

Określanie jakości oddawania barw źródeł światła parametrami przedstawionymi w zaleceniach IES TM-30-15 i CIE 013.3-1995

Streszczenie. Na rynku oświetleniowym w ostatnich latach pojawiło się wiele wskaźników, mających być uzupełnieniem powszechnie stosowanej metody określania wskaźnika oddawania barw jako CIE Ra (CRI). Jednym z nich jest metoda IES TM-30-15. W artykule przedstawiono sposób obliczeń obydwu metod i na przykładach typowych źródeł światła omówiono otrzymane wyniki.

Abstract. In recent years on the lighting market occurs many indices, designed to complement the widely used method of determining the color rendering index CIE CRI. One of them is IES TM-30-15. The article presents the calculation of these two methods and have discussed the results on examples of typical light sources. (Analysis of parameters describing the quality of the color rendering of light sources according to the IES TM-30-15 and the CIE 013.3-1995).

Słowa kluczowe: oddawanie barw, CIE CRI, TM-30-15, źródła światła

Keywords: color rendering, CIE CRI, TM-30-15, light sources

Wstęp

Nieadekwatność i niedostosowanie w przypadku źródeł LED metody określania wskaźnika oddawania barw wskaźnikiem CIE Ra (CRI) [1,2,3,4,5,6] wprowadzonym przez Międzynarodową Komisję oświetleniową CIE w latach 60 XX wieku tj. w okresie dynamicznego rozwoju oświetlenia świetlówkowego, doprowadziły do powstania wielu nowych metryk oświetleniowych mających w zamyśle ich autorów być rzetelnym system oceny jakości barwnego oświetlenia. Pomimo wielu prób mających na celu zastąpienie metody CIE, żadna z nowych metryk nie została jeszcze powszechnie zaakceptowana. Północnoamerykańskie *Illuminating Engineering Society IES* w 2015 roku zaleciło do stosowania na terenie USA metody TM-30-15, która bazuje na wprowadzeniu dwóch miar oceny oddawania barw – wskaźnika wierności barwy, który jest odpowiednikiem metody CIE 013.3-1995 oraz wskaźnika zmiany w nasyceniu barwy, czyli wskaźnika określanego jako Gamut Area Index [7]. Niniejszy artykuł ma na celu zaprezentowanie metryk IES oraz CIE i porównanie wyników ich działania na przykładzie wybranych rozkładów widmowych typowych źródeł światła.

Metoda CIE 13.3-1995

Wskaźnik CIE Ra (CRI) jest powszechnie stosowaną i akceptowaną miarą do oceny oddawania barw przez źródła światła. Metoda ta opiera się na porównaniu wyglądu 14 próbek testowych oświetlonych źródłem testowym i źródłem wzorcowym [8]. Za źródło wzorcowe przyjmuje się promiennik Plancka dla źródeł testowych o temperaturze poniżej 5000K, dla pozostałych temperatur barwowych stosuje się matematyczny model rozkładu widmowego światła dziennego. Zalecane jest, aby chromatyczność źródła wzorcowego i testowego była taka sama lub bardzo podobna. Różnice chromatyczności między źródłem testowym (u_k, v_k), a źródłem wzorcowym (u_r, v_r) oblicza się ze wzoru:

$$(1) \quad DC = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2}$$

Tolerancja różnicy chromatyczności DC powinna być mniejsza niż $5 \cdot 10^{-3}$ w innym przypadku końcowy wskaźnik oddawania barw R_a będzie mniej dokładny.

