

DOBÓR WŁASNOŚCI BARWOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

1. Wprowadzenie

Proces widzenia, dzięki któremu dociera do świadomości przeciętnego człowieka *gros* informacji ze świata zewnętrznego, polega m.in. na poprawnej percepcji jasności i barwy postrzeganych przedmiotów. Rozwój cywilizacji technicznej i ogólny wzrost poziomu życia przydaje nowych znaczeń zarówno barwności otoczenia człowieka, jak i wymaganiom co do postrzegania barw przy świetle sztucznym.

Od najdawniejszych czasów człowiek postrzegał otoczenie przy świetle dziennym i dużym natężeniu oświetlenia, przy czym bielszemu światłu towarzyszyła większa jasność. Po wschodzie i przed zachodem słońca z cieplejszą barwą światła dziennego było związane mniejsze natężenie oświetlenia. Podobnie, wieczorem bądź nocą przy żółtym świetle ogniska w jaskini, a potem łuczyw, kaganków, lampek oliwnych, świec i wreszcie lamp naftowych w lepiankach, szałasach i domostwach, ale również w zamczyskach i pałacach natężenie oświetlenia było o rzędy wielkości mniejsze. W przedziale czasu, odpowiadającym możliwej do odtworzenia historii ludzkości, ostatnie stulecie stosowania elektrycznych źródeł światła to zaledwie mgnienie oka, które nie ma żadnego znaczenia dla ukształtowania w toku ewolucji właściwości aparatu wzrokowego człowieka i systemu przetwarzania informacji wzrokowej.

Czułość oczu na barwy rozwijała się u przodków człowieka najpierw w świetle przepuszczonym przez wiecznie zielony sufit puszczy tropikalnej, tzn. przy zielono-niebieskim odcieniu światła białego. Kiedy około 500 tysięcy lat temu przodkowie człowieka wyszli na otwarte, rozświetlone zielono-żółte przestrzenie sawann, zaczęła się ostatecznie kształtować widmowa charakterystyka czułości oka i wrażliwość na barwy w jasnym świetle. To zdaje się tłumaczyć charakterystyki widmowej czułości zdrowego oka (rys. 1) współczesnego człowieka:

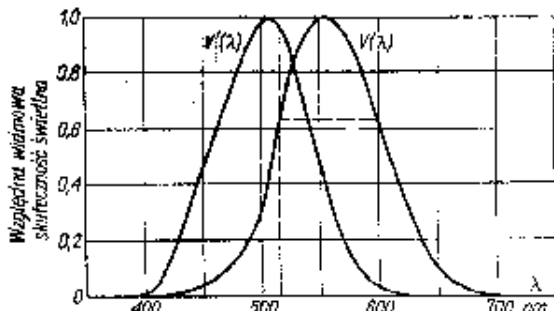
- **przy widzeniu fotopowym** (dziennym, czopkowym), przy dużych poziomach luminancji (>20 nt), z udziałem trzech odmian czopków wrażliwych na barwy, a zatem umożliwiających barwne widzenie, z największą czułością przy długości fali 555 nm (światło zielono-żółte),
- **przy widzeniu skotopowym** (zmiernym, pręcikowym), przy małych poziomach luminancji ($< 0,002$ nt), z udziałem pręcików niezwykle czułych na pobudzenie światłem, ale niewrażliwych na barwy, z największą czułością przy długości fali 507 nm (światło zielono-niebieskie),
- przy widzeniu mezopowym (pośrednim, czopkowo-pręcikowym), przy pośrednich poziomach luminancji ($0,002 \div 20$ nt), z udziałem obu odmian receptorów w stopniu zależnym od poziomu luminancji.

Zarazem, od najdawniejszych czasów, po zmierzchu człowiek oglądał najbliższe otoczenie, w tym współbraci, przy świetle ogniska bądź innego płomienia. Tym można tłumaczyć obserwowaną u współczesnego człowieka zdolność **adaptacji chromatycznej oka**. Percepcję barw dostosowuje ono do widma światła, jeśli nie odbiega ono zbyt od widma promiennika zupełnego (ciała czarnego) w zakresie temperatury barwowej od 2850 do 12000 K.

