

**Wojciech MOĆKO**

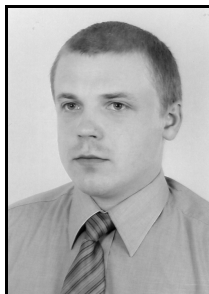
INSTYTUT TRANSPORTU SAMOCHODOWEGO, ZAKŁAD OŚWIETLENIA I WYPOSAŻENIA ELEKTRYCZNEGO

**Propozycja nowej metodologii określania dokładności pomiaru barwy kolorymetrem**

Mgr inż. Wojciech MOĆKO

Absolwent specjalności systemy pomiarowo-kontrolne na wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej. W 2006 r. otworzył przewód doktorski w Zakładzie Techniki Światłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Obecnie zajmuje się głównie pracami naukowo-badawczymi z zakresu oświetlenia oraz projektowaniem i tworzeniem oprogramowania systemów pomiarowych. Autor lub wykonawca kilkunastu prac naukowo-badawczych wykonywanych w ITS, specjalista PKOŚ.

e-mail: wojciech.mocko@its.waw.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono propozycję nowej metodologii wyznaczania i prezentacji dokładności pomiaru barwy dla kolorymetrów. Może ona być zastosowana dla kolorymetrów matrycowych oraz mierników luminancji posiadających możliwość pomiaru barwy. Opracowana metoda jest rozwinięciem metody wskaźników oddawania barw. Przy jej opracowaniu uwzględniono wady i zalety dotychczas stosowanych metod. Wyniki są prezentowane w czytelny i łatwy do zinterpretowania sposób w jednostkach równomiernego układu barw.

**Słowa kluczowe:** kolorymetr, metodologia, błędy pomiarowe, pomiar barwy.

**New methodology of characterizing the performance of colorimeter****Abstract**

This article describes new methodology of characterization the measurement errors of colorimeter. It can be applied for imaging colorimeters and luminance meters with capability of color measurement. Shown method is derived from color rendering index. Measurement results are presented clearly and easy to understand way.

**Keywords:** colorimeter, methodology, measurement errors, color measurements.

**1. Wstęp**

Producenci urządzeń fotometrycznych, przygotowując specyfikację parametrów technicznych produkowanych urządzeń, korzystają z bardzo różnych norm i przepisów. Zdarza się, że są to normy wewnętrzne danej firmy, do których końcowy użytkownik urządzenia ma utrudniony dostęp. Z szeroką gamą zastosowanych wymagań wiąże się także niejednolity sposób prezentacji końcowych parametrów urządzenia. W przypadku kolorymetrów trój-bodźcowych producent najczęściej podaje maksymalny dopuszczalny błąd pomiaru współrzędnych chromatycznych na wykresie CIE (x,y), rzadziej odchylenie czułości widmowych danego urządzenia od krzywych składowych trójchromatycznych widmowych (podobnie jak w fotometrii), w postaci błędu  $f_1'$ . Sporadycznie, w przypadku najdroższych urządzeń, otrzymujemy pełne charakterystyki czułości widmowej. Każdy z tych sposobów ma swoje wady i zalety.

W pierwszym przypadku zaletą jest bezpośrednie określenie granic błędu. Można to wykorzystać np. w szacowaniu niepewności pomiaru lub łatwo określić przedział wartości, w którym znajduje się wynik pomiaru. Wad takiego systemu opisu dokładności kolorymetru może być świadomy tylko zaawansowany użytkownik o dużej wiedzy z zakresu kolorimetrii i fotometrii. Dokładność pomiaru współrzędnych chromatycznych z wykorzystaniem miernika jest wyznaczana zazwyczaj dla ściśle określonych warunków – najczęściej jest to pomiar barwy przy oświetleniu ilumi-

nantem A. Nie ma żadnej pewności, że mierząc sygnały różniące się składem widmowym od tego typu źródła (np. sygnały barwne, światło lamp wyładowczych) podana przez producenta dokładność pomiaru zostanie zachowana. Ponadto taka sama różnica barwy  $\Delta CR$  na wykresie współrzędnych chromatycznych może, w zależności od odcienia i nasycenia, różnić się od postrzeganej różnicy barw nawet trzydziestokrotnie. Może to powodować błędną interpretację parametrów podanych w specyfikacji technicznej kolorymetru. W przypadku pomiaru barw w obszarze, gdzie wrażliwość oka na różnicę barw jest największa tzn. odcienie niebieskiego, należy stosować mierniki o większej dokładności. W przypadku pomiaru barw o odcieniu zieleni, dla których oko słabo rozróżnia barwy nie ma takiej potrzeby, ponieważ obserwator nie zauważy różnicy i dokładniejszy pomiar nie ma uzasadnienia.

