

## ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD OCENY JAKOŚCI ODDAWANIA BARW ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA PRZY UŻYCIU WSKAŹNIKÓW CIE $R_a$ , NIST CQS ORAZ IES TM 30-15 $R_f$ I $R_g$

Justyna KOWALSKA<sup>1</sup>, Irena FRYC<sup>2</sup>

1. Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Techniki Świetlnej  
tel.: +222347505 e-mail: justyna.kowalska@ien.pw.edu.pl
2. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej  
tel: +857469062 e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki analizy porównawczej dotyczącej metod oceny jakości oddawania barw źródeł światła. Do porównania jakości oddawania barw zastosowano trzy metody tj. CIE  $R_a$ , NIST CQS i IES TM 30-15. Ocena jakości uzyskanych danych została przeprowadzona dla typowych świetlówek oraz lamp typu LED. W pracy wykazano, że metoda IES TM 30-15, w porównaniu z metodami CIE  $R_a$  oraz CQS, daje użytkownikowi największą liczbę informacji o jakości barwnej danego światła i umożliwia łatwą interpretację wyników, a tym samym lepsze możliwości oceny jakości danej lampy.

**Słowa kluczowe:** oddawanie barw, źródła światła, CIE  $R_a$ , NIST CQS, TM 30-15  $R_f$  i  $R_g$ .

### 1. WSTĘP

W przypadku braku naturalnego światła w otoczeniu człowieka, w celu umożliwienia sobie funkcjonowania, od zarania dziejów ludzie używają sztucznych jego źródeł. Współcześnie niezależnie od tego, czy używamy lamp jako profesjonaliści czy jedynie jako prywatni ich użytkownicy, chcemy aby wizualna jakość oświetlenia danego obszaru odpowiadała jego odbiorowi w świetle naturalnym. W związku z tym, w celu umożliwienia charakteryzowania jakości źródeł światła, zostały określone ich parametry techniczne. Producenci lamp powinni podawać na opakowaniach oferowanych wyrobów informacje dotyczące wartości ich:

- strumienia świetlnego  $\Phi$ ,
- skuteczności świetlnej  $\eta$ ,
- temperatury barwowej  $T_b$ ,
- wskaźnika oddawania barw  $R_a$ .

Z punktu widzenia metrologii promieniowania optycznego wyznaczenie strumienia świetlnego, skuteczności świetlnej oraz temperatury barwowej źródeł światła nie jest zagadnieniem będącym przedmiotem kontrowersji. Inaczej jest jednak ze wskaźnikiem oddawania barw, tj. parametrem określającym jak barwa danego obiektu jest odbierana przez ludzkie oko w zależności od źródła światła, które zostało użyte do oświetlenia tegoż obiektu. Proces powstawania wrażenia barwy u człowieka jest wywołany oddziaływaniem źródła światła (o danym rozkładzie widmowym) na obiekt charakteryzujący się konkretnym widmowym współczynnikiem odbicia. Promieniowanie padające na obiekt odbija się od niego

i dociera do układu wzrokowego człowieka, który przekazuje informację do mózgu, i w efekcie generuje określone wrażenie barwne, zależne od czułości widmowej receptorów biorących udział w procesie widzenia.

### 2. WSPÓŁCZEŚNIE STOSOWANE METODY OCENY JAKOŚCI ODDAWANIA BARW ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

W latach 60 i 70 XX wieku, Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE przedstawiła w dokumencie 13.3 metodę liczbowego określania oddawania barw przy użyciu wskaźnika  $R_a$  (Color Rendering Index - CRI). W następnych latach dokument ten był modyfikowany i obecną jego wersją jest CIE 13.3-1995. Metoda ta przez wiele lat jej stosowania okazała się bardzo użyteczną w przypadku zastosowania jej do lamp żarowych i wyładowczych (w tym świetlówek) [1]. Jednakże w przypadku źródeł typu LED, metoda określania oddawania barw wskaźnikiem  $R_a$  (CRI) nie jest w pełni obiektywna [1-3]. W związku z czym Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE podjęła intensywne prace zmierzające do uwspółcześnienia metod i narzędzi pomiarowych dotyczących wyznaczania parametrów źródeł światła stosowanych współcześnie do celów oświetleniowych [2, 4, 5].