Po oświetleniu próbek testowych promieniowaniem mierzonego źródła światła wyznaczane są współrzędne trójchromatyczne X, Y, Z CIE 1931. Następnie współrzędne

te przeliczane są na położenia punktu chromatyczności w układzie CIE UCS 1960 (u, v), poddawane są adaptacji chromatycznej *von Kiers* i transformowane na współrzędne bardziej jednolitej przestrzeni barw CIE U*V* 1964. Z tych współrzędnych oblicza się różnice barwne każdej z próbek za pomocą wzoru:

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

gdzie: ΔE_i - różnica barwna próbki oświetlanej źródłem badanym i źródłem wzorcowym;

$U_{r,i}^*, V_{r,i}^*, W_{r,i}^*$ - współrzędne trójchromatyczne CIEU*V* próbki oświetlanej źródłem wzorcowym;

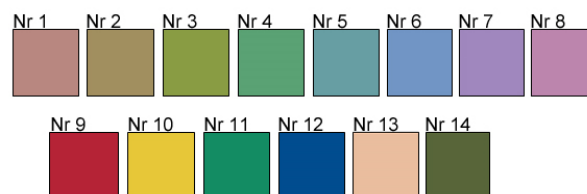
$U_{k,i}^*, V_{k,i}^*, W_{k,i}^*$ - współrzędne trójchromatyczne CIEU*V* próbki oświetlanej źródłem badanym.

Dla każdej próbki wyliczany jest wskaźnik oddawania barw cząstkowy R_i , a z pierwszych 8 próbek o słabej saturacji wyznaczany jest generalny wskaźnik oddawania barw R_a .

$$(3) \quad R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i$$

$$(4) \quad R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

Próbki 9-12 odpowiadają wysoko nasyconym barwom czerwieni, żółci, zieleni i niebieskości. Próbka 13 jest odpowiednikiem barwy ludzkiej skóry rasy białej kaukaskiej, a 14 reprezentuje zielone liście (Rys.1).



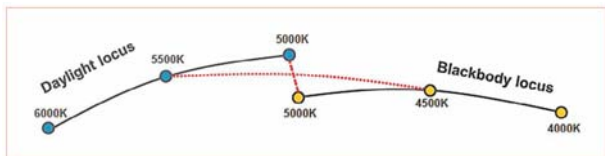
Rysunek 1. Próbkę barwne użyte w metodzie CIE CRI 13.3-1995

Metoda IES TM-30-2015

Metoda IES TM-30-2015 składa się z dwóch miar opisujących oddawanie barw przez źródła światła [7]. System ten określa wskaźnik wierności barwy R_f (color fidelity) oraz wskaźnik zmiany w nasyceniu barwy R_g (color

gamut) próbki oświetlanej światłem testowym w porównaniu ze źródłem wzorcowym. W celu uniknięcia nieciągłości w wyborze źródła testowego, zaproponowano, aby źródłem testowym dla źródeł o temperaturze barwowej:

- poniżej 4500K był promiennik Plancka,
- powyżej 5500K był iluminat D55,
- w zakresie od 4500K do 5500K liniowa kombinacja rozkładu widmowego promiennika Plancka, i rozkładu widmowego światła dziennego (Rys.2).



Rysunek 2. Wykres definiujący graficznie źródła wzorcowe dla metody IES TM-30-2015 [9]

W metodzie tej użyto 99 próbek barwnych, zapewniających jednorodność w całym zakresie długości fal i w przestrzeni barw (Rys.3). Wszystkie obliczenia wykonywane są dla obserwatora 10° CIE 1964.



Rysunek 3. Próbkę barwną użyte w metodzie IES TM-30-2015 [9]

Różnice w postrzeganiu barwy próbki oświetlanej źródłem testowym i źródłem wzorcowym wyznaczone są dla przestrzeni barw CAM02-UCS i obliczana jest z nich średnia arytmetyczna. Następnie za pomocą wzoru, wyznaczany jest wskaźnik wierności:

$$(5) \quad R'_f = 100 - k_{\Delta E}$$

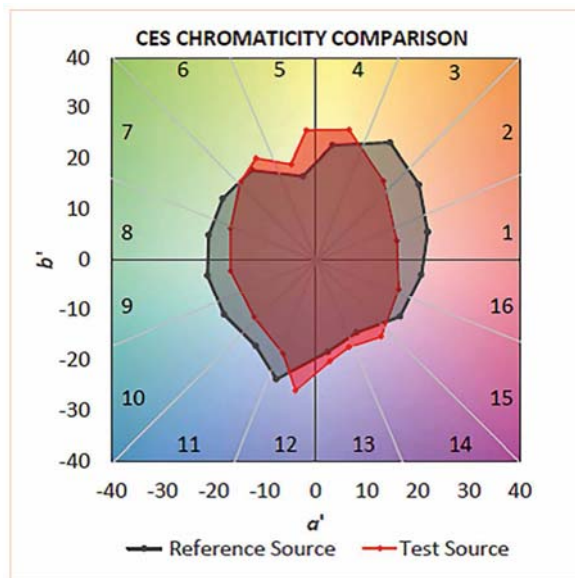
Aby zapobiec występowaniu wartości poniżej zera, wprowadza się skalowanie wartości wskaźnika do granic (0,100).

$$(6) \quad R_f = 10 \times \ln(\exp(R'_f / 10) + 1)$$

Wybór źródła wzorcowego do obliczeń wskaźnika zmiany w nasyceniu barwy R_g (color gamut) jest identyczny jak przy wyznaczaniu R_f . Następnie obliczane są współrzędne barwy (J, a, b) próbki oświetlanej światłem testowym i wzorcowym. Grupowane są one w 16 komórek barwnych o równej szerokości, w oparciu o ich chromatyczności wyznaczone przy oświetleniu źródłem badanym. Dla każdej komórki obliczana jest średnia wartość a, b czego wynikiem jest 16 punktów tworzących płaszczyznę dla źródła wzorcowego i badanego (Rys.4). Wskaźnik zmiany w nasyceniu barwy R_g obliczany jest za pomocą wzoru:

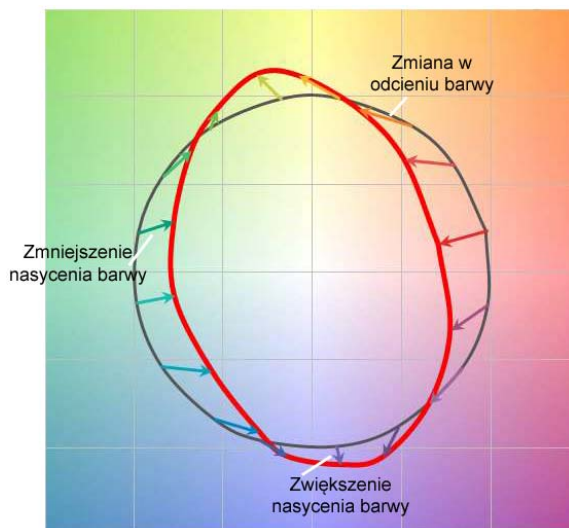
$$(7) \quad R_g = 100 \times A_{test} / A_{ref}$$

gdzie: A_{test} , A_{ref} - są to powierzchnie obliczane dla źródła badanego i wzorcowego.



Rysunek 4. Wykres wektorowy do określania powierzchni definiujących R_g [9]

Interpretacja wykresu graficznego polega na wyznaczeniu strzałki zaczynającej się w punkcie wyznaczonym dla źródła wzorcowego i kończącej się na punkcie wyznaczonym dla źródła badanego, w zakresie każdej komórki barwniej. Jeżeli strzałka jest skierowana do środka (punkt 0,0) nastąpi zmniejszenie nasycenia barwy w obrębie tego samego odcienia, jeżeli jest skierowana odwrotnie – zwiększenie saturacji. Gdy strzałka nie pokrywa się z linią łączącą punkt (0,0) z punktem wyznaczonym przez źródło wzorcowe, nastąpi zmiana w odcieniu barwy (Rys.5).