Oko jest zaledwie niedoskonałym *interfejsem*, przetwornikiem światła na impulsy elektryczne, a tak naprawdę widzi mózg¹ wykorzystujący w tym celu nie tylko zakodowane informacje napływające z siatkówki oka, ale również poprzedzające doświadczenie w pracy wzrokowej, stałe

¹ Za widzenie odpowiada ¼ objętości mózgu.

i przejściowe osobnicze preferencje oraz fobie, a nawet w pewnym stopniu uwarunkowania kulturowe właściwe danej społeczności. Nic zatem dziwnego, że przez setki tysięcy lat rozwijała się zdolność widzenia i zdolność postrzegania człowieka w miarę, jak rozwijał się i powiększał jego mózg. Bo jeśli chodzi o samo oko (czułość widmowa, ostrość widzenia, pole widzenia itd.), to byłoby czego pozazdrościć niektórym zwierzętom, zwłaszcza drapieżnym ptakom i ssakom.



Rys. 1. Względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego (względna czułość oka) przy widzeniu fotoropowym $V(\lambda)$ i przy widzeniu skotopowym $V'(\lambda)$

Percepcja barw to nie tylko kwestia widmowej czułości oka, o czym mogą świadczyć chociażby zaburzenia widzenia barwnego po zażyciu narkotyków (eksplozja kolorów) i szczególnych preferencji barwowych przy niektórych chorobach psychicznych. Ponadto wrażenie barwy w dużym stopniu zależy od barwy bezpośredniego otoczenia, zależy od **kontrastu barwy**. Inaczej też odbiera się barwę na małej powierzchni, a inaczej na dużej, stąd niekiedy niemiłe zaskoczenie po pomalowaniu ścian pokoju kolorem, który tak się podobał na próbce w katalogu. Wreszcie, jeśli zadanie wzrokowe polega na długotrwałym wpatrywaniu się w te same barwne fragmenty pola widzenia, to po jego zmianie trzeba się liczyć ze zjawiskami powidokowymi objawiającymi się kontrastem barwnym następczym – złudzeniem występowania barw dopełniających.

Przez tysiące lat barwne widzenie uważano za oczywistość nie próbując zgłębić jego istoty. Powstawały też barwne dzieła plastyczne, poczynając od najdawniejszych malowideł naskalnych po obrazy, freski, mozaiki i witraże paru ostatnich tysiącleci. Zadziwiają i wzruszają do dziś nie tylko tematem oraz kompozycją, ale i doborem barw. Wiele z nich powstawało w miejscach oświetlanych ówczesnymi źródłami światła sztucznego, co nie przeszkadza i dziś uważać je za dzieła wybitne, nie do powtórzenia. Już dawno intuicyjnie malarze opanowali technikę mieszania barw bądź to na palecie, bądź – jak impresjoniści – w oku widza. Rozumieli, że skoro wzrok jest nośnikiem przeżyć plastycznych, to barwy są muzyką dla oczu. Nie trzeba dodawać, że zachwycać się barwami, a nie tylko je dostrzegać, może człowiek uwolniony od troski o przeżycie do dnia następnego.

Dociekliwe umysły od stuleci próbowały barwy systematyzować, klasyfikować i opisywać. Kierowały się przy tym odczuciami, jakie barwy wywoływały w społeczności i znaczeniami, jakie im ona przypisywała. W osobno rozwijających się kulturach można dostrzec **symbole barwne** identyczne albo zbliżone (np. barwy symbolizujące bóstwa dobre i bóstwa okrutne albo okrucieństwo w ogóle), ale można wątpić w naturalną oczywistość symboliki barw, skoro w różnych kulturach tak rozmaity jest symbol żałoby (czerń, biel, żółć, fiolet). Zapytani zniechęca o podanie jakiegoś koloru Europejczycy w blisko 90 % podają czerwony, a mieszkańcy Maghrebu – niebieski. Próbowano też barwy systematyzować na potrzeby artystów i przyrodników oraz opisywać kryteria ich używania.

