

Niejednoznaczności i ograniczenia w określaniu jakości oddawania barw źródeł światła wskaźnikiem R_a (CIE CRI)

Streszczenie: Bardzo istotnym parametrem opisującym jakość oświetlenia jest poprawność oddawania barwy oświetlanych obiektów. Współcześnie jako miara tej poprawności stosowany jest wskaźnik R_a (CRI) opracowany przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE. W pracy wskazano, że miara ta posiada wiele niejednoznaczności w interpretacji swojej wartości w przypadku źródeł światła różniących się parametrami świetlnymi. W artykule została przedstawiona także analiza procesu percepcji barwy oraz omówiono czynniki mające wpływ na postrzeganie barwy obiektów.

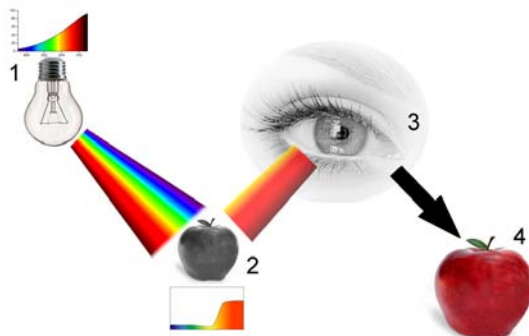
Abstract. Lighting is describing by very important parameter which is ability to proper color rendering of illuminated objects. Nowadays for this is used CIE CRI which is developed by the International Commission on Illumination. In this paper indicated, that this measure has a number of ambiguities in the interpretation of this index for different light parameters of light sources. This article presents the analysis of the process of perception of color and discusses the factors affecting the perception of the color of objects. (Ambiguity and limitations in determining the quality of the color rendering of light sources by index R_a (CIE CRI))

Słowa kluczowe: oddawanie barw, źródła światła, temperatura barwowa, binning

Keywords: color rendering, light sources, color temperature, binning

Wstęp

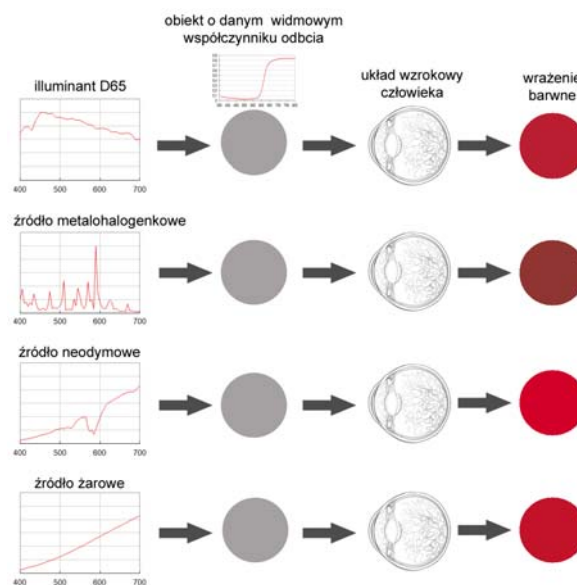
Światło pełni istotną rolę w życiu i funkcjonowaniu człowieka. To ono buduje atmosferę, zapewnia komfort psychiczny oraz nadaje kształt przedmiotom i definiuje ich barwę. Wygląd barwy danego obiektu jest zależny od użytego źródła światła, widmowego współczynnika odbicia danego obiektu oraz systemu wzrokowego człowieka (Rys.1). Stosowane współcześnie do celów oświetleniowych źródła światła nie są promiennikami równoenergetycznymi tj. takimi dla których wszystkie długości fali są jednakowo reprezentowane. W związku z czym istnieje możliwość modelowania wyglądu barwnego oświetlanych przedmiotów. Modelowanie takie umożliwia zmiany w nasyceniu i tonie barwy oraz jaskrawości obiektu [1].