Drugim sposobem charakteryzacji kolorymetrów jest podanie odchylenia czułości widmowej kanałów X, Y, Z od kształtu krzywych składowych trójchromatycznych widmowych (inaczej – współczynników kolorymetrycznych). W tym przypadku otrzymujemy zestaw trzech współczynników:  $f_1'x$ ,  $f_1'y$ ,  $f_1'z$ . Definicja błędu  $f_1'$  mówi, że jest on proporcjonalny do całki z różnicy pomiędzy charakterystyką widmową wzorcową a badaną. W trakcie operacji całkowania informacja o wartości odchylenia dla poszczególnych długości fali jest tracona. Nie mając pełnej charakterystyki czułości detektora, nie można przewidzieć jaki będzie ona miała wpływ na wynik konkretnego pomiaru. Zazwyczaj zakłada się, że odchyłka jest w miarę równomierna dla całego widma. Gorzej jeżeli jest ona wyraźna dla niewielkiego zakresu długości fali. Ma to szczególnie duże znaczenie w przypadku pomiaru bodźców barwowych o wąskim widmie. Jeżeli mierzony sygnał będzie miał duże wartości akuratu dla długości fali, w których charakterystyka odbiega od wzorcowej, błędy pomiarowe będą duże. Najlepsze dostępne na rynku kolorymetry mają błędy  $f_1'$  na poziomie 1-2%. Na rys. 1 pokazano dwa przykłady charakterystyk czułości widmowych fotometru. W obydwu wartość błędu dopasowania wynosi 2%, ale rozkład błędu jest zupełnie inny. Mierząc sygnał o niebieskim odcieniu (dużo składowych w zakresie fal krótkich do 500 nm) za pomocą fotometru o charakterystyce jak na rys. 1a) możemy spodziewać się bardzo dużych błędów pomiaru, pomimo że 2% błąd dopasowania świadczył o wysokiej klasie miernika.

Najpełniejszym sposobem charakteryzacji błędów pomiaru barwy z użyciem kolorymetru jest podanie kształtów czułości widmowej poszczególnych kanałów. Jest to metoda bardzo dokładna, ale i bardzo nieporęczna. Z jednej strony wiadomo jakich błędów można się spodziewać przy pomiarze sygnałów o określonych rozkładach widmowych, ale z drugiej liczbowe określenie dokładności pomiaru wymaga wykonania pewnych obliczeń oraz założenia określonych kształtów widma badanego bodźca.

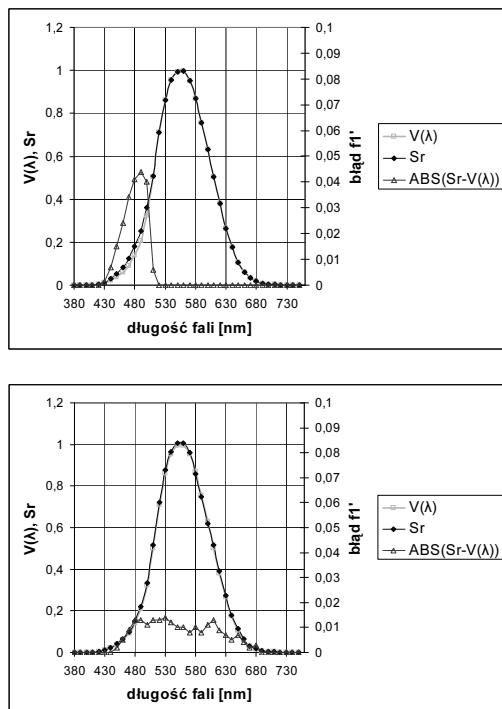
Podsumowując, przedstawione metody charakteryzacji kolorymetru opierają się na:

- podaniu błędu granicznego przy pomiarze bodźca o ściśle określonych właściwościach spektralnych,
- podaniu odchylenia czułości detektora od charakterystyki wzorcowej.