Trudno przecenić doświadczenie Newtona z **rozszczerpieniem światła białego**, ale zasadniczy przełom w naukowym podejściu do kwestii barw nastąpił dopiero w wieku XIX za sprawą najwybitniejszych matematyków i fizyków. Natomiast szeroko zakrojone badania z zakresu **psychofizjologii widzenia barwnego** [5, 9] rozwinięto w latach międzywojennych XX wieku w wyraźnym celu podnoszenia wydajności pracy w przemyśle. Były one finansowane przez duże koncerny, które już osiągnęły pułap udoskonaleń technicznych i organizacyjnych. Poszukiwano nowych możliwości zwiększenia wydajności pracy, ograniczenia liczby błędów i braków oraz zmniejszenia wypadkowości poprzez użycie barw w sposób funkcjonalny. Kolorystyka przemysłowa polegająca na harmonijnym doborze barw maszyn, wystroju wnętrz i odzieży roboczej miała stwarzać odpowiedni

klimat psychologiczny:

- nie naruszający obowiązujących kodów barw bezpieczeństwa [13, 16] i barw informacji, a poprawiający ich widoczność,
- zapewniający dobrą widoczność i zmysł przestrzenny wspomagające automatyzm i rytm wykonywanych czynności,
- współgrający z barwą podówczas stosowanego światła sztucznego,
- zapobiegający występowaniu złudzeń wzrokowych i zjawiska kamuflażu oraz niepożądanych zaburzeń odczucia kierunku i odległości,
- przeciwdziałający znudzeniu wykonywanymi czynnościami,
- sprzyjający utrzymaniu czystości i porządku.

Odkrywane prawa fizyczne i prawidłowości psychofizjologiczne wkrótce zostały wykorzystane w normalizacji międzynarodowej CIE (franc. *Commission Internationale de l'Éclairage*). Okazało się, że barwę można skwantyfikować tak precyzyjnie, że ewentualnego błędu oko ludzkie nie jest w stanie dostrzec. Zgłębiono tajniki widzenia barwnego a następnie wprowadzono liczbowe miary opisujące własności barwowe elektrycznych źródeł światła [3, 14, 15]. Skoro – jak mogłoby się wydawać – skwantyfikowano wszystko, co wpływa na widzenie barwne, to proste algorytmy powinny wystarczyć do bezbłędnego doboru własności barwowych źródeł światła w dowolnych zastosowaniach. Okazuje się, że to nieprawda. Wiedza ta jest bardzo pomocna i może wystarczyć w prostych sytuacjach, ale nie ujmuje ona wszelkich uwarunkowań, które powinien mieć na względzie projektant oświetlenia bądź inżynier światła.

Ponadto tam, gdzie **estetyczne walory oświetlenia** są niemniej ważne od użytkowych, nie wystarcza wiedza, niezbędna jest twórcza wyobraźnia, potrzebne jest natchnienie i wycucie plastyczne [1, 10]. Zwłaszcza w takich sytuacjach oświetlenie powinni projektować tylko ci, którzy potrafią zachwycić się ładnym krajobrazem, dziełem malarza bądź fotografa albo ciekawą architekturą, czyli – jak ją określił Le Corbusier – grą brył w świetle.

2. Podstawowe prawa kolorymetrii

Trzy prawa Grassmana stanowiące podstawę kolorymetrii i najważniejsze wnioski z nich wynikające można przedstawić następująco.

