą definicję:

„845-02-59 oddawanie barw – wpływ iluminantu na wrażenie barwy przedmiotów, świadomie lub podświadomie porównywane z wrażeniem barwy tych samych obiektów oświetlonych iluminantem odniesienia.”

W treści tej definicji znajduje się również odsyłacz do Publikacji CIE 13.2:1974 [12]. W najnowszym wydaniu Publikacji CIE 13.3:1995 termin ten jest zdefiniowany trochę inaczej:

„Colour rendering properties

Effect of the light source on the colour appearance of objects in comparison with their colour appearance under reference illuminant for specified conditions” [1].

Jest to ogólne pojęcie opisujące wpływ światła emitowanego przez źródło światła na wygląd barw obiektów porównywany z wyglądem barw tych samych obiektów oświetlonych innym (odniesieniowym) źródłem światła. Barwy obiektów oglądane kolejno w świetle o różnym widmowym rozkładzie energetycznym, mogą się znacząco różnić. Za przykład może posłużyć światło emitowane przez niskoprężne lampy sodowe. Światło emitowane z wyładowania łukowego w parach sodu o niskim ciśnieniu (około 0,7 Pa) jest praktycznie monochromatyczne. Jest ono emitowane w długościach fal 589,0 nm i 589,6 nm. Barwy takie, jak: zieleń, czerwień, żółć, granat lub fiolet oświetlone światłem takiej lampy tracą swój naturalny wygląd (obserwowany w świetle dziennym). Niektóre z tych barw będą prawie ciemne, inne będą jaśniejsze, jeszcze inne będą miały inny odcień (np. barwa ludzkiej skóry będzie postrzegana, jako sino-zielona).

Właściwość oddawania barw przez światło emitowane ze sztucznych źródeł światła nabrała również znaczenia, jako cecha jakościowa, po wprowadzeniu przez Unię Europejską regulacji dotyczących ochrony środowiska (tzw. Ekoprojekt). Celem tych regulacji jest zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, a co za tym idzie zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska, w tym zmniejszenie emisji CO₂.

Aktem prawnym, regulującym postępowanie państw członkowskich w tym zakresie, jest obecnie DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią.

Aktami prawnymi dotyczącymi bezpośrednio sprzętu oświetleniowego, w tym źródeł światła, są następujące Rozporządzenia Komisji Europejskiej:

1. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 244/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego oraz
2. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 859/2009 z dnia 18 września 2009 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 244/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu w zakresie promieniowania ultrafioletowego bezkierunkowych lamp do użytku domowego.
3. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 245/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp fluorescencyjnych bez wbudowanego statecznika, dla lamp wyładowczych dużej intensywności, a także dla stateczników i opraw oświetleniowych służących do zasilania takich lamp, oraz uchylające dyrektywę 2000/55/WE Parlamentu Europejskiego i Rady.
4. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 347/2010 z dnia 21 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie Komisji (WE) nr 245/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp fluorescencyjnych bez wbudowanego statecznika, lamp wyładowczych dużej intensywności oraz stateczników i opraw oświetleniowych służących do zasilania takich lamp.
5. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 1194/2012 z dnia 12 grudnia 2012 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2009/125/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia.

W przypadku źródeł światła, bezpośrednim skutkiem ograniczenia poboru energii jest stopniowa eliminacja z rynku żarówek, które charakteryzują się ciągłym widmem energetycznym w obszarze promieniowania widzialnego (zbliżonym do rozkładu energetycznego ciała czarnego) i zastępowanie ich fluorescencyjnymi lampami samostatecznikowymi (światłówkami kompaktowymi) lub półprzewodnikowymi źródłami światła do ogólnych celów oświetleniowych (lampami LED), których widmowe rozkłady energetyczne różnią się znacznie od widmowych rozkładów energetycznych żarówek i światła dziennego. W wyżej wymienionych regulacjach określono minimalne wymagania dotyczące właściwości oddawania barw dla zamienników klasycznych żarówek. Wskaźnikiem kryterialnym, przyjętym w tych dokumentach, jest ogólny wskaźnik oddawania barw R_a . Metodę obliczania wskaźnika R_a podaje Publikacja CIE 13.3:1995. Jego wartość dla zamienników żarówek nie powinna być niższa niż 80. Jest to swego rodzaju kompromis pomiędzy wymaganiami związanymi z jakością światła, a możliwościami technologicznymi i ich opłacalnością.

W praktyce, ze względu na kryteria oceny określone dla organów nadzoru rynku (w rozporządzeniach Komisji Europejskiej nr 244 i 245), dla konsumentów mogą być dostępne źródła światła z ogólnym wskaźnikiem oddawania barw ≥ 72 , co nie jest pocieszające.

Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowego Komitetu Oświetleniowego podanymi w Publikacji CIE 13.3:1995 ocena stopnia zgodności psychofizycznego wrażenia barwy powinna być wykonywana za pomocą metody polegającej na porównaniu barw zestawu ośmiu próbek wybranych z atlasu barw Munsella, oświetlanych kolejno światłem badanym i światłem wzorcowym, i obliczeniu ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . Publikacja ta dopuszcza stosowanie do oceny jakości oddawania barw również inne próbki barw, z zastrzeżeniem, że powinny być one ściśle określone za pomocą widmowych współczynników luminancji energetycznej.

2. ŹRÓDŁA BŁĘDÓW WYSTĘPUJĄCE W PROCESIE POMIARU WIDMOWEGO ROZKŁADU ENERGETYCZNEGO I OBLICZANIA WARTOŚCI OGÓLNEGO WSKAŹNIKA ODDAWANIA BARW R_a

Źródła błędów zasadniczo można podzielić na dwie grupy:

- wewnętrzne, zależne od przyjętych procedur obliczeniowych oraz od precyzji obliczeń,
- zewnętrzne, niezależne od programu obliczeniowego.

Poniżej omówiono większość czynników wpływających na otrzymywane wyniki obliczeń.

2.1. Precyzja i rozdzielczość obliczeń

Przyjmując, że wczytany do programu widmowy rozkład mocy promieniowania nie jest obarczony błędem, to o dokładności wyników obliczeń będą decydowały przede wszystkim:

- dokładność wprowadzonych funkcji kolorymetrycznych $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$,
- dokładność obliczeń wewnętrznych,
- zaokrąglenia otrzymanych wyników obliczeń,
- rozdzielczość obliczeń wynikająca z $\Delta\lambda$ wczytanego rozkładu energetycznego.

Wartości funkcji kolorymetrycznych dla 2-go standardowego obserwatora kolorymetrycznego podano w Publikacji CIE 15:2004 [2]. Podano wartości tych funkcji dla przedziału $\Delta\lambda = 1$ nm oraz dla przedziału $\Delta\lambda = 5$ nm. Z analizy podanych w Publikacji danych widać, że są to te same funkcje, oryginalnie podane dla $\Delta\lambda = 1$ nm. Wartości funkcji kolorymetrycznych dla $\Delta\lambda = 5$ nm wyznaczono przez usunięcie wartości pośrednich. Wartości funkcji kolorymetrycznych, o ile wprowadzono je z oryginalną dokładnością nie wnoszą istotnego błędu. Jednak suma mnożników $\sum_{380}^{780} \bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$, $\sum_{380}^{780} \bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$ i $\sum_{380}^{780} \bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$ odpowiednio dla $\Delta\lambda = 1$ nm i $\Delta\lambda = 5$ nm nie jest identyczna wartości podane są w tabeli 1.