Rozważając przedstawione wady i zalety poszczególnych metod charakteryzacji błędów pomiaru barwy kolorymetrów oraz charakterystyczne cechy kolorymetrów matrycowych, można sformułować wymagania jakie, ulepszone z punktu widzenia przydatności dla użytkownika końcowego metoda, powinna spełniać:

- Metoda powinna określać wartość błędu pomiaru barwy bezpośrednio, w jednostkach różnicy barwy układu równomiernego USC,

- Wynik powinien być czytelny i łatwy do interpretacji,
- Wartość błędu powinna być wyznaczona dla różnych charakterystyk widmowych (odcieni) mierzonych bodźców barwowych,
- Metoda powinna być oparta o pomiar luminancji, co wynika z konstrukcji kolorimetru matrycowego.



Rys. 1. Ilustracja błędu 2% w zależności od kształtu czułości widmowej przetwornika

Fig. 1. 2% error depend on photodetector spectral sensitivity curve

Przedstawiona w niniejszym artykule metodologia bazuje na metodzie wskaźników oddawania barw. Pierwotna metoda została rozszerzona i odpowiednio zmodyfikowana pod kątem nowego zastosowania. Do prezentacji wyników wykorzystano najnowszy model postrzegania różnicy barw CIEDE2000, który został opracowany zaledwie kilka lat temu [4].

## 2. Wskaźnik oddawania barw

Metoda wskaźników oddawania barw [1] służy do oceny właściwości oddawania barw achromatycznych źródeł światła (zarowych, fluorescencyjnych, wyładowczych – bez dominującego promieniowania monochromatycznego). Są one określane przesunięciem punktu chromatyczności zestawu próbek przy ich oświetleniu źródłem badanym zamiast odniesieniowego oraz wartościami ogólnego i szczególnego wskaźnika oddawania barw. Jako źródło odniesieniowe stosuje się iluminant o innym składzie widmowym i o tej samej chromatyczności co źródło badane. Dla źródła o temperaturze barwowej najbliższej poniżej 5000 K - ciało czarne, a dla źródeł o temperaturze barwowej najbliższej powyżej 5000 K - rozkład widmowy promieniowania światła dziennego. Jako źródła odniesieniowe mogą być stosowane także iluminanty normalne CIE lub inne źródła o charakterystyce widmowej określonej z rozdzielczością co najmniej 10 nm. Różnica barw współrzędnych chromatycznych źródła badanego i odniesieniowego w układzie (u, v) nie może być większa niż 0,0054. Porównywanym obiektem jest zestaw 14 próbek z atlasu Munsella.

Pierwsze osiem służy do obliczania ogólnego wskaźnika oddawania barw, kolejne sześć do obliczania szczególnego (dodatkowego) wskaźnika barw. Jako obiekt porównania można wykonać również inne próbki wzorcowe pod warunkiem znajomości ich widmowych współczynników luminancji.

Początkowym etapem badania jest wyznaczenie widmowego rozkładu mocy źródła. Na tej podstawie oblicza się temperaturę barwową najbliższą, która służy do wybrania odpowiedniego iluminantu odniesieniowego. Jego widmowy rozkład mocy jest obliczany bądź odczytywany z tablic. Dysponując rozkładami widmowymi źródeł oraz widmowymi współczynnikami odbicia próbek odniesieniowych należy wyznaczyć współrzędne chromatyczne w układzie (u, v) próbek oświetlonych źródłem badanym:  $u_{k,i}$ ,  $v_{k,i}$  oraz iluminantem wzorcowym:  $u_{r,i}$ ,  $v_{r,i}$ . Aby uwzględnić adaptację chromatyczną, która jest spowodowana różnicą barwy źródła badanego i iluminantu wzorcowego należy wprowadzić nowe współrzędne:  $u'_{k,i}$ ,  $v'_{k,i}$  skorygowane w następujący sposób:

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - 4 \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}{16,518 + 1,481 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - 4 \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}, \quad (1)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - 4 \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}. \quad (2)$$

Wartości  $c_r$ ,  $d_r$  są podane w tablicach, a wartości funkcji c i d ze wskaźnikami k oraz r wyznacza się z równań:

$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v), \quad (3)$$

$$d = \frac{1}{v} (1,708v + 0,404 - 1,481u). \quad (4)$$

Po obliczeniu wartości współrzędnych chromatycznych badanego źródła  $u_{k,i}$ ,  $v_{k,i}$ , iluminantu wzorcowego  $u_{r,i}$ ,  $v_{r,i}$  oraz współczynnika luminancji Y badanych próbek należy wyznaczyć składowe trójchromatyczne  $W^*_{k,i}$ ,  $U^*_{k,i}$ ,  $V^*_{k,i}$  oraz  $W^*_{r,i}$ ,  $U^*_{r,i}$ ,  $V^*_{r,i}$ . Różnicę barw o indeksie i wyznacza się ze wzoru

$$\Delta E_i = \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_{k,i})^2 + (V^*_{r,i} - V^*_{k,i})^2 + (W^*_{r,i} - W^*_{k,i})^2}. \quad (5)$$

Na podstawie wartości różnicy barw dla każdej z próbek wyznacza się szczególne wskaźniki  $R_i$  oddawania barw

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

Ogólny wskaźnik oddawania barw wyznacza się jako średnią z pierwszych ośmiu próbek wzorcowych

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i. \quad (7)$$

Metoda wskaźników oddawania barw mimo swojej niedoskonałości jest najbardziej rozpowszechnionym i najlepszym sposobem charakteryzowania właściwości barwnych źródeł światła. Ogólny i szczególne wskaźniki oddawania barw są podawane jako podstawowe parametry w katalogach źródeł światła tak jak napięcie zasilania, czy moc źródła i pomimo, że wymagają nieco doświadczenia do prawidłowej interpretacji, są znakomitym i czytelnym sposobem opisu źródeł światła.

## 3. Pojęcie różnicy barw – próba opisanie modelu postrzegania barw przez oko ludzkie

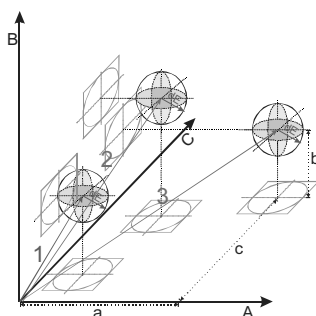
Pierwszy stosowany powszechnie układ barw CIE XYZ był układem nierównomiernym, co oznacza, że ta sama wartość

różnicy barw wyrażona w jednostkach układu ma różną wagę w zależności od położenia w przestrzeni barw. Przez wagę należy rozumieć postrzeganą różnicę barw. Podjęto prace nad przygotowaniem układu barw, którego wyniki pomiaru będą odzwierciedlać postrzeganie różnicy barw przez oko ludzkie. Tam gdzie ludzkie oko jest najwrażliwsze na postrzeganie różnicy barw waga błędu jest największa, a tam gdzie ludzkie oko jest najmniej wrażliwe waga błędu jest najmniejsza. W ten sposób powstała idea równomiernych układów barw (Uniform Color Scale - UCS). Znalazły one zastosowanie w przemysłowej ocenie różnicy barw [2], dzięki której można określić np. tolerancje wykonania w procesie produkcyjnym pokryć barwnych.

W miarę poznawania nowych faktów związanych z fizjologią i sposobem postrzegania przez człowieka barw, a także dzięki postępowi w technice i możliwości prowadzenia coraz bardziej zaawansowanych badań w dziedzinie oświetlenia, opracowywano i rozwijano kolejne modele oceny różnicy barw, coraz bardziej zbliżone do idealnego, który powinien spełniać dwa podstawowe warunki:

- wartości powinny być równomierne niezależnie od barwy i od kierunku różnicy barw,
- umożliwiać stosowanie w różnych rodzajach testów dla różnych typów porównywanych powierzchni.

Model różnicy barw można nazwać równomiernym jeżeli wartość różnicy barw jest stała dla dowolnej pary dwóch barw o takiej samej postrzegalnej różnicy barw. W idealnie równomiernej trójwymiarowej przestrzeni barw stała różnica barw dla danych składowych trójchromatycznych będzie przedstawiona jako sfera wokół punktu odpowiadającego tym składowym. Przy zmianie wartości składowych trójchromatycznych i stałej różnicy barw, sfera będzie miała stały promień, ale będzie odpowiednio przesunięta w przestrzeni. Taki hipotetyczny idealny układ UCS przedstawiono na rys. 2. Jest on oparty na składowych podstawowych A, B i C. Stała różnica barw  $dE$  dla trzech różnych bodźców barwowych 1, 2 i 3 ma kształt sfer o jednakowych promieniach wokół punktów w przestrzeni reprezentujących daną barwę. Dla bodźca barwowego nr 3 oznaczono wartości składowych trójchromatycznych (a, b, c).