I prawo Grassmana – Każda barwa może być określona za pomocą trzech niezależnych barw, przy czym trzy barwy są niezależne, jeżeli addytywne (przez dodawanie) mieszanie dowolnie wybranych dwóch z nich – bez względu na proporcje składników – nie może odtworzyć trzeciej. Istnieje zatem nieograniczona liczba możliwych układów trzech barw niezależnych, natomiast cztery dowolne barwy są zawsze we wzajemnej zależności. Ze względów praktycznych stosuje się tylko kilka wybranych **układów trójchromatycznych** (układów trzech barw niezależnych). Prawo to jest podstawą rachunku trójchromatycznego, barwnego druku, barwnej fotografii i barwnej telewizji.

II prawo Grassmana – Jeżeli w mieszaninie dwóch barw jeden ze składników jest utrzymywany bez zmiany, a drugi poddawany ciągłej zmianie, to barwa mieszaniny zmienia się również w sposób ciągły. Prawo to wyklucza możliwość istnienia barwy, która by nie sąsiadowała z innymi, nie różniła się dowolnie mało od innych barw. Oznacza to również, że promieniowanie świetlne o dowolnej barwie może być drogą ciągłych przemian przekształcone w promieniowanie o jakiegokolwiek innej barwie. Ciągła zmiana **barwy** nie jest jednak równoznaczna z ciągłą zmianą subiektywnego **wrażenia barwy**. Aby obserwator odczuł zmianę, musi ona przekroczyć pewną wartość progową, jak w przypadku wszelkich innych wrażeń odbieranych zmysłami.

III prawo Grassmana – Światła o tej samej barwie dają w mieszaninach z innym światłem identyczny wynik, bez względu na ich rozkład widmowy. Barwa mieszaniny zależy tylko od barw jej składników, a nie zależy od ich rozkładu widmowego. Określone mu widmu promieniowania widzialnego odpowiada jedna i tylko jedna barwa światła. Określonej barwie światła może odpowiadać nieskończona liczba kombinacji rozkładów widmowych promieniowania. Kiedy Newton rozszczepił światło białe przechodzące przez pryzmat i uzyskał jego rozkład widmowy, mogło się zdawać się, że wrażenie barwy zależy od długości fali świetlnej wpadającej do oka, chociaż powin-

no zastanawiać, iż w tym widmie brakuje wielu barw. Okazuje się jednak, że po zmieszaniu choćby dwóch różnej długości fal świetlnych oko widzi nie dwie różne barwy, ale jedną – rezultat mieszania i nie jest w stanie rozpoznać, jakie barwy weszły w skład tej mieszaniny. Fenomenem procesu widzenia barwnego jest zatem metameryzm, tzn. nierozróżnianie składu widmowego promieniowania świetlnego. Percepcja superpozycji fal świetlnych przez oko różni się od percepcji superpozycji fal dźwiękowych przez ucho, które oddzielne tony tworzące akordy może zidentyfikować. Skoro oko nie analizuje składu widmowego promieniowania, to tworząc barwne obrazy rzeczywistości nie trzeba odtwarzać ich właściwości spektralnych, lecz wystarczy odtwarzać bodźce barwowe. Oznacza to także, iż równie dobre oddawanie barw albo w podobnym stopniu celowo zniekształcone oddawanie barw mogą zapewnić źródła światła o tej samej barwie światła, ale o różnym widmie światła.

3. Układy trójkromatyczne

Układy trójkromatyczne służą do definiowania **barw chromatycznych** (kolorowych, scharakteryzowanych odcieniem) i przeprowadzania różnych operacji z użyciem tych barw. Przeciwnością są **barwy achromatyczne** (niekolorowe), czyli wszelkie stopnie szarości od bieli równoenergetycznej do czerni.

Spośród niezliczonych układów trójkromatycznych, jakie można by utworzyć w oparciu o I prawo Grassmana, zwłaszcza dwa następujące wykorzystuje się w technice oświetleniowej:

układ (X Y Z) – normalny układ kolorymetryczny CIE 1931, najwygodniejszy przy rozwiązywaniu addytywnego (przez dodawanie) mieszania barw,

układ (U V W) – układ kolorymetryczny CIE 1960 równomiernej przestrzeni barw, najodpowiedniejszy przy rozważaniu różnicy wrażeń barwnych, przy określaniu temperatury barwowej T_b bądź temperatury barwowej najbliższej T_b' oraz wskaźników oddawania barw (R_i, R_a).