Rys. 1. Proces wywołania wrażenia barwy u człowieka

1 - źródło światła o określonym rozkładzie widmowym;
2 - obiekt o danym widmowym współczynniku odbicia;
3 - układ wzrokowy człowieka; 4 - wrażenie barwne

Informacja na temat oddawania barw zawarta jest w rozkładzie widmowym mocy promienistej danego źródła światła. Brak którejś długości fali np. czerwonej powoduje, że obiekty o tej barwie będą miały zaburzony wygląd, jeżeli zostaną oświetlone tym źródłem światła (Rys.2). Światło naturalne w ciągu doby, także zmienia swój rozkład widmowy w zależności od pory dnia i warunków pogodowych. Jednak nie dostrzegamy znacznej różnicy kolorystycznej pomiędzy oświetleniem lekko niebieskawym z rana, a czerwonym pod wieczór. Jest to spowodowane przez zdolność naszego systemu wzrokowego do adaptacji przy barwnym oświetleniu. Adaptacja chromatyczna dotyczy tylko łagodnego odcienia barwy i nie działa tj nie przynosi rezultatów przy znacznych zniekształceniach kolorystycznych [2].



Rys. 2. Wpływ rozkładu widmowego źródła światła na efekt odbicia jego promieniowania od czerwonego obiektu

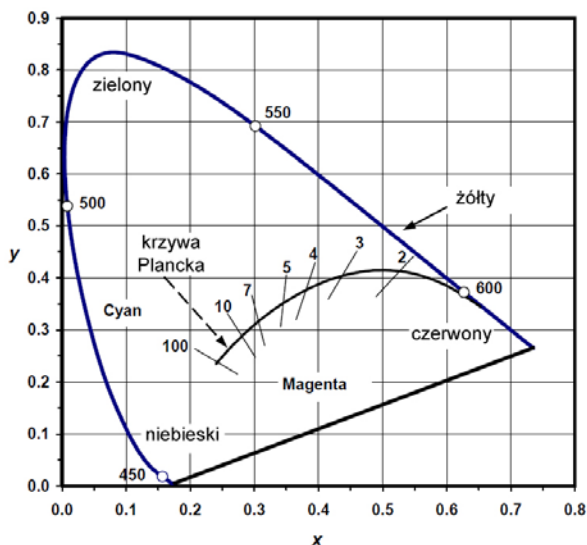
Parametry źródła światła wpływające na wygląd obiektów oświetlanych

Nie da się za pomocą jednego parametru określić jak źródło światła będzie wpływało na wygląd obiektu. Obecnie istnieje kilka parametrów, które należy wziąć pod uwagę przy wyborze źródła światła do danych celów oświetleniowych. Najpopularniejszym z nich jest temperatura barwowa. Temperaturą barwową T_b (ang. C_T) nazywamy temperaturę promiennika Plancka (Rys.3), którego barwa postrzegalna jest najbardziej podobna do barwy danego bodźca przy tej samej jaskrawości i przy określonych warunkach widzenia [3]. Wartości temperatury barwowej charakteryzowane są jako:

- temperatura barwowa ciepła – poniżej 3000 K,
- temperatura barwowa neutralna – 3000-5000 K,
- temperatura barwowa zimna – powyżej 5000 K.

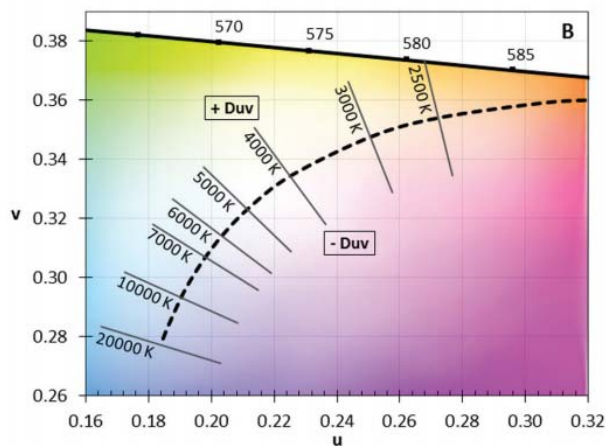
Jeżeli współrzędne chromatyczne nie leżą na krzywej Plancka tylko blisko niej, mówimy wtedy o temperaturze barwowej najbliższej (ang. CCT). Linie poprzeczne, przecinające krzywą Plancka, nazwane są liniami Judda i to one wyznaczają zakres wartości współrzędnych

chromatycznych, dla których temperatura barwowa najbliższa opisywana jest temperaturą barwową leżącą na krzywej Plancka [4].