Rys. 2. Równomierny model różnicy barwy  
Fig. 2. Uniform color difference model

Opracowanie modelu różnicy barw jest oparte na badaniach eksperymentalnych, które polegają na obserwacji i ocenie postrzeganą różnicę barw próbek przez szereg osób. W najprostszych przypadkach przyjmuje się, że ocena wartości różnicy barw zależy od położenia, kierunku i wartości różnicy pomiędzy porównywanymi bodźcami. W bardziej rozbudowanych modelach uwzględnia się także charakterystykę materiału, warunki obserwacji i parametry oświetleniowe.

Można zidentyfikować dwa podstawowe rodzaje modeli: empiryczne i teoretyczne. Pierwsze opierają się na obliczeniu parametrów wybranego typu przekształcenia na podstawie danych z eksperymentu. Zazwyczaj są to przekształcenia liniowe składowych lub współrzędnych trójchromatycznych. Przykładem takiego modelu jest przestrzeń barw  $U^*V^*W^*$ . Podejście teoretyczne wykorzystuje znajomość mechanizmów postrzegania barwy,

takich jak: pobudzenie czopków, adaptacja chromatyczna, zjawisko postrzegania barw przeciwnych.

Współczynniki modelu są tak dobierane, aby pasował on jak najlepiej do danych eksperymentalnych. Najbardziej znanym przykładem takiego modelu jest przestrzeń barw CIELAB. W miarę coraz dokładniejszego poznawania specyfiki postrzegania barw oraz możliwości prowadzenia coraz dokładniejszych i odtwarzalnych eksperymentów zrodziła się potrzeba połączenia obu modeli w jeden empiryczno-teoretyczny. Jako pierwszy dokonał tego w 1980 roku McDonald. Opracowany przez niego model, jak i wszystkie późniejsze, oparty był na CIELAB nosi nazwę CMC [3] i jest praktycznie stosowany w przemyśle. Kolejne modyfikacje modelu CIELAB zaproponowali Luo i Rigg w 1986 roku oraz Berns w 1991. Stosowane w kolorymetrii układy barw oraz modele postrzegania różnicy barw zostały szczegółowo opisane w raportach CIE. W tabeli poniżej przedstawiono postęp zgodności z rzeczywistością kolejnych opracowanych modeli.

Tab. 1. Zgodność obliczonej i postrzeganą różnicy barw  
Tab. 1. Calculated and perceived color difference conformity

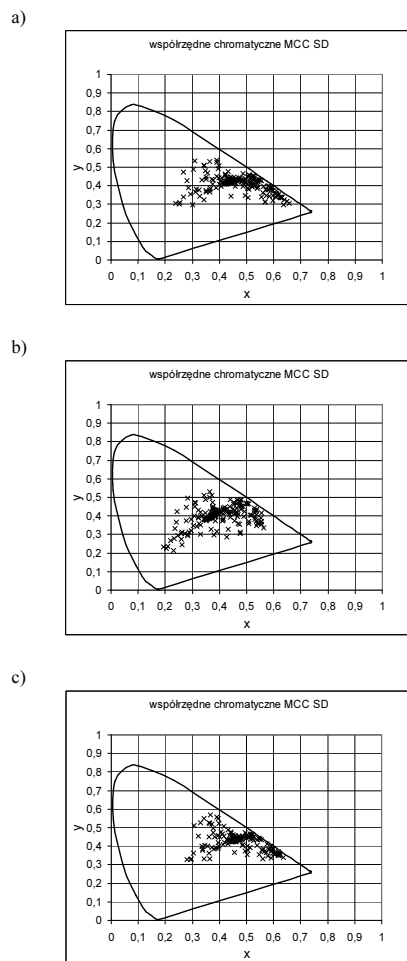
Model	Zgodność
CIELAB	75%
CIELCH	85%
CIE 1994	95%
CIE 2000	99%

## 4. Propozycja metody oceny błędu pomiaru barwy kolorymetrem matrycowym

Na podstawie metody wskaźników oddawania barw opracowano metodologię oceny błędu pomiaru barwy z wykorzystaniem kolorymetru. Podobnie jak w metodzie bazowej wykorzystuje się próbki wzorcowe, które bada się testowanym urządzeniem i porównuje wynik do urządzenia wzorcowego. Wyniki są przedstawiane w jednostkach układu UCS. Metodę można zastosować do charakteryzacji kolorymetrów matrycowych oraz mierników luminancji posiadających funkcję pomiaru barwy.