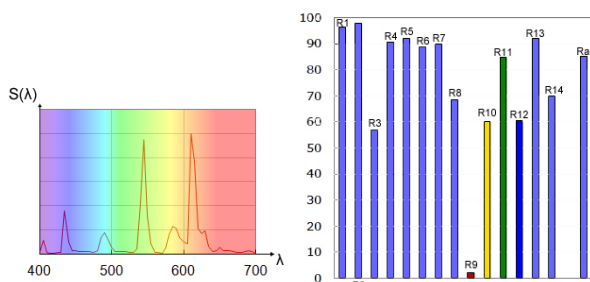


Rysunek 5. Interpretacja graficzna zmiany barwy dla TM-30-15

Jakość oddawania barw źródeł światła opisana metodą CIE oraz IES

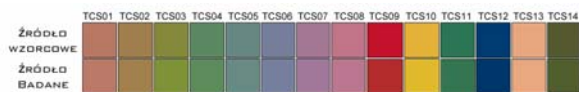
Do oceny jakości oddawania barw dwoma opisanymi uprzednio metodami wybrano takie źródła światła jak: świetlówka liniowa LF, lampa metalohalogenkowa MH, żarówka neodymowa, LED.

Pomimo coraz bardziej popularnego stosowania źródeł elektroluminescencyjnych, źródła świetłowe są dalej często stosowane w oświetleniu ogólnym wnętrz. Charakteryzują się one wysoką skutecznością świetlną, długą trwałością i szerokim zakresem temperatur barwowych przy wysokim wskaźniku oddawania barw R_a [10].



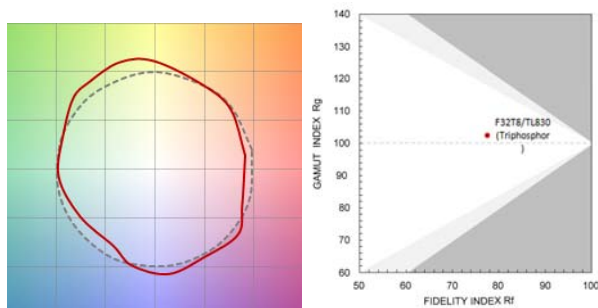
Rysunek 6. a) Wykres widmowy świetłki liniowej trójpaśmowej $S(\lambda)$ b) Cząstkowe wskaźniki oddawania barw dla świetłki liniowej trójpaśmowej według *CIE CRI*

Do badania wybrana została świetłka trójpaśmowa o $R_a=85$ i $R_9=2$ (Rys.6a). Wykres ze wskaźnikami cząstkowymi pokazuje, że wszystkie wskaźniki z których jest liczony ogólny wskaźnik oddawania barw są utrzymywane na wysokim poziomie poza wskaźnikiem R_3 , czyli odcieniem jasnej zieleni, który wynosi mniej niż 60 (Rys.6b). Dodatkowo wartości wskaźników R_9 , R_{10} , R_{12} są na bardzo niskim poziomie. Pomimo podobnych wartości próbki te posiadają barwy zniekształcone w odwrotny sposób – zielona R_3 i żółta R_{10} są bardziej nasycone, a niebieska i czerwona są ciemniejsze niż próbki wzorcowe (Rys.7).



Rysunek 7. Porównanie próbek barwnych oświetlanych źródłem wzorcowym (górną) i świetłką liniową trójpaśmową (dolną)

W badaniu metodą *IES TM-30-15*, wskaźnik wierności barwy wyszedł niższy niż *CIE CRI* i wynosi $R_f=77,4$; a wskaźnik zmiany w nasyceniu barwy $R_g=102,6$. Po odczycie zniekształceń barwnych z wykresu wektorowego wynika, że barwy zielona, żółta, niebieska i fioletowa będą miały większe nasycenie przy oświetleniu tym źródłem światła niż źródłem wzorcowym (Rys.8a).