Rys. 3. 1931 CIE Wykres chromatyczności [4]

Może zdarzyć się, że dwa źródła światła o tej samej wartości temperatury barwowej najbliższej będą w percepcyjnie przez człowieka jako różne tj. jedno będzie bardziej zielonkawe, a drugie różowe. Spowodowane to jest położeniem punktów określających współrzędne chromatyczności tych źródeł po przeciwnych stronach krzywej Judda. W celu uniknięcia dużych rozbieżności American National Standards Institute (ANSI) wprowadziło parametr nazwany *Duv*, który definiuje odległość między współrzędnymi chromatyczności danego źródła światła, a temperaturą barwową na krzywej Plancka w układzie kolorymetrycznym *uv* (Rys.4) [5].



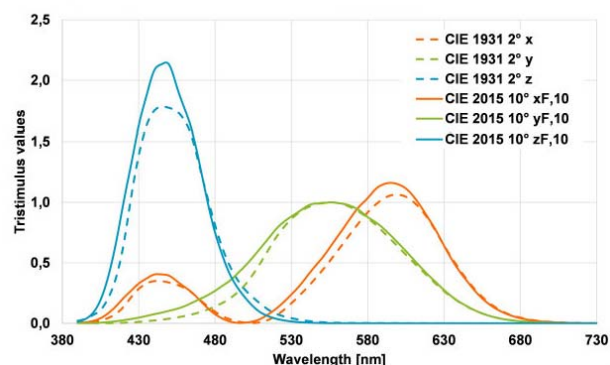
Rys. 4. Krzywa Plancka w układzie *uv* CIE 1960 z zaznaczonymi liniami Judda [5]

Binning jako miara określania barwy światła

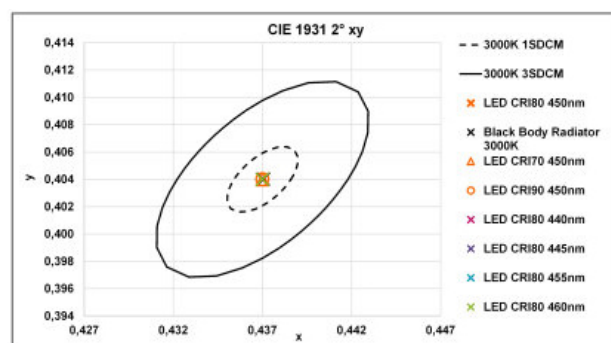
Innym sposobem określania barwy źródła światła jest podany przez producentów diod elektroluminescencyjnych proces binowania według określonego zestawu parametrów. Proces ten ma zapewnić posortowanie produktów np. diod LED w grupy o możliwie jak najbardziej zbliżonych parametrach. Obecnie najczęściej stosowanym sposobem binowania jest użycie dwustopniowego obserwatora (2°) w układzie *xy* CIE 1931. Niestety

stosowanie tej metody wprowadza pewne nieścisłości. Zdarza się, że pomimo istniejących różnic w rozkładzie widmowym i obserwowanych różnic w postrzeganiu barwy tego źródła przez człowieka, diody LED mają dokładnie takie same współrzędne chromatyczne dla 2° obserwatora. Aby temu zapobiec zaproponowano wprowadzenie 10° obserwatora (Rys.5) [6].