TABELA 1

Wpływ interpolacji na wynik obliczeń składowych trójchromatycznych

$\Delta\lambda$ [nm]	$\sum_{380}^{780} \bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$	$\sum_{380}^{780} \bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$	$\sum_{380}^{780} \bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$
1	106,8550853	106,85642628	106,84608243
5	106,8576200	106,85663500	106,85770000
Δ	-0,00253470	-0,00020872	-0,01161757

W celu sprawdzenia jaki wpływ na wyniki obliczeń kolorymetrycznych mają te różnice, do programu obliczeniowego wprowadzono widmowy rozkład równoenergetyczny. Wyniki obliczeń kolorymetrycznych dla podanych przedziałów $\Delta\lambda = 1$ nm i $\Delta\lambda = 5$ nm zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Różnice wyników obliczeń dla promieniowania równoenergetycznego

$\Delta\lambda$ nm	X	Y	Z	x	y	T_{cp} K
1	100,007671	100	100,033255	0,333313	0,333288	5456,38
5	100,009261	100	100,01252	0,3333400	0,333309	5455,16
Δ	0,00159	0	0,020735	0,00002657	0,00002123	1,22

Różnica otrzymanych wyników wynika wyłącznie z różnych procedur obliczeniowych, przyjętych dla $\Delta\lambda = 1$ nm i $\Delta\lambda = 5$ nm. W przypadku przedziału $\Delta\lambda = 5$ nm brakuje informacji o pośrednich wartościach funkcji kolorymetrycznych i to właśnie jest powodem otrzymanej wartości błędu. Można uznać, że wartości składowych trójchromatycznych i pozostałych wskaźników wyznaczone przy $\Delta\lambda = 1$ nm są wartościami dokładniejszymi. Nie jest możliwe dokładne wyznaczenie wartości błędu dla $\Delta\lambda = 1$ nm w odniesieniu do wartości poprawnych (przy $\Delta\lambda \rightarrow 0$), ponieważ funkcje kolorymetryczne są wynikiem eksperymentu i nie ma dokładnego modelu matematycznego opisującego te funkcje. Otrzymane różnice wartości składowych trójchromatycznych dla rozkładu równoenergetycznego nie są znaczące dla dalszych obliczeń kolorymetrycznych. Wskazują jednak, że istnieje wysokie prawdopodobieństwo zwiększenia się wartości błędów obliczeniowych dla $\Delta\lambda = 5$ nm w funkcji kształtu rozkładu widmowego badanego źródła światła. Największych różnic wyników otrzymanych dla $\Delta\lambda = 1$ nm i $\Delta\lambda = 5$ nm można spodziewać się w przypadku rozkładów widmowych w których występują dominujące linie emisyjne, np. w widmach lamp fluorescencyjnych lub wysokoprężnych lamp wyładowczych. Przykłady różnic przedstawione są w tabelach 3, 4, 5 i 6.

TABELA 3

Różnice wyników obliczeń dla widmowego rozkładu energetycznego iluminantu A zmierzonego w przedziałach $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$

$\Delta\lambda$ nm	X	Y	Z	x	y	T_{cp} K
1	109,85	100	35,59	0,4476	0,4074	2855,58
5	109,85	100	35,59	0,4476	0,4074	2855,53
Δ	0	0	0	0	0	0,05

TABELA 4

Różnice wyników obliczeń dla widmowego rozkładu energetycznego iluminantu D65 zmierzonego w przedziałach $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$

$\Delta\lambda$ nm	X	Y	Z	x	y	T_{cp} K
1	95,05	100	108,88	0,3127	0,3290	6502,75
5	95,05	100	108,89	0,3127	0,3290	6502,98
Δ	0	0	-0,1	0	0	-0,23

TABELA 5

Różnice wyników obliczeń dla widmowego rozkładu energetycznego lampy fluorescencyjnej zmierzonego w przedziałach $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$

$\Delta\lambda$ nm	X	Y	Z	x	y	T_{cp} K
1	98,58	100	59,19	0,3824	0,3879	4027
5	98,64	100	57,90	0,3845	0,3898	3987
Δ	-0,06	0	1,29	-0,0021	-0,0019	40

TABELA 6

Wyniki obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw dla omawianej lampy fluorescencyjnej

$\Delta\lambda$	R_a	ΔR_a
1 nm	59,8	3,1
5 nm	62,9	

Z powyższych przykładów widać, że dla „łagodnych” rozkładów widmowych błędy wynikające z rozdzielczości obliczeń są mało istotne, natomiast dla rozkładów widmowych lamp fluorescencyjnych i wysokoprężnych lamp wyładowczych różnica wyników obliczeń jest już bardzo duża. Różnica ta powstaje w wyniku utraty części informacji o mocy emitowanej w pośrednich długościach fal przedziału $\Delta\lambda$ oraz w wyniku utrzymania stałych wartości funkcji kolorymetrycznych w przedziale $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$.

Wyznaczona w procesie obliczeniowym wartość temperatury barwowej najbliższej bezpośrednio oddziałuje na wyniki obliczeń szczególnych wskaźników oddawania barw

i ogólnego wskaźnika oddawania barw. Można oczekiwać że wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw wyznaczonego dla rozkładów widmowych pomierzonych w przedziałach 5 nm będzie również obarczona błędem w odniesieniu do rozkładu widmowego pomierzonego w przedziałach $\Delta\lambda = 1$ nm. W tabeli 6 zestawiono wyniki obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw dla lampy fluorescencyjnej.

Na tej podstawie można stwierdzić, że błąd wartości T_{cp} i w konsekwencji błąd wartości R_a jest praktycznie niemożliwy do oszacowania dla rozkładów widmowych zawierających wiele quasi monochromatycznymi linii emisyjnych. Otrzymane wartości temperatury barwowej najbliższej dla $\Delta\lambda = 1$ nm i $\Delta\lambda = 5$ nm mogą się różnić nawet o kilkaset kelwinów. Wartość błędu zależy silnie od stopnia utraty informacji o kształcie widmowego rozkładu energetycznego badanej lampy. Wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw, która jest średnią obliczoną z ośmiu szczególnych wskaźników oddawania barw, może się różnić o kilka a nawet kilkanaście jednostek.