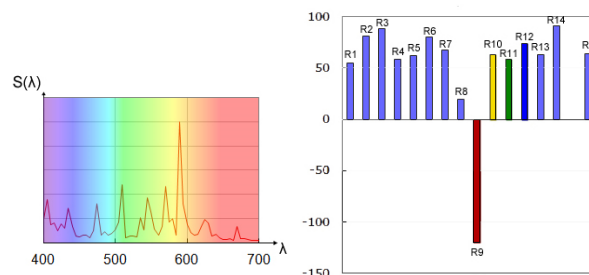


Rysunek 8. a) Wykres wektorowy zmiany barwy pomiędzy oświetleniem źródłem wzorcowym (przerwana szara linia) i źródłem trójpaśmowej (linia czerwona) b) Wykres zależności między wskaźnikami R_f i R_g

Źródła metalohalogenkowe charakteryzują się w swojej budowie występowaniem związków chemicznych, zwanych

halogenkami, które wzbogacają widmo światła emitowanego przez lampę i pozwalają uzyskać szeroki zakres temperatur barwowych najbliższych. Uzupełnienie widma o prążki dodatkowe powoduje, że źródła metalohalogenkowe jako jedyne z lamp wysokoprężnych uzyskują bardzo wysokie wskaźniki oddawania barw R_a i są często wykorzystywane do aplikacji zewnętrznych, ale także wewnętrznych [10].

Porównując wykres widmowy lampy metalohalogenkowej (Rys.9a) i świetłki liniowej (Rys.6a) możemy zauważyć, że widmo metalohalogenku jest bogatsze w poszczególnych długościach fali, a mimo to wskaźnik oddawania barw określany metodą *CIE CRI* dla świetłki wynosi $R_a=85$, a dla metalohalogenku $R_a=64$.



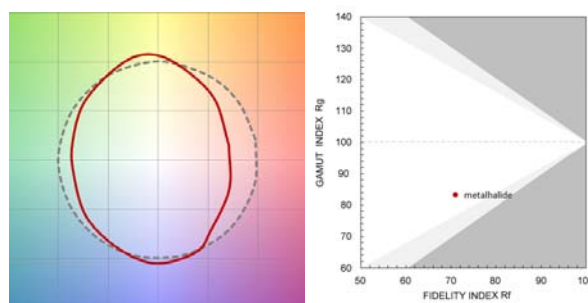
Rysunek 9. a) Wykres widmowy źródła metalohalogenkowego $S(\lambda)$ b) Cząstkowe wskaźniki oddawania barw źródła metalohalogenkowego według *CIE CRI*

Analizując cząstkowe wskaźniki oddawania barw oraz wygląd próbek barwnych można zauważyć duże zniekształcenia barwne czerwieni, róży, fioletu oraz zwiększenie nasycenia barwy żółtej (Rys.9b). Dla próbki czerwonej $R_9=-120$, co stanowi wynik trudny do zdefiniowania.

Jak zobrazowano na rysunku 10, barwa ta znacznie różni się od barwy wzorcowej, jest ciemniejsza, ale trzeba zauważyć, że równie dobrze barwa ta mogłaby być o wiele bardziej nasycona - znak przed wskaźnikiem nie definiuje nam kierunku zmiany barwy.



Rysunek 10. Porównanie próbek barwnych oświetlanych źródłem wzorcowym (górną) i źródłem metalohalogenkowym (dolną)

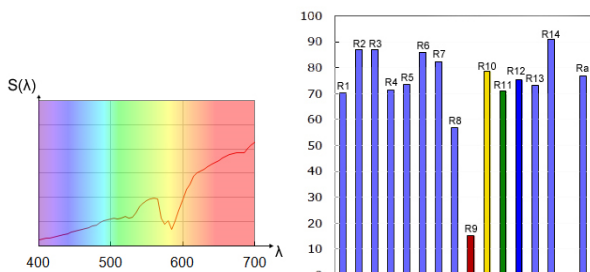


Rysunek 11. a) Wykres wektorowy zmiany barwy pomiędzy oświetleniem źródłem wzorcowym (przerwana szara linia) i źródłem metalohalogenkowym (linia czerwona) b) Wykres zależności między wskaźnikami R_f i R_g

Dla metody *IES TM-30-15* wskaźnik wierności barwy wyniósł $R_f=70,9$, a wskaźnik $R_g=83,3$. Te dwa wskaźniki i wykres wektorowy zmiany barwy (Rys.11) informują

użytkownika o możliwych dużych zniekształceniach barwnych. Wybrane źródło metalohalogenkowe nie powinno być stosowane do oświetlenia wnętrz, pomimo podobnego wyniku wskaźnika wierności barwy do źródła świetlówkowego.