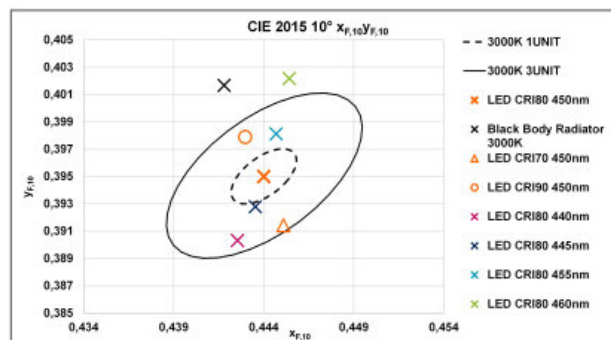
Przejęcie pomiędzy obserwatorem 2° a 10° poszerza pole widzenia z średnicy 20mm do 90mm (odległość oka 0,5 m), co pozwala na lepsze dopasowanie diod względem postrzegania barw opisanego elipsami McAdama (Rys.6 i Rys.7).



Rys. 5. Wykres wartości tróchromatycznych dla obserwatora 2° CIE 1931 i 10° CIE 2015 [6]



Rys. 6. Wykres elips McAdama dla 2° obserwatora kolorymetrycznego CIE 1931 *xy* [6]



Rys. 7. Wykres elips McAdama-a dla 10° obserwatora kolorymetrycznego CIE 2015[6]

Wskaźnik oddawania barw Ra (CRI)

Po drugiej wojnie światowej, kiedy do powszechnego użytku w oświetleniu zaczęto stosować lampy wyładowcze - świetlówki zauważono, że pomimo charakteryzowania się identyczną wartością temperatury barwowej źródła te, u obserwatorów, powodowały inne wrażenie barwne przy

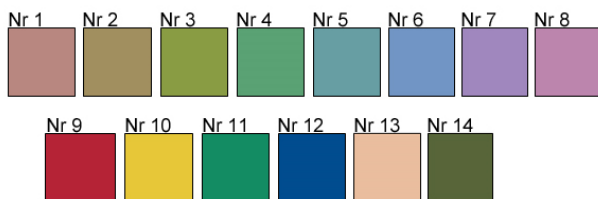
ogłądaniu tych samych przedmiotów [4]. Ustalono, że jedynym parametrem różniącym te źródła światła był rozkład widmowy. W związku z czym postanowiono stworzyć miarę, która by informowała o jakości źródła o tej samej T_b , ale różnym rozkładzie widmowym. Prace nad tą miarą trwały od lat 40 XX wieku i w 1965 roku Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE zarekomendowała do tego celu wskaźnik oddawania barw R_a (CIE CRI).

Wskaźnik oddawania barw R_a opisuje porównanie dokładności odwzorowywania barw 8 próbek testowych oświetlanych światłem badanym w stosunku do oświetlenia ich światłem wzorcowym. Miara ta w prosty sposób informuje czy wystąpi różnica barw [7].

Dobór źródła wzorcowego zależy od temperatury barwowej źródła badanego. W raporcie technicznym CIE 13.3 z 1995 roku źródło wzorcowe jest zdefiniowane jako źródło o takiej samej lub bliskiej chromatyczności jak źródło badane [8]. W dokumencie tym także wspomniano, że jeżeli nie istnieją inne zalecenia, źródła światła o temperaturze barwowej poniżej 5000 K powinny być porównywane do promiennika Plancka, a powyżej 5000 K - do rozkładu widmowego światła dziennego (modelu matematycznego tego promieniowania).

Ponieważ chromatyczność źródła światła badanego może różnić się od chromatyczności źródła wzorcowego, do obliczeń wprowadzono adaptację chromatyczną w postaci transformaty von Kriesa z 1902 roku. Zakłada ona, że adaptacja chromatyczna może zostać osiągnięta poprzez zmniejszenie czułości stałym współczynnikiem dla każdego z trzech rodzajów czopków (RGB) przy utrzymaniu stałego poziomu dopasowania do bieli.