W każdym przypadku procedurę określania barwy można tak ustalić, aby operować względnymi udziałami każdego z trzech bodźców, na przykład:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Zważywszy, że suma trzech bodźców względnych jest równa jedności

$$x + y + z = 1$$

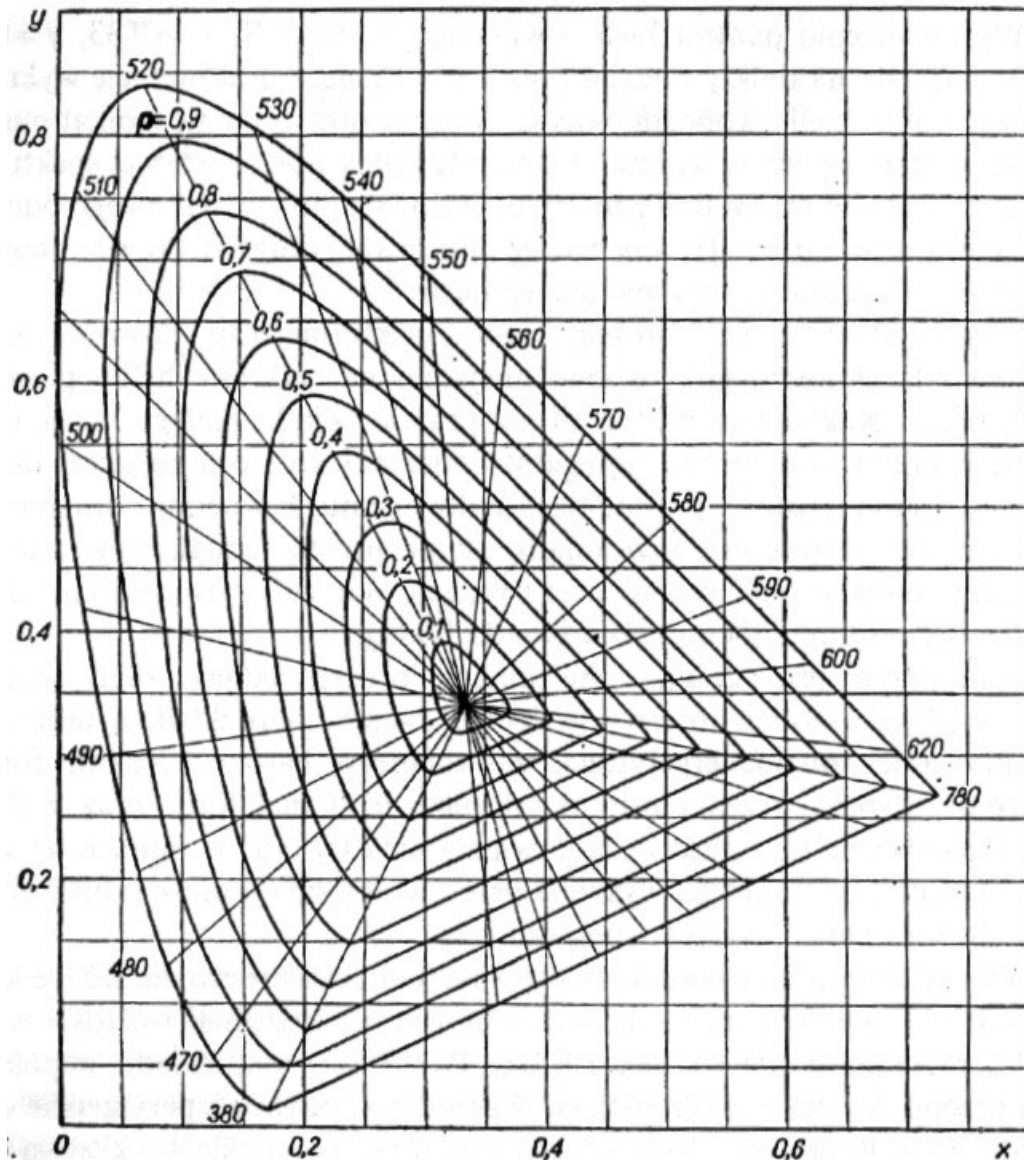
barwę światła można jednoznacznie określić podając tylko dwie informacje, np. współrzędne x - y lub u - v , a wartość trzeciej jest domyślna: $z = 1 - (x + y)$ albo $w = 1 - (u + v)$. Oznacza to, że wszelkie barwy chromatyczne można przedstawić za pomocą tylko dwóch parametrów. Przestrzeń barw może być tworem dwuwymiarowym, przedstawionym na płaszczyźnie, w postaci płaskiej figury, o kształcie na ogół zbliżonym do trójkąta (trójkąt barw).