Żarówka neodymowa ma rozkład widmowy będący modyfikacją promieniowaniem źródła żarowego (Rys.12a) tj. mniejszy udział żółci w stosunku do zieleni. Różnica w postrzeganiu barw pomiędzy tymi dwoma źródłami dotyczy barwy czerwonej i zielonej. Przedmioty o tych barwach oświetlone żarówką neodymową mają większą saturację niż przy świetle żarowym.



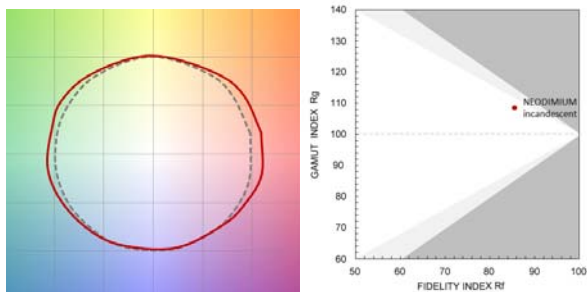
Rysunek 12. a) Wykres widmowy żarówki neodymowej $S(\lambda)$ b) Częstkowe wskaźniki oddawania barw źródła neodymowego według $CIE CRI$

Pomimo tak dużego podobieństwa tych dwóch źródeł, wskaźnik oddawania barw $CIE CRI$ dla źródła neodymowego wynosi $R_a=77$, a wskaźnik cząstkowy dla próbki czerwonej $R_9=15$ (Rys.12b).



Rysunek 13. Porównanie próbek barwnych oświetlanych źródłem wzorcowym (góra) i źródłem neodymowym (dół)

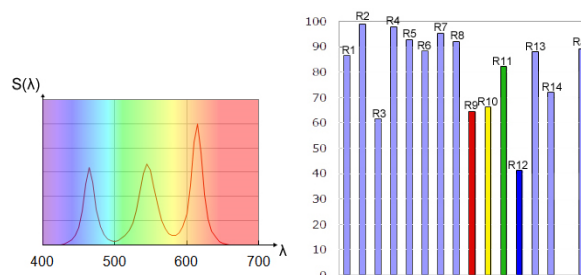
Opierając się tylko i wyłącznie na tych dwóch parametrach, można by było uznać, że to źródło światła niezbyt dobrze oddaje barwy. Analizując próbki testowe można zauważyć drobne różnice, np. przy próbce $TCS08$ dla której barwa wydaje się czystsza niż barwa próbki wzorcowej, oraz próbki $TCS09$ i $TCS11$, których odcień jest bardziej nasycony niż odcień próbki oświetlanej światłem wzorcowym (Rys.13). Zastosowanie metody $IES TM-30-2015$ dla tego źródła światła działa na jego korzyść. Otrzymujemy dwie miary: wskaźnik wierności barwy $R_f=88,5$ i wskaźnik zmiany w nasyceniu barwy $R_g=108,6$ oraz wykres zmiany w nasyceniu barwy, z którego wynika jaka zmiana barwy nastąpiła (Rys 14a).



Rysunek 14. a) Wykres wektorowy zmiany barwy pomiędzy oświetleniem źródłem wzorcowym (przerywana szara linia) i źródłem neodymowym (linia czerwona) b) Wykres zależności między wskaźnikiem R_f i R_g

W ostatnich latach źródła LED zawaładnęły rynkiem oświetleniowym. Szerokie możliwości w doborze

temperatury barwowej, łatwość sterowania, małe wymiary oraz niskie zużycie energii spowodowały, że źródła LED zastąpiły w wielu aplikacjach inne źródła światła. Niestety wiele zalet wymienianych przy tych źródłach światła, nie przekłada się na warunki rzeczywiste. Jedną z nich jest wskaźnik oddawania barw. Zdarza się, że źródła LED o wysokim wskaźniku oddawania barw R_a słabo oddają barwy, a te z niższym – oddają je lepiej [11]. Spowodowane jest to dopasowaniem widma źródła LED do dobrego oddawania barw próbek testowych. Takie źródła z reguły słabo oddają barwy wysoko nasycone np. czerwień. Do analizy użyto źródła LED wytwarzającego światło białe poprzez zmieszanie trzech barw RGB, o ogólnym wskaźniku oddawania barw $R_a=89$, i wskaźniku cząstkowym dla próbki czerwonej $R_9=65$ (Rys.15).