#### 2.1. Metoda wyznaczania wskaźnika $R_a$ na podstawie dokumentu CIE 13.3-1995

W metodzie CIE 13.3 z 1995 roku porównywany jest wygląd barwny 14 próbek testowych (8 podstawowych i 6 dodatkowych) oświetlanych badanym źródłem światła w porównaniu do oświetlenia źródłem wzorcowym [2]. Jako źródło wzorcowe dla źródeł badanych o  $T_b$  poniżej 5000 K jest rekomendowany promiennik Plancka o temperaturze barwowej 3000 K, w pozostałych przypadkach jest nim matematyczny model rozkładu widmowego światła dziennego D65 o  $T_b$  wynoszącej 6500 K. Po dobraniu źródła wzorcowego, wyznaczone są dla każdej próbki barwnej współrzędne trójchromatyczne X,Y,Z przestrzeni barw CIE 1931. Wartości te po przekształceniu na odpowiadające im wartości w przestrzeni CIE UCS 1960 (u,v), poddawane są adaptacji chromatycznej von Kries. Dla każdej z próbek barwnych wyznaczone są różnice barwne i wartości cząstkowych wskaźników  $R_i$ .

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

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (2)$$

Na podstawie wartości  $R_i$  dla 8 próbek podstawowych, jako średnia arytmetyczna wyznaczany jest ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$ .

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

Wartość wskaźnika oddawania barw na poziomie 100 oznacza identyczne oddawanie barw między źródłem wzorcowym i źródłem testowym. Ocena jakości oddawania barw przez źródło światła oparta na samych wskaźnikach danych metod jest miarą trudną do zinterpretowania. W metodzie CIE 13.3 wskaźnik  $R_i$  próbki barwnej np. na poziomie 70 świadczy o zmianie barwy, ale nie definiuje kierunku tej zmiany. W związku z tym współcześnie trwają prace badawcze [3-5] zmierzające do tego, aby możliwym było jednoznaczne porównanie jakości oświetlenia próbki barwnej światłem wzorcowym i światłem badanym. Ponadto wskaźnik ten, w odniesieniu do źródeł LED nie zawsze w pełni umożliwia uzyskanie jednoznacznych w interpretacji wyników [1, 3, 6]. Dlatego też CIE w swoich pracach [4, 7, 8] dąży do wskazania adekwatnej w zastosowaniach do współczesnych źródeł światła metody określania ich jakości oddawania barw. Tego typu prace prowadzone były również w amerykańskim Narodowym Instytucie Technologii i Normalizacji NIST gdzie opracowana została metoda określania jakości oddawania barw znana pod nazwą CQS.

## 2.2. Metoda NIST CQS

Metoda obliczania CQS jest pewną modyfikacją metody CIE  $R_a$  CRI. Do obliczeń wykorzystywanych jest 15 próbek barwnych o wysokim nasyceniu, jednorodna przestrzeń barw CIELAB dla której różnice w chromatyczności między oświetleniem źródłem testowym a wzorcowym wyznaczane są za pomocą wzorów:

$$\begin{aligned} \Delta L_i^* &= L_{ii}^* - L_{ri}^* \\ \Delta C_i &= \left[ (a_{ii}^*)^2 + (b_{ii}^*)^2 \right]^{1/2} - \left[ (a_{ri}^*)^2 + (b_{ri}^*)^2 \right]^{1/2} \\ \Delta H_i &= \arctan\left(\frac{b_{ri}^*}{a_{ri}^*}\right) - \arctan\left(\frac{b_{ii}^*}{a_{ii}^*}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta L_i^*$  – różnica w jasności,  $\Delta C_i$  – różnica w barwie od zielonej do magenty,  $\Delta H_i$  – różnica w barwie od niebieskiej do żółtej.