Wartość wskaźnika oddawania barw maksymalnie ustalono jako równą 100, co oznacza brak dostrzegalnej różnicy w wyglądzie barwy pomiędzy oświetleniem źródłem wzorcowym, a źródłem testowanym. Drugim punktem charakterystycznym na skali jest przypisanie do promieniowania świetlówki ciepłobiałej (illuminant standardowy F4 określony przez CIE) wartości 50 [4]. Te dwa punkty definiują skalę w jakiej reprezentowane jest oddawanie barw przez źródła światła. Metoda CIE CRI opiera się na 14 próbkach testowych z atlasu Munsell'a dla których wyznacza specjalne (cząstkowe) wskaźniki oddawania barw R_i . Z pierwszych 8 próbek o niskiej saturacji, wyznaczany jest generalny wskaźnik oddawania barw R_a , próbki od 9-12 są wysoko nasyconymi barwami czerwieni, żółci, zieleni i niebieskości. Próbka 13 odpowiada kaukaskim odcieniom skóry, a 14 reprezentuje zielone liście (Rys. 8).



Rys. 8. Próbkę z atlasu Munsella użyte w obliczeniach CIE CRI

W praktyce podawana jest jedna wartość wskaźnika oddawania barw. Warto zauważyć, że jeżeli nie zostały wymienione wartości cząstkowe R_i , to wartość podana jest wartością średnią obliczoną z 8 próbek testowych, która może pominać ważną informację o wartościach indywidualnych R_i .

Obliczenia wskaźnika oddawania barw zaczynają się od oświetlenia próbek testowych światłem badanym i wzorcowym. W praktyce wykonuje się symulację

komputerową, wprowadzając odpowiednie względne rozkłady widmowe mocy promienistej (SPDs) danych źródeł światła i funkcje odbicia poszczególnych próbek. Następnie dla każdej próbki oświetlanej obliczane są współrzędne trójchromatyczne XYZ, ich transformacje na CIE 1960 (uv) oraz współrzędne chromatyczne przestrzeni barw CIE 1964 CIE UVW. Ostateczna różnica pomiędzy wyglądem barwy próbki i wskaźnik oddawania barw cząstkowy obliczane są za pomocą wzorów (1),(2). Finalnie wartości dla pierwszych 8 próbek są uśredniane arytmetycznie, a wynikiem jest ogólny wskaźnik oddawania barw R_a (wzór 3) [8].

$$(1) \Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2}$$

ΔE_i - różnica barwna próbki oświetlanej źródłem badanym

i źródłem wzorcowym; $U_{r,i}^*, V_{r,i}^*, W_{r,i}^*$ - współrzędne trójchromatyczne CIEUVW próbki oświetlanej źródłem wzorcowym; $U_{k,i}^*, V_{k,i}^*, W_{k,i}^*$ - współrzędne trójchromatyczne CIEUVW próbki oświetlanej źródłem badanym;

$$(2) R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i$$

$$(3) R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

Ograniczenia Ra CRI

Wskaźnik oddawania barw R_a został przedstawiony w 1965 roku i od tego czasu dokonano w nim kilku poprawek (1974 r. i 1995 r.). Pomimo starań, rozwój źródeł światła i próba uogólnienia CIE CRI (R_a) na wszystkie źródła światła, uwiarygodniły ograniczenia tego systemu liczenia.

Powszechnie panującym przekonaniem jest, że im wyższy wskaźnik oddawania barw tym lepiej źródło światła odda barwy oświetlanych przedmiotów. W rzeczywistości to stwierdzenie nie zawsze jest uprawnione. Wskaźnik oddawania barw jest miarą porównawczą, a informacją jaką nam przekazuje mówi o tym czy źródło światła badane będzie oddawało barwy tak samo jak źródło wzorcowe. Jeżeli wartość R_i wynosi 100, to znaczy, że dana próbka kolorystyczna będzie wyglądała tak samo zarówno przy oświetleniu źródłem wzorcowym jak i badanym. Problem powstaje, gdy $R_i < 100$ lub, gdy jedyną podaną użytkownikowi miarą jest ogólny wskaźnik oddawania barw R_a . W pierwszym przypadku pewne będzie, że nastąpi zmiana barwy, ale nie jest powiedziane jak dana barwa się zmieni. Spadek R_i danej próbki nie musi spowodować spadku nasycenia barwy, czy zmianę jej odcienia. Równie dobrze może spowodować wzrost saturacji, wskaźnik informuje nas tylko i wyłącznie o tym, że nastąpiła zmiana. Przy ogólnym wskaźniku oddawania barw sytuacja jest bardziej skomplikowana. Parametr R_a jest średnią arytmetyczną 8 próbek, przez co spadek wartości R_a może być wywołany małymi zmianami wszystkich próbek, ale także dużą zmianą np. tylko dwóch z nich. Brak informacji o wartościach poszczególnych wskaźników R_i powoduje, że nie jest wiadome, które barwy mogą inaczej wyglądać przy oświetlaniu tym promieniowaniem. Powoduje to sytuacje, w której dwa źródła światła o tym samym $R_a < 100$ i tej samej chromatyczności, mogą zupełnie inaczej oddawać barwy przedmiotów.