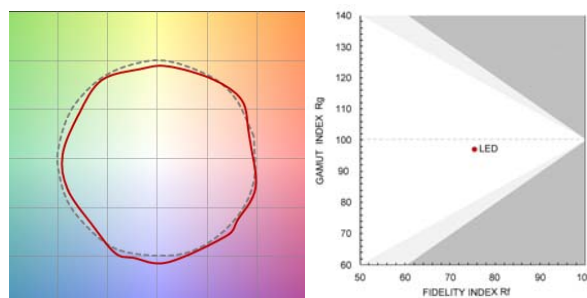
Rysunek 15. a) Wykres widmowy źródła LED $S(\lambda)$ b) Częstkowe wskaźniki oddawania barw źródła LED według $CIE CRI$

Pomimo wysokiego ogólnego wskaźnika oddawania barw, analiza próbek testowych (Rys.16) pokazuje duże zniekształcenia barwy czerwonej (R_9), żółtej (R_{10}), niebieskiej (R_{12}) oraz dwóch próbek zieleni (R_3, R_{14}).



Rysunek 16. Porównanie próbek barwnych oświetlanych źródłem wzorcowym (góra) i źródłem LED (dół)

Te zniekształcenia barwne niezauważone przez algorytm liczenia wskaźnika oddawania barw R_a , są uwzględnione przy metodzie $TM-30-15$ dla której wskaźnik wierności barwy wynosi $R_f=75,5$; a wskaźnik zmiany w nasyceniu barwy $R_g=97,1$ (Rys.17b). Analizując te dwa wskaźniki widać, że niski wskaźnik R_f nie jest wynikiem zwiększenia nasycenia barwy dla źródła badanego względem testowego, a zniekształceniem barwy w stronę niższej saturacji (Rys.17a).



Rysunek 17. a) Wykres wektorowy zmiany barwy pomiędzy oświetleniem źródłem wzorcowym (przerywana szara linia) i źródłem LED (linia czerwona) b) Wykres zależności między wskaźnikiem R_f i R_g

Wnioski

Problemy jakie pojawiają się w interpretacji wskaźnika oddawania barw $CIE CRI$ zostały szeroko udokumentowane [11,1]. Metoda ta sprawdzała się przy ocenie oddawania

barw dla źródeł świetłkowych, natomiast nie nadaje się do oceny źródeł LED. Nowy wskaźnik oddawania barw *TM-30-15* wprowadzając większą ilość próbek barwnych, równo rozłożonych w całym zakresie i bardziej jednorodną przestrzeń barw *CAM02-UCS* na wstępie eliminuje wiele błędów, które są podkreślane w systemie *CIE CRI*. Zaproponowanie nowego przejścia w źródle wzorcowym między 5500K, a 4500K sprawia, że problem w nieciągłości wzorca, który przynosił spore różnice w wartościach wskaźnika R_a , również został zminimalizowany. Wprowadzenie dwóch miar oraz wykresu wektorowego udziela o wiele więcej informacji na temat wyglądu barw oświetlanych przedmiotów niż było dostępne w *CIE CRI*. Zastosowanie skalowania wskaźnika R_f do granic 0-100, niweluje ujemne wartości wskaźnika, które wprowadzały niepewność w jego interpretacji. Pomimo wielu udoskonaleń, trzeba pamiętać, że zarówno metoda *CIE CRI* jak i *TM-30-15*, są to metody porównawcze, dla których wzorcem są określone źródła światła. Interpretacja obu wskaźników w formie „im wyższy, tym lepszy” ciągle pozostaje fałszywa.