Do obliczeń różnic barwnych zastosowano średnią kwadratową, mającą uwypuklać przesunięcia barwy w liczbowej wartości wykonanych obliczeń [9].

$$\Delta E_i^* = \left[ (\Delta L_i^*)^2 + \left( \text{Re} \sqrt{-\Delta C_i^*} \right)^2 + (\Delta H_i^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Następnie, aby uniknąć straty informacji o znacznych zniekształceniach barwnych dotyczących tylko jednej z próbek wprowadzono średnią kwadratową do obliczeń różnic barwnych dla wszystkich 15 próbek:

$$\Delta E_{RMS}^* = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (\Delta E_i^*)^2} \quad (4)$$

Ostatnim krokiem jest nieliniowe przekształcenie wyniku do skali 0-100 uwzględniające niskie wartości temperatury barwowej najbliższej.

$$Q_a = M_{CCT} \times 10 \ln \left\{ \exp \left[ \left( 100 - 3.01 \Delta E_{RMS}^* \right) / 10 \right] + 1 \right\} \quad (5)$$

gdzie:  $M_{CCT}$  – współczynnik uwzględniający wpływ temperatury barwowej najbliższej

Pomimo eliminacji niedoskonałości metody CIE CRI z 1995 roku, metoda CQS nie uzyskała akceptacji Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej i nie została przez nią zarekomendowana do stosowania w obliczeniach jakości oddawania barw źródeł światła. Dlatego też prace badawcze w tej dziedzinie były dalej kontynuowane i w 2015 roku Illuminating Engineering Society USA przedstawiło nową metodę TM 30-15 określania jakości oddawania barw źródeł światła.

## 2.3. Metoda IES TM-30-2015

W metodzie IES TM 30-15 zaprezentowano dwie miary opisujące oddawanie barw oraz dwa wykresy na których przedstawiane są graficznie różnice w barwnej jakości pomiędzy źródłem badanym i źródłem wzorcowym [10]. Wskaźniki użyte w tej metodzie oceniają wierność oddawania barwy parametrem  $R_f$  oraz charakteryzują zmiany w nasyceniu barwy przy użyciu parametru  $R_g$ . Aby ocena oddawania barw była wiarygodna w metodzie tej użyto 99 próbek barwnych rozłożonych równomiernie w całej przestrzeni barw. Dla źródeł światła o wartości temperatury barwowej najbliższej poniżej 4500 K źródłem wzorcowym jest promiennik Placka, a dla charakteryzujących się  $T_b$  powyżej 5500 K rekomendowany jest iluminant D65. W zakresie 4500-5500 K stosowana jest liniowa kombinacja rozkładów widmowych promiennika Placka i iluminantu D65. Po oświetleniu próbek światłem wzorcowym i badanym obliczane są różnice barwne w przestrzeni barw CIE CAM02-UCS. Następnie obliczana jest ich średnia arytmetyczna i wskaźnik wierności  $R_f$  oraz aby zapobiec występowaniu wartości poniżej zera wprowadza się skalowanie wartości wskaźnika do granic (0-100).

$$R_f' = 100 - 7.54 \Delta E \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta E$  – różnica barwy wyznaczona średnią arytmetyczną ze wszystkich próbek barwnych.

$$R_f = 10 \times \ln \left( \exp \left( R_f' / 10 \right) + 1 \right) \quad (7)$$

Przy obliczeniach wskaźnika zmiany w nasyceniu barwy  $R_g$  dla każdej próbki testowej oświetlanej źródłem badanym i źródłem wzorcowym wyznaczane są współrzędne barwy ( $J^*, a^*, b^*$ ). Następnie są one grupowane w 16 komórek barwnych o równej szerokości i wyznaczana jest średnia wartość  $a^*, b^*$  dla każdej komórki, która umożliwia wyznaczenie pola (ograniczonego 16 punktami) dla źródła wzorcowego i źródła badanego. Na podstawie stosunku tych dwóch pól obliczana jest wartość  $R_g$ .

$$R_g = 100 \times A_{test} / A_{ref} \quad (8)$$

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

W 2017 roku Międzynarodowa Komisja oświetleniowa CIE w raporcie technicznym CIE 224:2017 zaakceptowała wskaźnik wierności barwy  $R_f$  liczony metodą TM-30-15 jako wskaźnik dodatkowy do CIE  $R_a$  (CRI) i zarekomendowała dalsze badania nad tymi miarami i nowym zbiorem wskaźników oceniających inne właściwości barwne źródeł światła [8].