Za przykład mogą posłużyć wyniki obliczeń dla świetlówki o deklarowanej temperaturze barwowej najbliższej około 12000 K. Dostarczone przez producenta dane spektrometryczne zostały zmierzone w przedziałach $\Delta\lambda = 1$ nm. Deklarowana wartość T_{cp} dla tej lampy przy $\Delta\lambda = 1$ nm jest następująca:

$$T_{cp} = 12436,64 \text{ K}$$

Obliczona w programie obliczeniowym CIE13-3D wartość T_{cp} dla rozkładu widmowego otrzymanego od producenta ma wartość:

$$T_{cp} = 10641,15 \text{ K}$$

Do programu CIE13-3D, który Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa dołącza do Publikacji CIE 13.3:1995, wprowadzono dane pomiarowe zapisane w przedziałach $\Delta\lambda = 1$ nm. Analiza i symulacje wykazały, że program ten odrzuca wartości pośrednie i wykonuje obliczenia tylko dla 5 nm przedziałów długości fal. Różnica wyników dla $\Delta\lambda = 1$ nm i 5 nm wynosi około 1800 K. Wynika ona z utraty informacji o kształcie rozkładu widmowego oraz z przyjęcia stałych wartości funkcji kolorymetrycznych dla całego przedziału $\Delta\lambda = 5$ nm i z pominięcia pośrednich wartości tych funkcji.

Dla źródeł światła o stosunkowo „gładkich” rozkładach widmowych bez linii dominujących wyniki obliczeń są o wiele dokładniejsze dla $\Delta\lambda = 1$ nm i 5 nm. W tabeli 9 przedstawiono wyniki obliczeń dla iluminantów: A i D65.

WNIOSEK

Należy ściśle przestrzegać zaleceń dotyczących pomiarów spektrometrycznych podanych w Publikacji CIE 15:2004. Wg tego dokumentu widmowe rozkłady energetyczne z wieloma dominującymi liniami emisyjnymi, powinny być mierzone w przedziałach $\Delta\lambda \leq 2$ nm. Ogólnie można stwierdzić, że obliczenia dla źródeł światła o łagodnym kształcie rozkładu widmowego (np. żarówek), których widmowe rozkłady zmierzono w przedziałach $\Delta\lambda = 5$ nm można uznać za wiarygodne, natomiast dla pozostałych źródeł światła wyniki obliczeń będą obarczone błędem grubym o trudnej do przewidzenia wartości. W takich przypadkach obliczenia powinny być wykonywane w oparciu o rozkłady widmowe pomierzone zgodnie z zaleceniami Publikacji CIE 15:2004, a program obliczeniowy nie powinien odrzucać wczytanych informacji (wartości pośrednich, dopasowując w ten sposób dane pomiarowe do swoich możliwości).

TABELA 7

Wyniki obliczeń dla świetlówki o $T_{cp} = 12000$ K w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1$ nm i 5 nm

	$\Delta\lambda = 1$ nm	$\Delta\lambda = 5$ nm	Δ
T_{cp}	12436,64	10641,15	1795,9
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_1	74,2	83,0	-8,8
R_2	83,8	93,9	-10,1
R_3	85,8	91,3	-5,5
R_4	77,7	82,0	-4,3
R_5	78,5	86,3	-7,8
R_6	78,3	91,3	-13
R_7	84,9	86,0	-1,1
R_8	65,0	67,5	-2,5
R_9	-28,3	-6,5	-21,8
R_{10}	57,8	86,7	-28,9
R_{11}	72,6	80,4	-7,8
R_{12}	73,6	86,9	-13,3
R_{13}	76,9	86,2	-9,3
R_{14}	91,6	95,0	-3,4
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	78,5	85,2	-6,7

TABELA 8

Wyniki obliczeń dla świetlówki o $T_{cp} = 6500$ K w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1$ nm i 5 nm

	$\Delta\lambda = 1$ nm	$\Delta\lambda = 5$ nm	Δ
T_{cp}	6439,21	6724,35	-285,14
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_1	67,2	66,7	0,5
R_2	81,6	79,4	2,2
R_3	90,0	85,4	4,6
R_4	71,0	71,0	0,0
R_5	71,5	70,6	0,9
R_6	76,6	73,4	3,2
R_7	82,4	82,6	-0,2
R_8	52,6	54,5	-1,9
R_9	-52,8	-51,5	-1,3
R_{10}	55,5	48,5	7,0
R_{11}	64,5	63,5	1
R_{12}	69,7	65,9	3,8
R_{13}	70,7	69,7	1
R_{14}	93,7	91,1	2,6
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	74,1	73,0	1,1

TABELA 9

Wyniki obliczeń dla iluminantu A pomierzonego w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i 5 nm

	$\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$	$\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$	Δ
T_{cp}	2855,54	2855,53	-0,01
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_1	100	100	0
R_2	100	100	0
R_3	100	100	0
R_4	100	100	0
R_5	100	100	0
R_6	100	100	0
R_7	100	100	0
R_8	100	100	0
R_9	100	100	0
R_{10}	100	100	0
R_{11}	100	100	0
R_{12}	100	100	0
R_{13}	100	100	0
R_{14}	100	100	0
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	100	100	0

TABELA 10

Wyniki obliczeń dla iluminantu D65 pomierzonego w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i 5 nm

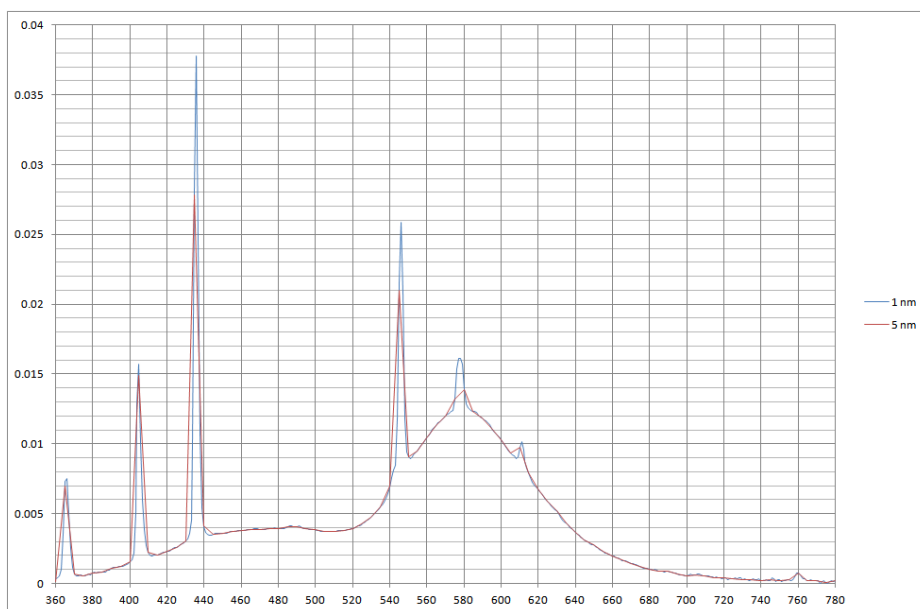
	$\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$	$\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$	Δ
T_{cp}	6502,71 K	6502,98 K	0,27 K
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_{01}	100	100	0
R_{02}	100	100	0
R_{03}	100	100	0
R_{04}	100	100	0
R_{05}	100	100	0
R_{06}	100	100	0
R_{07}	100	100	0
R_{08}	100	100	0
R_{09}	100	100	0
R_{10}	100	100	0
R_{11}	100	100	0
R_{12}	100	100	0
R_{13}	100	100	0
R_{14}	100	100	0
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	100	100	0