Tabela 1. Zestawienie wyników dla rozpatrywanych źródeł światła

	<i>CIE CRI</i>		<i>TM-30-15</i>	
	R_a	R_g	R_f	R_n
Świetłówka liniowa	85	2	77,4	102,6
Źródło metalohalogenkowe	64	-120	70,9	83,3
Źródło neodymowe	77	15	88,5	108,6
Źródło LED	89	65	75,5	97,1

Analizując dane zawarte w tabeli możemy zauważyć, że wprowadzenie większej ilości próbek barwnych uwidacznia „karanie” i „nagradzanie” niektórych źródeł światła. Jest to poważny problem, ponieważ stosując do tej pory metodę *CIE CRI* producenci mogli produkować źródła światła o wysokim wskaźniku oddawania barw i wysokim LER, poprzez generowanie rozkładu widmowego, trafiającego w konkretne długości fali odpowiadające próbkom testowym. Wprowadzenie informacji o wskaźniku R_g równocześnie z podawaniem wartości wskaźnika R_f pozwala na lepszą interpretację wyniku, określając ogólny kierunek zmian barwy. Dodatkowa wizualizacja graficzna za pomocą wykresu wektorowego w całym zakresie widma, z zaznaczeniem kierunku zmian, pozwala na bezbłędne oszacowanie jakości oświetlenia.

Nowa miara spełnia rekomendacje przedstawione przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową w dokumencie *CIE:177:2007 „Colour rendering of White LED Light Sources”* [12] i może być stosowana do wszystkich źródeł światła. Żeby miara ta oficjalnie zastąpiła obecnie

obowiązującą metodę *CIE CRI*, potrzebna jest akceptacja środowiska oświetleniowego, dlatego w publikacji [12] zostało zapisane, że nowa miara zostanie wprowadzona do użytku i będzie istniała równolegle z metodą *CIE CRI*, a dopiero po akceptacji zostanie rozważone zastąpienie starej metody nową.

Metoda *IES TM-30-15* wprowadza wiele zmian w obliczaniu jakości oddawania barw. Eliminuje wiele błędów, które zostały pokazane na przestrzeni lat używania *CIE Ra (CRI)*, ale żeby w pełni zbadać jej użyteczność, potrzeba testów na rozległą skalę, które porównają wyniki otrzymane z rzeczywistym wyglądem barwy.

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] Houser K., Mossman M., Smet K., Whitehead L., Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, *Leukos*, 12(2016), 7-26
- [2] Davis W., Ohno Y., Approaches to color rendering measurement, *Journal of Modern Optics*, 56(13) (2009), 1412-1419
- [3] Žukauskas A., Shur M.S.: Handbook of Advanced Lighting Technology, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, pp.1-29
- [4] Smet K., Whitehead L., Schanda J., Luo MR.: Toward a replacement of the CIE color rendering index for white light sources, *Leukos*, vol.12, 2016, str.61-69
- [5] Alliance for Solid-State Illumination System and Technologies: Guide to Light and Color in Retail Merchadising, Lighting Research Center, vol.8, 2010, str.1-16
- [6] OSRAM Sylvania Light and Color FAQ0060-0605 1-800-LIGHTBULB 2005
- [7] 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
- [8] Publikacja CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources
- [9] TM-30 or the Quest for New Metrics to Measure Light Color Quality [dok. Elek.: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/tm-30-or-the-quest-for-new-metrics-to-measure-light-color-quality> , 2016]
- [10] Wiśniewski A.: Elektryczne Źródła Światła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010
- [11] Fryc I., Fryc J., Wąsowski K., Rozważania o jakości oddawania barw źródeł światła, wyrażanej wskaźnikiem R_a (CRI), uwzględniające fizjologię widzenia oraz zagadnienia techniczno-prawne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.2, str. 218-223
- [12] Publikacja CIE 177:2007 Colour Rendering of White LED Light Sources