Zestawienie istotnych parametrów wskazujących na różnice w metodach CIE  $R_a$ , NIST  $Q_a$  oraz TM-30:15 służących do wyznaczania jakości oddawania barw źródeł światła przedstawiono w tabelicy 1. Metody te w swych algorytmach obliczeniowych bazują na:

- różnych przestrzeniach barw (CIE 1964 W\*U\*V\*, CIE Lab, CIE CAM02);
- operując inną liczbą testowych próbek barwnych (8, 15, 99);
- innym sposobie adaptacji chromatycznej (von Kries, CMC CAT, CIE CAM02).

Tabela 1. Zestawienie parametrów charakteryzujących metody liczbowego określania jakości oddawania barw przy użyciu CRI, CQS, TM-30-15

Metoda	CRI	CQS	TM-30:15
Wskaźniki	$R_a$	$Q_a$	$R_f$ , $R_g$
Liczba próbek	8	15	99
Źródło próbek	Atlas Munsell	Atlas Munsell	próbki zdefiniowane dla potrzeb metody
Przestrzeń barw	CIE 1964 W*U*V*	CIE Lab	CIE CAM02
Adaptacja chromatyczna	von Kries	CMC CAT	CIE CAM02
Skala	Bez ograniczeń	0-100	0-100

W związku z czym uzyskiwane dla różnych metod obliczeniowych dane liczbowe, dotyczące oddawania barw, nie powinny być bezpośrednio porównywane między sobą co do wartości. Istotnym jest natomiast, aby w obrębie jednej metody zachodziła korelacja pomiędzy jakością promieniowania

a opisującą go liczbą, tak aby większa wartość liczbowo oznaczała lepsze oddawanie barw. Z dotychczasowych doświadczeń metrologów promieniowania optycznego wynika, że nie każda metoda obliczeniowa spełnia taki warunek.

W związku z czym przeprowadzona została analiza porównawcza, jakości określania oddawania barw źródeł fluorescencyjnych i LED, różnymi wskaźnikami.

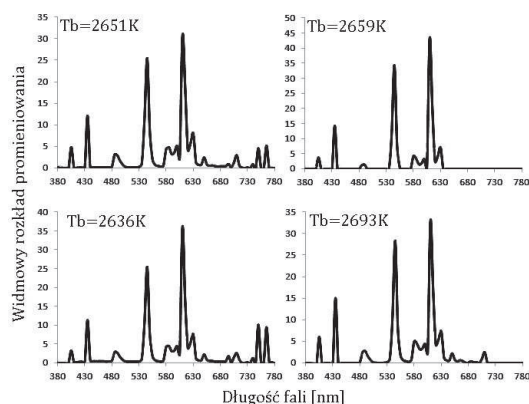
### 3. PORÓWNANIE, PRZY UŻYCIU RÓŻNYCH WSKAŹNIKÓW, JAKOŚCI OKREŚLANIA ODDAWANIA BARW ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

Analizie poddano typowe źródła fluorescencyjne (tabela 2) charakteryzujące się zbliżonymi wartościami temperatury barwowej najbliższej, ale różniące się wartościami wskaźnika oddawania barw wyznaczonego

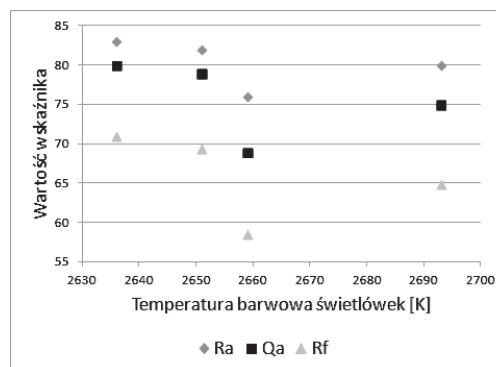
metodą CIE  $R_a$  i rozkładem widmowym emitowanego światła (rys. 1).