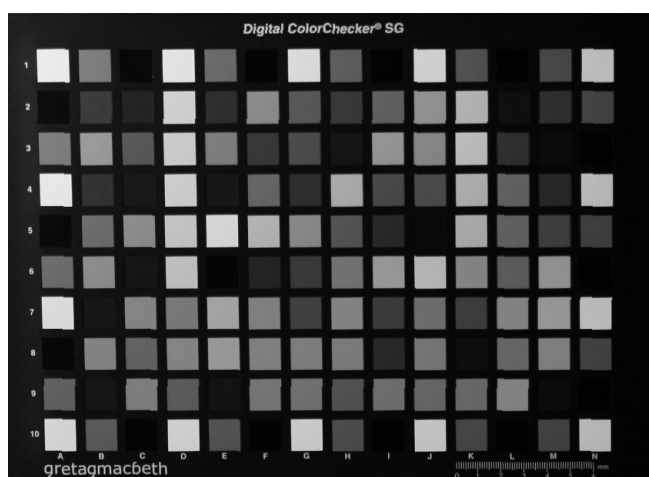
### 4.1. Zestaw próbek odniesieniowych

Metoda wskaźników oddawania barw wykorzystuje pomiar porównawczy czternastu próbek o różnych odcieniach i luminancjach. Zdecydowano się znacznie zwiększyć tę ilość w celu dokładniejszego scharakteryzowania badanego kolorymetru. Zestaw próbek odniesieniowych należało dobrać tak, aby reprezentował dużą liczbę różnych odcieni wypełniając przy tym równomiernie jak największy zakres barw fizycznych. Barwa próbek powinna być stabilna w czasie. Cały zestaw próbek (ich barwa oraz parametry fotometryczne) powinien być jednoznacznie zdefiniowany i łatwo dostępny dla potencjalnych użytkowników. Takie warunki spełniają różnego rodzaju próbniki, wzorniki i atlasy barw. W przeprowadzonych badaniach zastosowano wzornik Digital Color Checker SG firmy Gretagmacbeth (w skrócie DCC). Jest on stosowany w fotografii i multimediami do kalibracji różnych urządzeń. Współrzędne chromatyczne jego poszczególnych pól przedstawiono na rys. 3. Całość składa się ze 140 barwnych pól (rys. 4). Próbki szare są umieszczone w środkowej części wzornika, natomiast na zewnątrz są dodatkowe próbki w odcieniach szarości, które zostały pominięte w badaniach. W trakcie pomiarów wykorzystano więc 96 barwnych próbek.



Rys. 3. Współrzędne chromatyczne wzornika DCC a) – iluminant A, b) – iluminant D65 c) iluminant FL

Fig. 3. Chromatic coordinates of DCC a) – il A, b) – il D65 c) il FL



Rys. 4. Wzornik DCC

Fig. 4. DCC chart

## 4.2. Oświetlenie

W publikacji CIE nr 13 [5] zdefiniowano kilkanaście różnych iluminantów wzorcowych w czterech głównych kategoriach: światło dzienne, świetlówki, lampy wysokociśnieniowe oraz żarowe. Najczęściej stosowanymi w metrologii są iluminanty:

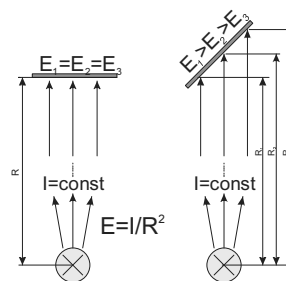
- D65 określający rozkład widmowy światła dziennego,
- A rozkład widmowy światła z żarówki wolframowej.

Popularność tych źródeł w fotometrii nie jest przypadkowa. W codziennym życiu najczęściej można spotkać się właśnie z takim rodzajem oświetlenia. W ciągu dnia obserwuje się przedmioty w świetle dziennym o rozkładzie zbliżonym do iluminantu D65. Podobny rozkład widmowy ma również coraz popularniejsza w oświetleniu samochodowym lampa ksenonowa. W nocy wykorzystuje się oświetlenie emitujące światło o widmie zbliżonym do iluminantu A, w postaci najróżniejszych typów żarówek, czy to w mieszkaniach, czy pojazdach, bądź w zakładach pracy.