2.2. Sposób zliczania energii w przedziałach $\Delta\lambda$

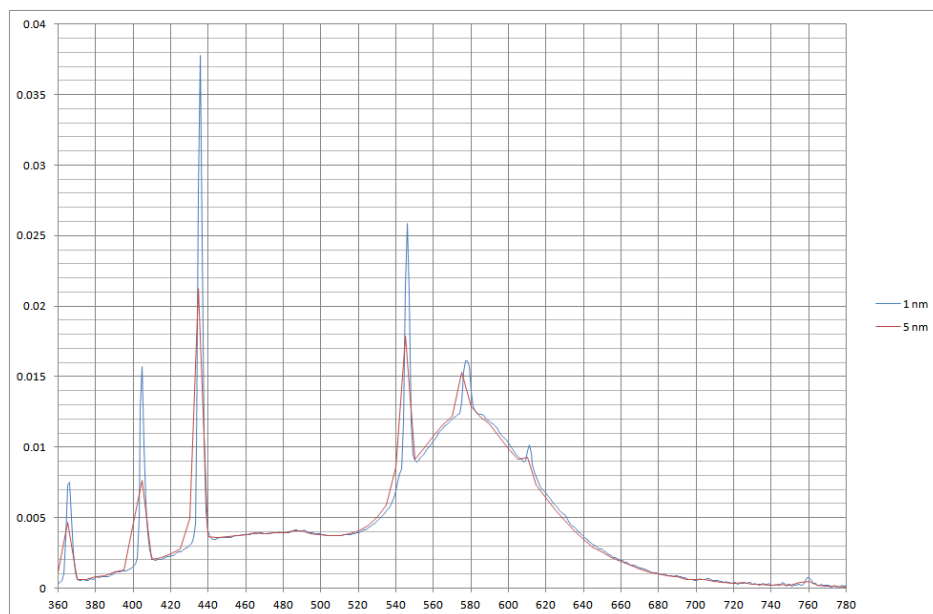
Do omówionego błędu wynikającego z utraty informacji o kształcie rozkładu należy dodać błąd wynikający ze sposobu zliczania energii wypromieniowanej w przedziałach $\Delta\lambda$. Zależnie od oprogramowania sterującego procesem pomiaru spektrometrycznego mogą być stosowane następujące procedury zliczania energii w przedziałach $\Delta\lambda$:

1. Sumowanie i/lub uśrednianie energii emitowanych w wewnętrznych długościach fal przedziału $\Delta\lambda$,
2. Pomiar i zapis energii emitowanych wyłącznie w granicznych liniach przedziału $\Delta\lambda$,
3. Kombinacja jednego z wyżej wymienionych sposobów pomiaru połączona z wygładzaniem kształtu przebiegu lub filtrowaniem szumów.

Sumowanie mocy wypromieniowanej lub natężenia napromienienia połączone lub nie z uśrednianiem, zazwyczaj jest stosowane w klasycznych monochromatorach. Zapis mocy wypromieniowanej wyłącznie w granicznych liniach przedziału $\Delta\lambda$ stosowany jest często w spektrometrach wyposażonych w matryce CCD. Za przykład może posłużyć spektrometr firmy StellarNet. Na rysunku 1 przedstawiono widmowe rozkłady energetyczne tej samej lampy pomierzone i zapisane w przedziałach $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ i $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$.



Rys. 1. Obraz widmowego rozkładu energetycznego tej samej lampy, zmierzony spektrometrem firmy StellarNet w przedziałach długości fal $\Delta\lambda$: 1 nm i 5 nm



Rys. 2. Obraz widmowego rozkładu energetycznego tej samej lampy, zmierzony spektrometrem firmy StellarNet w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ oraz monochromatorem w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$

Wyniki obliczeń składowych trójchromatycznych (X , Y , Z), współrzędnych punktu chromatyczności (x , y), temperatury barwowej najbliższej (T_{cp}), różnicę chromatyczności między źródłem badanym a podniesieniowym (ΔC), szczególnych wskaźników oddawania barw (R_i) oraz ogólnego wskaźnika oddawania barw (R_a) zamieszczona w tabelach 11 i 12.

TABELA 11

Wyniki obliczeń kolorymetrycznych dla wskazanych przypadków

$\Delta\lambda$	X	Y	Z	x	y	T_{cp}	ΔC
nm	---	---	---	---	---	K	---
1 (SpectaWiz)	98,58	100,00	59,19	0,3824	0,3879	4026,95	0,00458
5 (SpectaWiz (S))	98,68	100,00	63,35	0,3766	0,3816	4139,91	0,00342
5 (Monochromator (M))	96,54	100,00	58,67	0,3783	0,3918	4160,86	0,00755
$\Delta(S)$	-0,1000	0,0000	-4,1600	0,0058	0,0063	-112,96	0,0012
$\Delta(M)$	2,0400	0,0000	0,5200	0,0041	-0,0039	-133,91	-0,0030

TABELA 12

Wyniki obliczeń wskaźników oddawania barw dla wskazanych przypadków

	$\Delta\lambda = 1\text{nm}$	$\Delta\lambda = 5\text{ nm}$ (SpectraWiz)	$\Delta\lambda = 5\text{ nm}$ (Monochromator)
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_1	50,8	52,2	49,0
R_2	72,9	72,6	71,0
R_3	88,2	85,8	86,8
R_4	52,1	54,1	51,3
R_5	53,0	54,3	51,5
R_6	60,9	60,3	58,7
R_7	72,7	73,2	73,2
R_8	27,6	30,3	27,1
R_9	-99,6	-95,5	-106,4
R_{10}	35,8	33,9	31,7
R_{11}	38,5	40,5	37,5
R_{12}	42,4	42,4	39,5
R_{13}	55,2	56,3	53,2
R_{14}	92,8	91,5	92,0
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	59,8	60,4	58,6

2.3. Obróbka cyfrowa sygnału mierzonego

W spektrometrach, w których detektorem jest matryca CCD istnieją narzędzia do uśredniania lub wygładzania obrazu rozkładu energetycznego. Narzędzi tych należy używać świadomie, ponieważ zmodyfikowane widmowe rozkłady energetyczne zapisywane są do pliku pomiarowego. Zależnie od potrzeb można wygładzić obserwowany rozkład widmowy. W przypadku łagodnych rozkładów widmowych (np. widm temperaturowych źródeł światła) błąd wynikający z zafalszowania rzeczywistego rozkładu widmowego można uznać za pomijalny, natomiast w przypadku rozkładów widmowych z wieloma quasi monochromatycznymi liniami emisyjnymi uśrednianie może spowodować, że widmowy rozkład mocy promieniowania, mimo że zapisany w przedziałach $\Delta\lambda = 1\text{ nm}$, będzie raczej podobny do rozkładu mierzonego w przedziałach $\Delta\lambda = 5\text{ nm}$. Istnieje też niebezpieczeństwo całkowitego zniekształcenia rzeczywistego widmowego rozkładu energetycznego promieniowania badanego źródła światła. Wielkość błędu zależy od wiedzy i doświadczenia wykonującego pomiar.