Tabela 2. Wskaźniki oddawania barw źródeł fluorescencyjnych charakteryzujących się zbliżoną wartością temperatury barwowej najbliższej, wyznaczone różnymi metodami

Temperatura barwowa $T_b$	$R_a$	$Q_a$	$R_f$	$R_g$
2651 K	82	79	69,4	105,4
2659 K	76	69	58,5	108,7
2636 K	83	80	70,9	107,5
2693 K	80	75	64,9	105,9



Rys. 1. Względne rozkłady widmowe mocy promienistej wybranych do obliczeń świetlówek



Rys. 2. Zestawienie wartości wskaźników oddawania barw określanych metodami  $R_a$ ,  $Q_a$ ,  $R_f$  dla rozpatrywanych źródeł fluorescencyjnych

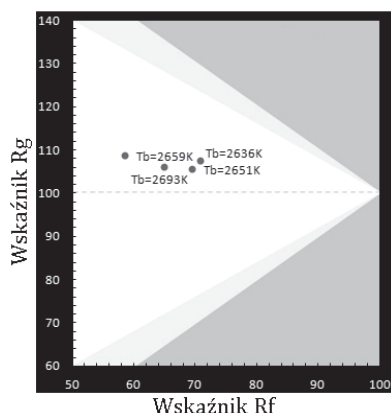
Tabela 3. Różnice wartości wskaźnika oddawania barw dla źródeł fluorescencyjnych o zbliżonej temperaturze barwowej najbliższej

Różnica pomiędzy	$\Delta R_a$	$\Delta Q_a$	$\Delta R_f$	$\Delta R_g$
2651 K a 2659 K	6	10	10,9	3,3
2659 K a 2636 K	7	11	12,4	1,2
2636 K a 2693 K	3	5	6	1,6

Analiza obliczeń wskaźników oceny oddawania barw obliczonych różnymi metodami CIE  $R_a$ , NIST CQS, IES TM-30-15 pokazuje, że dla źródeł fluorescencyjnych każda z tych metod zachowuje tak samo skierowane tendencje, wzrostu bądź spadku, różnic wartości wskaźników oceniających wierność oddawania barwy przez dane źródła światła (tabela 3). Natomiast najwięcej informacji jest zawartych w metodzie TM-30-15, gdzie oprócz wskaźnika odpowiedzialnego za wierność oddawania barwy  $R_f$ , mamy także informację o wartości wskaźnika zmiany w nasyceniu

$R_g$ . Po przedstawieniu tych dwóch wskaźników na wykresie umieszczonym na rysunku 3, możemy lepiej ocenić jakie różnice będą występowały w oddawaniu barw przedmiotów oświetlanych.

Analiza wskaźników odpowiedzialnych za ocenę wierności oddawania barw rozpatrywanych źródeł fluorescencyjnych pokazuje iż pomimo tego, że ich wartości się różnią, wyniki otrzymane każdą z tych metod, pozwalają na interpretację różnic występujących między danymi źródłami światła w taki sam sposób. Wartości wskaźników oddawania barw danych metod nie są wskaźnikami liniowymi i nie występuje pomiędzy nimi korelacja, dlatego różnice przedstawione w tablicy 3 prezentują inne wartości i mogą wprowadzać niejasności w interpretacji.

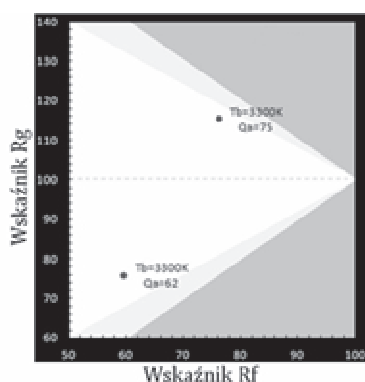


Rys. 3. Wskaźnik  $R_g$  jako funkcja wskaźnika  $R_f$  dla analizowanych źródeł fluorescencyjnych

Drugą grupą badanych źródeł światła były lampy LED typu RGB (tablica 4) o wartości  $T_b$  równej 3300 K. Zostały one pogrupowane w pary charakteryzujące się o tą samą wartością wskaźnika oddawania barw CIE  $R_a$  CRI.