Wskaźnik oddawania barw jest liczbą mniejszą lub równą 100. Nie jest procentem, ani ułamkiem. Jest to wartość dla której zostały określone dwa punkty charakterystyczne (100 i 50), a reszta wyników została do nich dopasowana [4]. Ważną rzeczą jest, aby pamiętać że R_a wynoszące 60 mówi

nam o cztero krotnie większej zmianie barwy niż R_a o wartości 90 [7]. Dodatkowo trzeba zaznaczyć, że wskaźnik oddawania barw może uzyskać wartość poniżej 0, wynika to z zastosowanego liniowego skalowania i efekt ten często mam miejsce przy badaniach źródeł LED [9].

W publikacji [9] zostały przedstawione badania źródła światła białego charakteryzującego się wartością $T_b=3300$ K zbudowanego z użyciem diod typu RGB. Zaprezentowane zostało pięć źródeł tego typu różniące się użytymi diodami tj. o różnych rozkładach widmowych, różniących się wartościami długości fali przy której poszczególne diody LED osiągały maksimum.

Ogólny wskaźnik oddawania barw dla trzech z pięciu badanych źródeł światła otrzymał wartość około 80, natomiast wskaźnik oddawania barw próbki czerwonej odpowiednio wynosił (-90, -110 i 89). Dwa źródła światła, dla których wartość wskaźnika R_g była ujemna wykazały się niską wartością wskaźnika R_s , natomiast trzecie źródło posiadało ten wskaźnik na poziomie 86. Powyższe badania pokazują problemy jakie występują w obliczeniach wskaźnika oddawania barw dla źródeł LED. Informacja zawarta w ogólnym wskaźniku oddawania barw sugerowałaby podobne właściwości wszystkich trzech źródeł, natomiast analiza szczegółowa pokazuje, że występują między nimi różnice, dla których nie jest określony kierunek zmian barwy.

Nie jest wskazane porównywanie dwóch źródeł światła o tych samych wskaźnikach oddawania barw, ale innych temperaturach barwowych [7]. Źródła światła wzorcowe do których zostały porównane źródła badane, będą różnić się rozkładem widmowym, a tym samym odwzorowanie barw przedmiotów będzie inne. Porównywanie dwóch źródeł światła o tej samej temperaturze barwowej i tym samym R_a , także może pokazać różnice w oddawaniu barw. Istnieją źródła światła, których rozkłady widmowe mocy promienistej różnią się od siebie, ale współrzędne chromatyczne tych źródeł są identyczne, takie źródła nazywamy metamerycznymi. Kompresja informacji zawartej w SPD do dwóch parametrów R_a i CCT powoduje utratę dużej ilości danych dotyczących oddawania barw. Taka sama temperatura barwowa i wskaźnik oddawania barw dwóch źródeł światła, informuje nas o takim samym wyglądzie barwy światła i o podobnych zmianach w wyglądzie próbek barw, ale nie gwarantuje takich samych zmian kolorystycznych w całej palecie barw. Tylko powielenie tego samego wykresu widmowego dla paru źródeł światła, daje pewność, że wszystkie barwy będą oddawane z taką samą dokładnością.