Poniżej, dla przykładu, omówiono dostępne w programie SpectraWiz metody wygładzania sygnału mierzonego. Należy zaznaczyć, że metody te mogą być stosowane jednocześnie, a więc ich oddziaływanie na mierzony widmowy rozkład energetyczny może się nakładać.

METODA BOXCAR PIXEL

Wartość 0 oznacza wyłączenie metody. Ma cztery poziomy wygładzania: od 0 do 4 odpowiadające uśrednianiu odpowiednio => 0/5/9/17/33 punktów. Metoda polega na zastosowaniu średniej ruchomej do punktu mierzonego i sąsiednich punktów. Na przykład poziom 1 oznacza uśrednienie każdego 5 punktów, po dwa punkty z prawej i lewej strony oraz punktu środkowego.

METODA SAVITZKY'EGO I GOLAY'A

Ma cztery stopnie wygładzania od 0 do 4 odpowiadające uśrednianiu odpowiednio => 0/9/13/17/21 punktów. Algorytm uśredniający zapobiega utracie informacji o wartościach energii emitowanej w quasi monochromatycznych liniach dominujących. Algorytm pierwszy raz opublikowano w Analytical Chemistry – July 1964.

METODA UŚREDNIANIA WYKŁADNICZEGO

Ma 9 poziomów. Algorytm kontroluje wygładzanie wyświetlanego rozkładu widmowego za pomocą uśredniania wykładniczego.

2.4. Niedopasowanie przedziału sumowania

Publikacja CIE 15:2004 [2] zaleca aby pomiary kolorymetryczne były wykonywane w pełnym zakresie promieniowania widzialnego, tj. w przedziale długości fal od 360 nm do 830 nm. Do oceny właściwości oddawania barw źródeł światła analizowany przedział długości fal powinien być nie mniejszy niż 380 nm – 780 nm. Jeżeli widmowy rozkład energetyczny pomierzono w mniejszym przedziale długości fal, przy czym ograniczenie często nie jest symetryczne, to obliczone wartości składowych trójkromatycznych będą błędne. Pozostałe wskaźniki kolorymetryczne i temperatura barwowa najbliższa również. W tabelach 13 i 14 zestawiono dwa przykłady obliczeń zniekształconych przez ograniczenie przedziału sumowania.

TABELA 13

Wyniki obliczeń kolorymetrycznych dla wskazanych przypadków

$\Delta\lambda$	X	Y	Z	x	y	T_{cp}	ΔC
nm	---	---	---	---	---	K	---
1 (360 - 830) nm	109,85	100,00	35,58	0,4476	0,4074	2855,54	$8 \cdot 10^{-9}$
1 (400 - 780)nm	109,84	100,00	35,52	0,4477	0,4076	2855,28	$38 \cdot 10^{-6}$
1 (380 - 760)nm	109,85	100,00	35,58	0,4476	0,4075	2855,68	$5 \cdot 10^{-6}$
Δ Górne ograniczenie	0,01	0,00	0,06	-0,0001	-0,0002	0,26	---
Δ Dolne ograniczenie	0,00	0,00	0,00	0,0000	-0,0001	-0,14	---

TABELA 14

Wyniki obliczeń wskaźników oddawania barw dla wskazanych przypadków

	360 nm ÷ 830 nm	400 nm ÷ 780 nm	380 nm ÷ 760 nm
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_1	100	100,0	100,0
R_2	100	100,0	100,0
R_3	100	100,0	100,0
R_4	100	99,9	100,0
R_5	100	100,0	100,0
R_6	100	99,9	100,0
R_7	100	100,0	100,0
R_8	100	99,9	100,0
R_9	100	100,0	100,0
R_{10}	100	100,0	100,0
R_{11}	100	100,0	100,0
R_{12}	100	99,9	99,9
R_{13}	100	99,9	100,0
R_{14}	100	100,0	100,0
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	100	100	100

TABELA 15

Wyniki obliczeń dla lampy fluorescencyjnej omawianej w poprzednim podrozdziale

$\Delta\lambda$	X	Y	Z	x	y	T_{cp}	ΔC
nm	---	---	---	---	---	K	---
$\mathbf{1}$ (360 - 830) nm	98,58	100,00	59,19	0,3824	0,3879	4026,95	0,00458
$\mathbf{1}$ (400 - 780)nm	98,57	100,00	59,13	0,3825	0,3881	4026,08	0,00461
$\mathbf{1}$ (380 - 760)nm	98,58	100,00	59,19	0,3824	0,3879	4026,88	0,00458
Δ Górne ograniczenie	0,01	0,00	0,06	-0,0001	-0,0002	0,87	---
Δ Dolne ograniczenie	0,00	0,00	0,00	0,0000	-0,0001	-0,07	---

TABELA 16

Wyniki obliczeń wskaźników oddawania barw dla wskazanych przypadków

	360 nm ÷ 830 nm	400 nm ÷ 780 nm	380 nm ÷ 760 nm
Szczególne wskaźniki oddawania barw R_i			
R_{01}	50,8	50,8	50,8
R_{02}	72,9	72,9	72,9
R_{03}	88,2	88,2	88,2
R_{04}	52,1	52,1	52,1
R_{05}	53,0	53,0	53,0
R_{06}	60,9	60,9	60,9
R_{07}	72,7	72,7	72,7
R_{08}	27,6	27,6	27,6
R_{09}	-99,6	-99,6	-99,6
R_{10}	35,8	35,9	35,8
R_{11}	38,5	38,4	38,5
R_{12}	42,4	42,4	42,4
R_{13}	55,2	55,2	55,2
R_{14}	92,8	92,9	92,8
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a			
R_a	59,8	59,8	59,8

Różnice obliczeń nie są znaczące, jednak mogą być one większe w przypadku innych rozkładów widmowych. Wielkość błędu zależy od ilości utraconej informacji.

2.5. Ekstrapolacja wyników pomiaru

Nie zaleca się wykonywania ekstrapolacji wyników pomiaru. Stosuje się ją zazwyczaj gdy przedział sumowania jest mniejszy od wymaganego. Dla dobrze znanych rodzajów rozkładów widmowych, np. rozkładu temperaturowych źródeł światła, ekstrapolacja nie powinna powodować istotnych błędów. W przypadku lamp fluorescencyjnych lub wysokoprężnych lamp wyładowczych ekstrapolacja może spowodować, że ekstrapolowany widmowy rozkład energetyczny będzie znacząco różnił się od rzeczywistego rozkładu energetycznego takich lamp.