W ostatnich latach, kiedy ciągle rosną ceny energii elektrycznej oświetlenie żarowe jest coraz częściej zastępowane przez świetlówki. W domach, biurach, firmach, a nawet w środkach komunikacji zbiorowej tradycyjne żarówki pojawiają coraz rzadziej. Choć tendencja nasila się już od jakiegoś czasu, ciągle nie ma to odzwierciedlenia w normach obejmujących badania fotometryczne i kolorymetryczne. Podstawowymi źródłami są ciągle A i D65. W metodologii opracowanej w ramach niniejszej pracy zdecydowano się jednak na umieszczenie iluminantu FL, czyli świetlówki, jako jednego z trzech źródeł wzorcowych. Pomimo, że różnorodność świetlówek jest ogromna, a co za tym idzie trudno zdefiniować dokładnie rozkład widmowy wzorca (CIE przytacza aż 12 różnych rozkładów widmowych) nawet otrzymane tylko dla jednej świetlówki wyniki mogą już być użyteczne w praktyce.

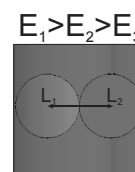
## 4.3. Geometria pomiaru

Wykonanie pomiaru w geometrii 45/0, zalecanej przez CIE dla pomiarów barwy, może prowadzić do błędów pomiarowych. Zastosowano typowy oświetlacz dający quasi-równoległą wiązkę świetlną i nierównomierną płaszczyznę świetlną. Ponieważ część próbki wzorcowej w geometrii 45/0 będzie oddalona bardziej od oświetlacza niż inna jej część (rys. 5), oraz z powodu niedoskonałości oświetlacza, natężenie oświetlenia  $E$  na próbce będzie nierównomierne. Pole pomiarowe kolorymetru nie może obejmować ramek występujących między polami barwnymi lub co ważniejsze sąsiednich próbek i musi być położone wewnątrz danej próbki. W takim przypadku możliwe jest różne ustawienie osi kolorymetru wzorcowego i badanego względem próbki (rys. 6). Spowoduje to, że zmierzony zostanie obszar oświetlony z różnym natężeniem oświetlenia, co prowadzi do błędów w pomiarze. Aby uniknąć problemów z pozycjonowaniem mierników zaproponowano zastosowanie geometrii 0/45, która zapewnia dużo większą równomierność oświetlenia badanego wzornika.



Rys. 5. Nierównomierne oświetlenie próbki w geometrii 45/0

Fig. 5. Non-uniform illumination of sample in 45/0 geometry

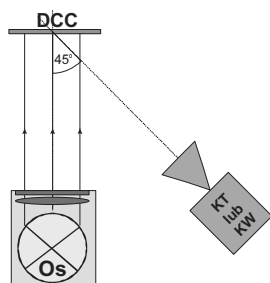


Rys. 6. Błąd pozycjonowania kolorymetru

Fig. 6. Colorimeter positioning error

#### 4.4. Przebieg badania

Całe badanie składa się z trzech serii pomiarów, dla każdego z przestawionych iluminantów (A, D65, FL). W obrębie każdej serii wykonuje się pomiary porównawcze dla każdej z 96 próbek wzorcowych. Wyniki pomiaru kolorymetrem badanym są porównywane do kolorymetru wzorcowego. Dokładność kolorymetru wzorcowego powinna być odpowiednio większa, w stosunku do testowanego kolorymetru. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat stanowiska do oceny błędu pomiaru barwy: Os – oświetlacz, KT – kolorymetr testowany, KW – kolorymetr wzorcowy, DCC – wzornik barw DigitalColor Checker

Fig. 7. Color measurement error test standing: Os-illuminator, KT tested colorimeter, KW standard colorimeter, DCC Digital Color Checker chart

#### 4.5. Prezentacja wyników

Różnica barw lub błąd pomiaru barwy może być wyrażony w różnych jednostkach zależnych od zastosowanego układu kolorymetrycznego, bądź modelu oceny różnicy barw. W metodzie wskaźników oddawania barw posłużono się równomiernym układem  $U^*W^*V^*$ , który był najbardziej zaawansowanym modelem postrzegania różnicy barwy. W ramach niniejszej metodologii wykorzystano opracowany zaledwie kilka lat temu model CIEDE2000 [4], dający 99% zgodność obliczonej i postrzeganej różnicy barwy.