Poważnym problemem w obliczeniach R_a jest zbyt mała ilość próbek oraz ich zły dobór. Obecnie stosowane próbki nie były dobrane tak, aby w obiektywny sposób ocenić całe spektrum widma światła. Osiem próbek, stanowiących bazę generalnego wskaźnika oddawania barw, reprezentują barwy o niskiej saturacji, które wykluczają barwę czerwoną. Dopiero próbki dodatkowe, o wysokim nasyceniu barwy, zawierają ciekawsze informacje na temat oddawania barw, ale one z kolei nie biorą udziału w obliczeniach. Zastosowanie tak małej ilości próbek miało za zadanie uproszczenie obliczeń (w czasach kiedy nie było do dyspozycji komputerów personalnych miało to istotną zaletę), niestety jest równocześnie źródłem niejednoznaczności w interpretacji otrzymanych wyników. Możemy uzyskać bardzo wysoki wskaźnik oddawania barw, pomimo braku ciągłości widma, składając wykres widmowy z wąskich pasm światła, odpowiadających konkretnym próbkom. To prowadzi do sytuacji w których źródło światła może posiadać bardzo wysoki wskaźnik oddawania barw, ale bardzo słabo oddawać barwy o wysokim nasyceniu.

Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a oblicza się za pomocą średniej arytmetycznej z poszczególnych wskaźników cząstkowych, co może powodować mniejszy wpływ, dużych zniekształceń barwy, jeżeli występują one tylko w kilku próbkach. Wynikiem tego są źródła światła o wysokim wskaźniku R_a i dużym zniekształceniu kolorystycznym w zestawieniu z wzorcem.

Kolejnym elementem dyskusyjnym jest wybór źródła wzorcowego. Jedynym kryterium wyboru wzorca jest temperatura barwowa, przy czym występuje nieciągłość między źródłem wzorcowym dla 4999 K, a 5000 K. Pomimo bardzo podobnych rozkładów widmowych mocy promienistej dwa źródła o takich samych wartościach T_b , oceniane w ten sposób będą miały zupełnie inne wskaźniki oddawania barw.

Przez wszystkie lata od kiedy wprowadzono tę metodę obliczeniową w życie, nastąpiły spore zmiany w obliczeniach dotyczących dopasowania chromatycznego oraz powstało wiele nowych przestrzeni barw. Przestrzeń barw użyta w obliczeniach różnic barw CIE CRI została jednocześnie uznana za przestarzałą i nie jest dłużej polecana do używania w kolorymetrii. Wykazano także, że region czerwony w tej przestrzeni ($W^*U^*V^*$) jest niejednorodny [10]. Zastosowana adaptacja von Kries również okazała się o wiele gorsza niż inne adaptacje tj. CMCCAT 2000 czy CIE CAT02. Zauważono, że wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a nie zmniejsza się jeżeli przesunięto punkt chromatyczności kompaktowej lampy świetlówkowej z $Duv=0$ do $Duv=+0,015$ [10]. Wprowadzenie nowych obliczeń w różnicach barwy, przestrzeni barw i kalkulacji chromatycznej adaptacji, polepszyłyby wyniki otrzymywane metodą CIE CRI.

Istnieje parę cech jakimi możemy opisać jakość oddawania barw. CIE CRI jest miarą opisującą wierność odwzorowania barwy obiektu oświetlanego światłem wzorcowym. Zauważono [10], że do użytku codziennego preferowane są źródła światła, które lekko wzmacniają nasycenie barw. Jednym z takich źródeł są lampy neodymowe, wzmacniające saturację barwy czerwonej i zielonej. Wskaźnik oddawania barw CIE CRI dla tych źródeł światła wynosi $R_a=77$, podczas gdy dla światła żarowego $R_a=100$. Obliczenia CIE CRI dyskryminują zwiększoną saturację barwy, poprzez obniżenie wartości R_a i brak informacji na temat kierunku zmiany barwy.

Kolejnym zagadnieniem, które należy wziąć pod uwagę przy ocenie jakości barwnej źródeł światła jest łatwość rozpoznawania przez człowieka barw w otoczeniu. Oświetlając czarne i ciemno granatowe tkaniny światłem żarowym o $R_a=100$, większość ludzi będzie miała większy problem z rozróżnieniem barwy niż przy świetle o wyższej temperaturze barwowej i niższej niż 100 wartości R_a . Wśród aspektów wymienianych przy ocenie jakości oświetlenia jest też m.in. przejrzystość widzenia, preferencja osobista oświetlenia i inne [10].