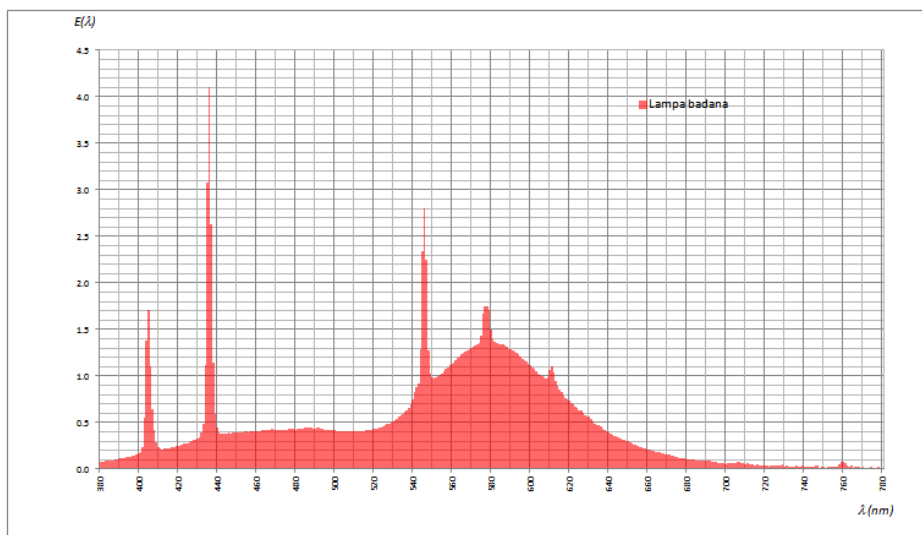
2.6. Interpolacja wyników pomiaru

Tak jak w przypadku ekstrapolacji błąd wyznaczonej wartości pośredniej z dwóch sąsiednich wartości rozkładu widmowego będzie mało znaczący w przypadku łagodnych rozkładów widmowych. W przypadku lamp wyładowczych nie zaleca się stosowania interpolacji.

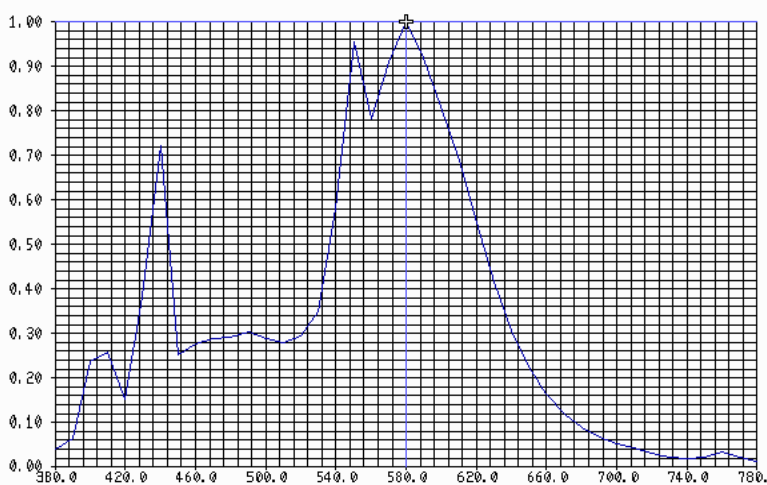
2.7. Spektralna szerokość wiązki – szerokość połówkowa rozkładu energii wiązki wychodzącej z monochromatora

Szerokość połówkowa rozkładu energii wiązki wychodzącej z monochromatora jest to spektralna szerokość wiązki padającej na fotodetektor monochromatora. Sygnał

wynikowy rejestrowany przez fotodiodnik jest sumą sygnałów emitowanych w poszczególnych liniach szerokości wiązki. Szerokość wiązki powinna być ściśle skorelowana z przedziałem $\Delta\lambda$, w którym zliczana jest moc promieniowania. W przypadku gdy spektralna szerokość wiązki jest większa od przedziału $\Delta\lambda$, to otrzymamy zafalszowany rozkład widmowy badanego obiektu. Przykład wizualizacji takiego pomiaru pokazano na rysunkach 3 i 4.

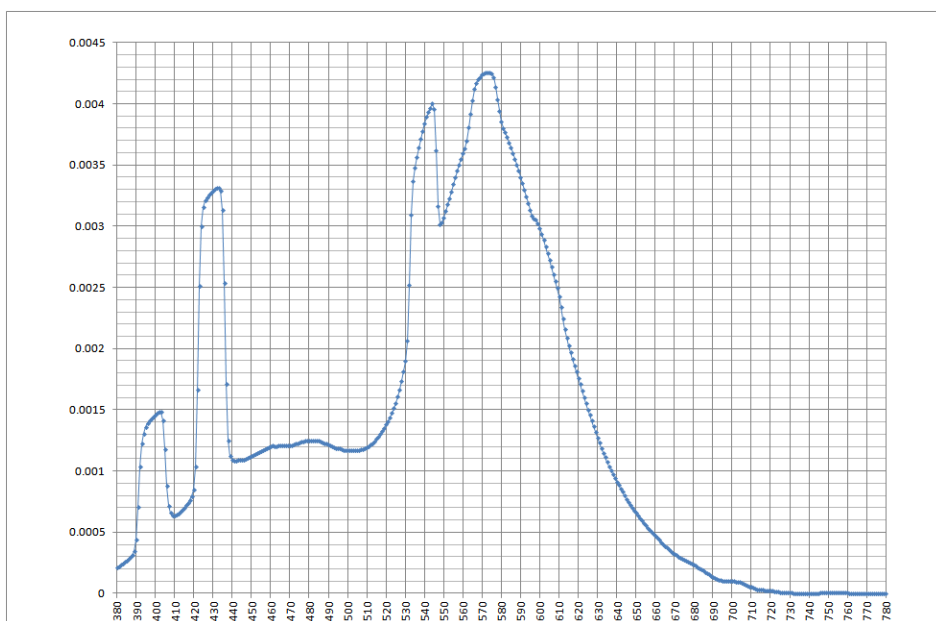


Rys. 3. Widmowy rozkład energetyczny lampy fluorescencyjnej zmierzony spektrometrem firmy StellarNet w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1nm$



Rys. 4. Widmowy rozkład energetyczny tej samej lampy, zmierzony za pomocą monochromatora w przedziałach długości fal $\Delta\lambda = 1nm$

Są to widmowe rozkłady energetyczne tej samej lampy fluorescencyjnej. Oba pomierzono w przedziałach $\Delta\lambda = 1$ nm. Na rysunku 4 quasi monochromatyczne linie emisyjne są prawie niewidoczne. Zmieniły się również proporcje rozkładu. Symulacja polegająca na sumowaniu energii w przedziałach długości fal wykazała, że spektralna szerokość wiązki ustawiona w monochromatorze w czasie pomiaru wynosiła pomiędzy 10 nm a 20 nm. Na rysunku 5 przedstawiono obraz graficzny symulacji.



Rys. 5. WYNIK Symulacji rozkładu po zwiększeniu spektralnej szerokości wiązki

Różnice wyznaczonej temperatury barwowej najbliższej i szczególnych wskaźników oddawania barw zestawiono w tabelach 17 i 18.