Ponieważ wynikiem badań jest aż 96 wyników dla każdego z trzech iluminantów, zaproponowano usystematyzowanie i analizę wyników pomiaru. Wyniki pojedynczych pomiarów oznaczono:

$$\begin{aligned} \Delta E_{A,i} \\ \Delta E_{D65,i} \\ \Delta E_{FL,i} \end{aligned}$$

Gdzie: A, D65, FL – oznaczenia iluminantów, i – liczba z zakresu 1..96 oznaczająca numer próbki wzornika.

Dla każdego iluminantu wyznaczono minimum, maksimum i średnią wartość błędu z 96 pomiarów:

$$\Delta E_{A,MIN} = \text{Min}(\Delta E_{A,1..96}) \quad (8)$$

$$\Delta E_{A,MAX} = \text{Max}(\Delta E_{A,1..96}) \quad (9)$$

$$\Delta E_{A,AV} = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{A,i} \quad (10)$$

$$\Delta E_{D65,MIN} = \text{Min}(\Delta E_{D65,1..96}) \quad (11)$$

$$\Delta E_{D65,MD65X} = MD65x(\Delta E_{D65,1..96}) \quad (12)$$

$$\Delta E_{D65,AV} = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{D65,i} \quad (13)$$

$$\Delta E_{FL,MIN} = \text{Min}(\Delta E_{FL,1..96}) \quad (14)$$

$$\Delta E_{FL,MAX} = \text{Max}(\Delta E_{FL,1..96}) \quad (15)$$

$$\Delta E_{FL,AV} = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{FL,i} \quad (16)$$

Dodatkowo wyznaczono minimum, maksimum i średnią ze wszystkich pomiarów:

$$\Delta E_{MIN} = \text{Min}(\Delta E_{A,1..96}, \Delta E_{D65,1..96}, \Delta E_{FL,1..96}) \quad (17)$$

$$\Delta E_{MAX} = \text{Max}(\Delta E_{A,1..96}, \Delta E_{D65,1..96}, \Delta E_{FL,1..96}) \quad (18)$$

$$\Delta E_{AV} = \frac{1}{3 \cdot 96} \left( \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{A,i} + \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{D65,i} + \sum_{i=1}^{96} \Delta E_{FL,i} \right) \quad (19)$$

Duża liczba pojedynczych pomiarów powoduje, że najwygodniejszym i najczytelniejszym sposobem prezentacji jest wykres błędów w zależności od barwy próbki (współrzędnych chromatycznych). Dzięki przedstawieniu danych w postaci statystycznej, użytkownik urządzenia, oznaczając parametry techniczne, może od razu uzmysłowić sobie dokładność pomiaru w zależności od odcienia mierzonej próbki, a także jej rodzaju oświetlenia. Na przykład do celów pomiaru barwy lamp sygnałowych pojazdów, należy szukać urządzenia, które dokładnie mierzy odcienie czerwieni i żółci. Inne barwy są nieistotne i tam błąd pomiaru może być większy. Dodatkowo dane statystyczne można bezpośrednio wykorzystać jako jeden ze składników w analizie niepewności pomiaru.

#### 5. Podsumowanie

(Przedstawiono podstawowe założenia opracowanej metodologii oceny błędu pomiaru barwy:

Przeznaczenie:	Kolorymetry matrycowe, mierniki luminancji z funkcją pomiaru barwy
Próbki odniesieniowe:	96 próbek z wzornika Digital Color Checker SG
Miernik wzorcowy:	kolorymetr wzorcowy o odpowiedniej dokładności pomiaru
Geometria pomiaru:	0/45
Iluminanty:	A, D65, FL
Wyniki pomiaru:	Wyrażone w jednostkach CIEDE2000

#### 6. Literatura

- [1] Mielicki J., „Zarys Wiadomości o barwie”, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź, 2006
- [2] “Industrial colour-difference evaluation”, Technical Report No 116, CIE 1995, France
- [3] Clarke FJJ, McDonald R, Rigg B, “Modification to the JPC79 Colour-Difference Formula”, J Soc Dyers Colorists 100, s. 128-132, 1984
- [4] “Improvement to industrial colour-difference evaluation” Technical Report No 142, CIE 2001, Austria
- [5] Publikacja CIE Nr 13.2