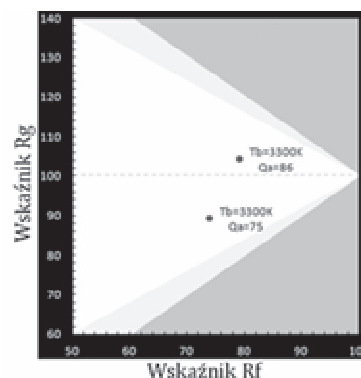
Tablica 4. Zestawienie danych obliczeniowych źródeł LED RGB o temperaturze barwowej 3300 K

Temperatura barwowa	$R_a$	$Q_s$	$R_f$	$R_g$
3300 K	67	62	59,6	75,9
3300 K	67	75	76,2	115,4
3300 K	80	75	73,9	89,3
3300 K	80	86	79,2	104,3
3300 K	90	82	76	97,7
3300 K	90	91	87,8	101,1

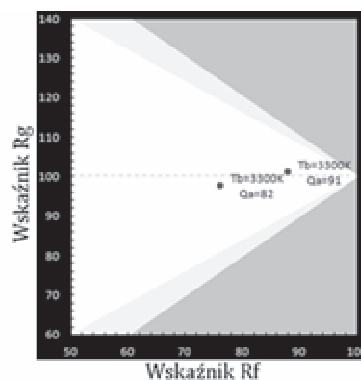


Rys. 4. Wskaźnik  $R_g$  jako funkcja wskaźnika  $R_f$  dla źródeł LED RGB o  $T_b = 3300$  K i  $R_a = 67$

Jak zobrazowano na rysunkach 4, 5 oraz 6 diody o tej samej wartości temperatury barwowej i takiej samej wartości wskaźnika oddawania barw  $R_a$  mogą charakteryzować się różniącymi się od siebie wartościami  $R_f$  i  $R_g$ . Analiza różnic wskaźników oddawania barw przedstawiona w tablicy 5 obrazuje sytuację dla której źródła światła zakwalifikowane do jednej grupy przez wskaźnik  $R_a$ , wykazują znaczne różnice w oddawaniu barw przy ocenie inną metodą. Dodatkowo metody te nie zachowują jednego kierunku określania wartości wskaźnika jak miało to miejsce dla źródeł fluorescencyjnych.



Rys. 5. Wskaźnik  $R_g$  jako funkcja wskaźnika  $R_f$  dla źródeł LED RGB o  $T_b = 3300$  K i  $R_a = 80$



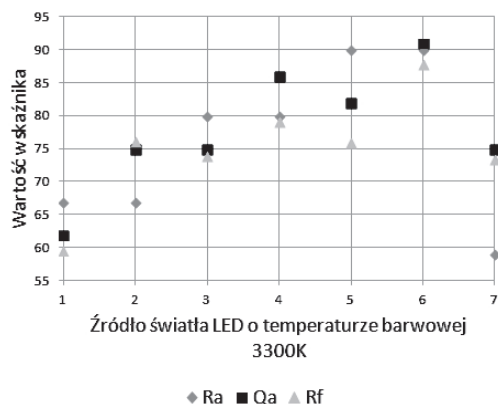
Rys. 6. Wskaźnik  $R_g$  jako funkcja wskaźnika  $R_f$  dla źródeł LED RGB o  $T_b = 3300$  K i  $R_a = 90$

Tablica 5. Zestawienie różnic wskaźników oddawania barw obliczonych dla źródeł LED o tym samym wskaźniku  $R_a$  i tej samej temperaturze barwowej

$R_a$	$\Delta R_a$	$\Delta Q_s$	$\Delta R_f$	$\Delta R_g$
67	0	13	16,6	39,5
80	0	11	5,3	15
90	0	9	11,8	3,4

Ocena oddawania barw dla tego typu źródeł światła (źródeł dla których wykres widmowy może być dowolnie kształtowany) jest trudna w interpretacji. Jak widać na rysunku 7 wszystkie metody wzięte pod uwagę w obliczeniach pokazują zupełnie inne tendencje.