TABELA 17

Wyniki obliczeń temperatury barwowej najbliższej

	T_{cp} K
Monochromator	3869,8
Spektrometr StellarNet	4026,95
ΔT_{cp}	-157,15

TABELA 18

Wyniki obliczeń wskaźników oddawania barw dla wskazanych przypadków

	Spektrometr StellarNet	Monochromator
R_a	59,8	61
R_{01}	50,8	52
R_{02}	72,9	74
R_{03}	88,2	90
R_{04}	52,1	53
R_{05}	53,0	54
R_{06}	60,9	63
R_{07}	72,7	73
R_{08}	27,6	28
R_{09}	-99,6	-91
R_{10}	35,8	40
R_{11}	38,5	39
R_{12}	42,4	44
R_{13}	55,2	57
R_{14}	92,8	94

2.8. Temperatura barwowa najbliższa

Kolejnym źródłem błędów wpływającym na wyniki obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw jest dokładność wyznaczenia temperatury barwowej najbliższej T_{cp} . Wszystkie wyżej opisane błędy wynikające z metody obliczeniowej i jakości pomiaru rozkładu energetycznego badanego źródła światła wpływają na poprawność wyznaczenia składowych trójchromatycznych i współrzędnych chromatyczności x , y oraz u , v . W oparciu o obliczone współrzędne u , v badanego źródła światła poszukuje się temperatury barwowej ciała czarnego, którego światło ma chromatyczność taką samą lub podobną jak chromatyczność badanego światła. W zależności od przyjętej metody poszukiwania temperatury barwowej światła ciała czarnego, dla której spełnione jest powyższe założenie otrzymujemy wyniki, które mogą znacznie różnić się między sobą. W konsekwencji otrzymamy różne wartości szczególnych wskaźników oddawania barw i ogólnego wskaźnika oddawania barw.

W tabelach 19 i 20 dla porównania przedstawiono wyniki obliczeń temperatury barwowej najbliższej wykonanych metodą kaskadową, zastosowaną w autorskim programie obliczeniowym oraz metodą promienia wodzącego zastosowaną w programie SpectraWiz. W obu przypadkach użyto dokładnie takich samych danych wejściowych. Były to widmowe rozkłady energetyczne standardowych iluminantów CIE (A, D50, D65, D75) o znanych, ściśle określonych, współrzędnych chromatyczności i temperaturach barwowych najbliższych.

TABELA 19

Dane odniesienia dla iluminantów wzorcowych CIE

	Iluminant A	Iluminant D50	Iluminant D65	Iluminant D75
X	109,85	96,42	95,04	94,97
Y	100,00	100,00	100,00	100,00
Z	35,58	82,51	108,88	122,61
x	0,44758	0,34567	0,31272	0,29903
y	0,40745	0,35851	0,32903	0,31488
u'^l	0,25597	0,20916	0,19783	0,19353
v'	0,52429	0,48808	0,46834	0,45853

TABELA 20

Wyniki porównania dla iluminantów wzorcowych

		Program autorski	Program SpectraWiz	Δ
Iluminant A	x	0,4476	0,448	-0,0004
	y	0,4074	0,407	0,0004
	T_{cp}	2855,54	2853	2,54
Iluminant D50	x	0,3457	0,346	-0,0003
	y	0,3585	0,358	0,0005
	T_{cp}	5001,71	5086	-84,29
Iluminant D65	x	0,3127	0,313	-0,0003
	y	0,3290	0,329	0
	T_{cp}	6502,71	6660	-157,29
Iluminant D75	x	0,2990	0,346	-0,047
	y	0,3149	0,358	-0,0431
	T_{cp}	7504,83	7712	-207,17

Na podstawie danych zawartych w tabeli 20 można stwierdzić, że wartość różnicy obliczonej wartości T_{cp} wzrasta w funkcji temperatury barwowej badanego źródła światła. Wartość różnicy zależy od przyjętej metody obliczania T_{cp} . Inne metody obliczeniowe mogą dawać inne różnice wyników. Wartość różnicy może być dodatnia albo ujemna. Poza samą metodą wyszukiwania temperatury barwowej najbliższej o dokładności jej wyznaczenia decydują również:

1. Wartości stałych fizycznych przyjętych w równaniu Plancka.
2. Zaokrąglenia wyników obliczeń zarówno współrzędnych u , v badanego źródła światła jak i ciała czarnego.
3. Zaokrąglenia i dokładność wyników obliczeń linii izotemperaturowych, kątów nachylenia i / lub długości odcinka ΔC (zależnie od metody wyszukiwania).

¹ Podane współrzędne są współrzędnymi przestrzeni barw CIE z 1976 roku.

3. WNIOSKI I UWAGI

Obliczenia ogólnego wskaźnika oddawania barw można wykonywać w zasadzie automatycznie. Natomiast interpretacja tych wyników wymaga odpowiedniego przygotowania i wiedzy. Przedstawiono problem otrzymywania różnych wartości wielkości kolorymetrycznych, szczególnych wskaźników oddawania barw i ogólnego wskaźnika oddawania barw w funkcji szerokości przedziałów długości fal $\Delta\lambda$, w których mierzono widmowy rozkład energetyczny lub wykonywano obliczenia. Aby otrzymać wiarygodne wyniki obliczeń należy pamiętać o następujących zasadach:

1. Dane pomiarowe wprowadzone do programu obliczeniowego powinny być pomierzone zgodnie z zaleceniami Publikacji CIE 15:2004 [2]. Źródła światła, których rozkłady widmowe są dobrze znane i nie zawierają dominujących linii emisyjnych można mierzyć w przedziałach $\Delta\lambda > 2$ nm. W przypadku pozostałych źródeł światła pomiary należy wykonywać w przedziałach $\Delta\lambda \leq 2$ nm.
2. Program do obliczania ogólnego wskaźnika oddawania barw powinien być dobrze rozpoznany. W szczególności należy ustalić w jaki sposób wykonywane są obliczenia i dla jakich przedziałów $\Delta\lambda$ program wykonuje obliczenia. Należy również ustalić czy program odrzuca wartości pośrednie z przedziału $\Delta\lambda$. Wprowadzenie poprawnie pomierzonego widmowego rozkładu energetycznego może być nieskuteczne, ponieważ program i tak odrzuci wartości pośrednie co wykazano w ramach walidacji.

Obecnie, w ramach nadzoru rynku, organy do tego powołane (w Polsce jest to Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów oraz Państwowa Inspekcja Handlowa) sprawdzają również zgodność deklarowanych przez producentów wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw źródeł światła, z rzeczywistymi wartościami tego wskaźnika, reprezentatywnymi dla partii źródeł światła wprowadzonych na rynek. Błędne wyniki pomiarów lub obliczeń mogą powodować spory prawne i straty finansowe. Ofiarą błędnych wyników może być albo podatnik albo producent źródeł światła.