Podsumowanie

Szeroki zakres źródeł światła, o różnych możliwościach oddawania barw, stosowanych do aplikacji oświetleniowych, wymusza istnienie miary oceniającej jakość oświetlenia. Obecna miara oceny CIE CRI posiada wiele ograniczeń, które są problematyczne w interpretacji dla różnych źródeł światła. Obliczenia stosowane w metodzie spowodowały produkcję źródeł światła osiągających wysokie wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a , ale słabą jakość oddawania barw innych niż użyte w próbkach testowych [9]. Wskaźnik CIE CRI jest prostą miarą, nie zawierającą zbyt dużo informacji na temat oddawania barw. Brak w nim informacji o zmianach w tonie barwy, nasyceniu czy jasności. Z drugiej

strony trudno wszystkie te informacje przekazać za pomocą jednego wskaźnika tak, aby były one czytelne dla użytkowników. Dodatkowo wskaźnik *CIE CRI* nie jest miarą jednoznaczną. Zastosowanie źródeł światła o tej samej wartości R_a nie daje nam gwarancji na taki sam oświetleniowy efekt końcowy, co w wielu projektach oświetleniowych, może zepsuć koncepcje. Istnieje potrzeba wprowadzenia nowej oceny oddawania barw dotyczącej wszystkich źródeł światła [11], która uniknęłaby wad występujących w obecnych obliczeniach i w jasny sposób przekazywała informacje na temat zniekształceń kolorystycznych. W dokumencie CIE:177:2007 „Colour rendering of White LED Light Sources”, Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa przedstawiła rekomendacje do wprowadzenia nowej metody obliczeń wskaźnika oddawania barw. Zaznaczono, że metoda ta zawierająca jeden lub kilka wskaźników, nie zastąpi obecnej metody natychmiastowo, ale wzbogaci ją o dodatkowe informacje. Dopiero kiedy zostanie pomyślnie zaakceptowana, zostanie rozważone zastąpienie metody *CIE CRI*. Wskazano, że nowa metoda będzie musiała spełniać warunek uniwersalności i być odpowiednia dla wszystkich rodzajów źródeł światła [12].

Autorka: mgr inż. Justyna Kowalska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Techniki Świetlnej, 00-662 Warszawa, ul.Koszykowa 75, e-mail: justyna.kowalska@ien.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Zausznica A. Nauka o barwie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012
- [2] Zeugner G. Barwa i człowiek, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1965
- [3] PN-90/E-01005 Technika Świetlna Terminologia, Wydawnictwo Normalizacyjne, Warszawa 1991
- [4] OSRAM Sylvania Light and Color FAQ0060-0605 1-800-LIGHTBULB 2005
- [5] PNNL-SA-84900 U.S Department of Energy, LED Color Characteristics 2012
- [6] TEN° binning – the new OSRAM Opto Semiconductors 10° Binning [dok. elektr. : http://www.osram-os.com/osram_os/en/applications/general-lighting/ten-binning/index.jsp]
- [7] Houser K., Mossman M., Smet K., Whitehead L., Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, Leukos, 12(2016), 7-26
- [8] Publikacja CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources
- [9] Fryc I., Fryc J., Wąsowski K., Rozważania o jakości oddawania barw źródeł światła, wyrażanej wskaźnikiem Ra (CRI), uwzględniające fizjologię widzenia oraz zagadnienia techniczno-prawne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.2, 218-223
- [10] Davis W., Ohno Y., Approaches to color rendering measurement, *Journal of Modern Optics*, 56(13) (2009), 1412-1419
- [11] David A., Fini P.T., Houser K.W., Ohno Y., Royer M. P., Smet K. A. G., Wei M., Whitehead L.: Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources, *Optics Express*, vol.23, no.12,2015, str.15888-15906
- [12] Publikacja CIE 177:2007 Colour Rendering of White LED Light Sources