Ze względu na dużą liczbę próbek testowych i ocenę na podstawie dwóch zależnych od siebie wskaźników, metoda IES TM 30-15 wydaje się najbardziej wiarygodną oceną o ile użytkownik będzie pamiętał o pewnych podstawowych informacjach o sposobie jej obliczania [11].



Rys. 7. Wykres punktowy położenia wskaźników oddawania barw  $R_a$ ,  $Q_a$ ,  $R_f$  dla danych źródeł LED RGB

#### 4. WNIOSKI

Porównanie poszczególnych metod zaproponowanych do oceny oddawania barw przez źródła światła wykazało znaczne różnice w wartościach liczbowych w przypadku elektroluminescencyjnych źródeł światła. Właściwa interpretacja wartości liczbowych metod CIE  $R_a$  oraz NIST CQS dla źródeł nieprzewidzianych w metodzie (np. źródeł LED RGB) nie daje gwarancji właściwej oceny jakości oddawania barw przez te źródła światła. Powoduje to sytuacje w których projektant oświetlenia, dobierając źródła światła o tych samych temperaturach barwowych i tych samych wskaźnikach oddawania barw, może otrzymać zupełnie inaczej oświetlone obiekty (np. jedno będą mieć barwy bardziej nasycone, drugie oświetlone innym źródłem - mniej). Metoda IES TM 30-15, prezentuje największą ilość informacji, co powoduje iż użytkownik ma umożliwiającą łatwiejszą interpretację wyników, a tym samym lepsze możliwości oceny jakości oddawania barw danego źródła światła.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF LIGHT SOURCES COLOR REDITON DESCRIBED BY CIE $R_a$ , NIST CQS AND IES TM 30-15 $R_f$ AND $R_g$

This paper presents the results of a comparative analysis methods of assessing the quality of color rendering of light sources. Three typical methods, CIE  $R_a$ , NIST CQS and IES TM 30-15, were used to compare the quality of color rendering. Quality assessment of the obtained data was made for typical fluorescent and LED lamps. The results given in the paper demonstrates that the calculated data with agreement of IES TM 30-15, compared to the calculations results of CIE  $R_a$  and CQS methods, gives the greatest amount of useful information about the color quality of light source and allows easy interpretation of the results and thus better possibilities for evaluating the quality of a light source.

Additionally is possible put the statement that evaluation of color rendering of light source with tunable spectral power distribution (i.e. RGB LED) is difficult to interpret. Based on the data presented in this article, it can be stated that in this type of light sources the results obtained by the IES TM 15-30 method seem to be the most reliable. The other issue is with typical fluorescent lamp. In this case their color rendering can be evaluated with good results by any of presented method.

**Keywords:** color rendering, light sources, CIE  $R_a$ , NIST CQS, TM 30-15  $R_f$  i  $R_g$ .

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Žukauskas A., Shur M.S.: Color Rendering Metrics: Status, Methods and Future Development, Handbook of Advanced Lighting Technology, Switzerland 2016, s. 1-29.
2. Houser K., Mossman M., Smet K., Whitehead L.: Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, Leukos, 12 (2016), s. 7-26.
3. Kowalska J.: Niejednoznaczności i ograniczenia w określaniu jakości oddawania barw źródeł światła wskaźnikiem  $R_a$  (CIE CRI), Przegląd Elektrotechniczny, 2017, Nr. 5, s. 74-78.
4. Publikacja CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources.
5. Royer M.P.: IES TM-30-15 Is Approved-Now What?, Leukos, 12, 2016, s. 3-5.
6. 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, s. 218-223.
7. Publikacja CIE 177:2007 Colour Rendering of White LED Light Sources.
8. Publikacja CIE 224:2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use.
9. Davis W., Ohno Y.: Color Quality Scale, Opt. Eng. 49(3), 2010.
10. 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, s. 15888-15906.
11. Kowalska J.: Analiza parametrów opisujących jakość oddawania barw źródeł światła zgodnie z IES TM 30-15 i z CIE 013.3-1995, XXV Krajowa Konferencja Oświetleniowa TECHNIKA ŚWIETLNA 2016, s. 39-48.