Wydaje się konieczne wprowadzenie w niektórych regulacjach prawnych, obowiązujących w tym zakresie, pewnych uściśleń metod pomiaru i obliczeń, które ujednoliciłyby wyniki obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw oraz ujednoliciłyby interpretację jego wartości zarówno przez organy nadzoru rynku jak i przez producentów.

Przykład

Wyobraźmy sobie następującą sytuację: firma X pomierzyła partię wyprodukowanych przez siebie lamp i otrzymała wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw, reprezentatywną dla tej partii, na poziomie 74. Wartość ta, pomimo że jest mniejsza od wymaganej w regulacjach prawnych wartości $R_a = 80$, zostanie na pewno zaakceptowana przez organy nadzoru rynku (kryterium dopuszczenia dla organów nadzoru ma wartość 72). Dlatego producent podjął decyzję o wprowadzeniu tej partii na rynek. Oczywiście lampy oznakował wartością $R_a = 80$. Laboratorium tej firmy wykonywało pomiary spektrometryczne zgodnie z zaleceniami Publikacji CIE 15:2004 w przedziałach $\Delta\lambda = 1$ nm, zaś obliczenia za pomocą programu który uwzględnił tę rozdzielczość pomiaru.

Organ nadzoru rynku Y pobrał w jednym ze sklepów partię lamp wyprodukowanych przez firmę X i skierował ją do Laboratorium Z w celu sprawdzenia zgodności deklarowanej wartości ze stanem faktycznym.

Laboratorium Z wykonało pomiary widmowych rozkładów energetycznych również zgodnie z wymaganiami Publikacji CIE 15:2004 [2] i w takich samych działaniach. Jednak do obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw zastosowało program, który odrzuca wartości pośrednie. Niech będzie to program CIE13_3D [1]. Laboratorium uzyskało ogólny wskaźnik oddawania barw dla badanej partii lamp na poziomie 70. Sprawozdanie z pomiarów przekazało organowi nadzoru rynku Y. Na podstawie wyników zaprezentowanych w sprawozdaniu organ postanowił wszcząć procedurę wycofania partii lamp producenta X z rynku i nałożyć na niego kary ustawowe.

Producent X przeanalizował swoją dokumentację z pomiarów i poddał ponownemu wzorcowaniu swoją aparaturę pomiarową. Nie stwierdził żadnych uchybień w swoich procedurach i jakości pomiarów. Na tej podstawie postanowił odwołać się od decyzji organu nadzoru rynku do sądu. Po kilku latach sporu, utracie dobrego imienia i należnych zysków wygrał sprawę i uzyskał stosowne odszkodowanie. Odszkodowanie wypłacił Skarb Państwa z pieniędzy podatników. Organ nadzoru z kolei wystąpił do sądu przeciwko Laboratorium Z i po wygranej sprawie odzyskał część strat z ubezpieczenia Laboratorium Z.

Wnioski z powyższego przykładu nasuwają się same:

1. Należy uściślić metodę obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw tak aby podobna sytuacja nie mogła wystąpić.
2. Producenci powinni informować o rozdzielczości pomiaru i obliczeń za pomocą których określili wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw.

Forma zapisu mogłaby wyglądać następująco:

$$R_a = 82 (1/5 \text{ nm}),$$

gdzie liczba przed ukośnikiem informowałaby o przedziałach $\Delta\lambda$ pomiaru, zaś liczba za ukośnikiem o metodzie obliczania ogólnego wskaźnika oddawania barw.

Dysponując taką informacją, organ nadzoru rynku lub Laboratorium wykonujące weryfikację na jego zlecenie, mógłby od razu ustalić czy metoda przyjęta przez producenta do określenia wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw była prawidłowa.

LITERATURA

1. CIE 13.3-1995 Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, Commission Internationale de L'eclairage, Vienna, Austria.
2. „CIE 15-2004 Colorimetry, 3rd Edition,” Commission Internationale de L'eclairage, Vienna, Austria, 2004.
3. PN-91/E-04042/03 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Metody wyznaczania charakterystyk widmowych i kolorymetrycznych źródeł światła, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa, 1991.

4. Robertson A.: Computation of correlated color temperature and distribution temperature, J. Opt. Soc. Am. vol. 58, nr 11, 1968.
5. Hernandez-Andres J., Lee R. L. Jr i Romero J.: Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities, Departamento de Optica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada, 1999.
6. Gardner J.: Correlated color temperature – uncertainty and estimation, Metrologia vol. 37, 2000.
7. CIE 63-1984 The Spectroradiometric Measurement of Light Sources, Commission Internationale de L'eclairage, Vienna, Austria, 1984.
8. CIE 160:2004 A Review of Chromatic Adaptation Transforms, Commission Internationale de L'eclairage, Vienna, Austria, 2004.
9. Ohno Y. i Jergens M.: Results of the intercomparison of correlated color temperature calculation, CORM Subcommittee CR3 Photometry, 1999.
10. Oleszyński T.: Miernictwo techniki świetlnej, Warszawa: PWN, 1957.
11. PN-90/E-01005 Technika Świetlna Terminologia Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1991.
12. CIE 13.2-1974 Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. 2nd Edition. Commission Internationale de L'eclairage, Vienna, Austria, 1974.

Rękopis dostarczono dnia 16.04.2014 r.

GENERAL COLOR RENDERING INDEX AS A CRITERION
OF QUALITY OF LIGHT SOURCES ASSESSMENT
APPLIED IN EUROPEAN COMMISSION REGULATIONS
IMPLEMENTING DIRECTIVE 2009/125/EC (EKODESIGN).

Andrzej WIŚNIEWSKI, Dariusz GROCHOWINA

ABSTRACT *The paper describes requirements established in the Regulations of the European Commission on the implementation of Directive 2009/125/EC in regard to the colour rendering property and the method of verifying of this property. Consequences arising from adopted tolerances of the minimum value of the general colour rendering index, specified in the Regulations of the European Commission, have been presented. Also, the problem of obtaining different values of the general colour rendering index, depending on the measurement resolution of the test light and also on the resolution of the computational algorithms used in programs to the general color rendering index calculations has been analyzed. Also in this paper the potential risks arising from the possibility of obtaining different results of such calculations was written. Authors proposed the use of supplementary marking, placed behind the value of general colour rendering index, indicating resolution of measurement and resolution of the method used for calculation of this value.*

Keywords: *spectral power distribution of radiation, correlate colour temperature, general colour rendering index*



Dr inż. Andrzej WIŚNIEWSKI, ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. W roku 1992 rozpoczął pracę w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej w Zakładzie Techniki świetlnej. W roku 2000 obronił pracę doktorską z zakresu projektowania oświetlenia wnętrz.

Inż. Dariusz GROCHOWINA, ukończył studia inżynierskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Pracę rozpoczął w Centralnym Ośrodku Badawczo Rozwojowym „Polam”. Od 2001 roku kieruje Sekcją Badań Bezpieczeństwa i Fotometrii w Laboratorium Badawczym i Wzorującym Instytutu Elektrotechniki.