Wybrane bodźce $X Y Z$ (podobnie $U V W$) są abstrakcyjne, fizycznie nierealne, tzn. na przykład, że nie można zobaczyć barwy o parametrach $x = 1, y = 0, z = 0$. Bodźce podstawowe zostały tak dobrane, aby uzyskany trójkąt barw spełniał postawione założenia, ważne z punktu widzenia użytkowego.

Przy konstruowaniu układu $(X Y Z)$ główne założenia były następujące:

- światło o jednakowym udziale wszystkich trzech bodźców $x = y = z = 1/3$ ma być achromatyczne (niekolorowe), tzn. ma mieć barwę bieli równoenergetycznej (pkt E na rys. 2),
- barwy widmowe (barwy czyste), pochodzące z rozszczepienia światła białego, mają leżeć na linii ograniczającej trójkąt barw i mają być możliwie równoodległe od punktu E bieli równoenergetycznej,
- punkt określający barwę mieszaniny dwóch bodźców świetlnych ma leżeć na prostej łączącej punkty opisujące barwy składowe i to w miejscu ściśle wyznaczonym przez proporcje obu składników,
- ponieważ skrajne barwy widmowe (czerwień i fiolet) muszą się znaleźć na końcach linii barw

widmowych, to odcinek prosty je łączący będzie linią purpur (mieszaniny czerwieni i fioletu) zamykającą trójkąt barw.



Rys. 2. Wykres chromatyczności (x, y) CIE 1931

Na „półeliptycznej” linii barw widmowych są podane długości fali (dominującej) promieniowania monochromatycznego odpowiadającego danej barwie. Na dolnej prostej linii purpur można podać (ze znakiem minus) długości fali (dopełniającej) promieniowania monochromatycznego, którego barwa zmieszana w odpowiedniej proporcji z daną barwą purpurową daje biel równoenergetyczną.

Dowolną barwę chromatyczną można zdefiniować na wykresie chromatyczności (x, y) – jak w przypadku każdego wykresu o współrzędnych prostokątnych – podając dwie współrzędne (x, y), co jednak jest informacją mało komunikatywną. Chętniej określa się to inaczej (rys. 2), podając:

- **długość fali dominującej** λ_{dom} i czystość pobudzenia p w przypadku barw, które można otrzymać mieszając barwę widmową z bielą równoenergetyczną,
- **długość fali dopełniającej** λ_{dop} i czystość pobudzenia p w przypadku barw leżących w trójkącie purpur, których nie można otrzymać mieszając barwę widmową z bielą równoenergetyczną.

Z rys. 2 wynika, jak należy rozumieć długość fali dominującej λ_{dom} oraz długość fali dopełniającej. Linie proste jednakowej długości fali dominującej łączą punkt E bieli równoenergetycznej z odpowiednią barwą widmową (na linii barw widmowych), której odpowiada ta właśnie długość

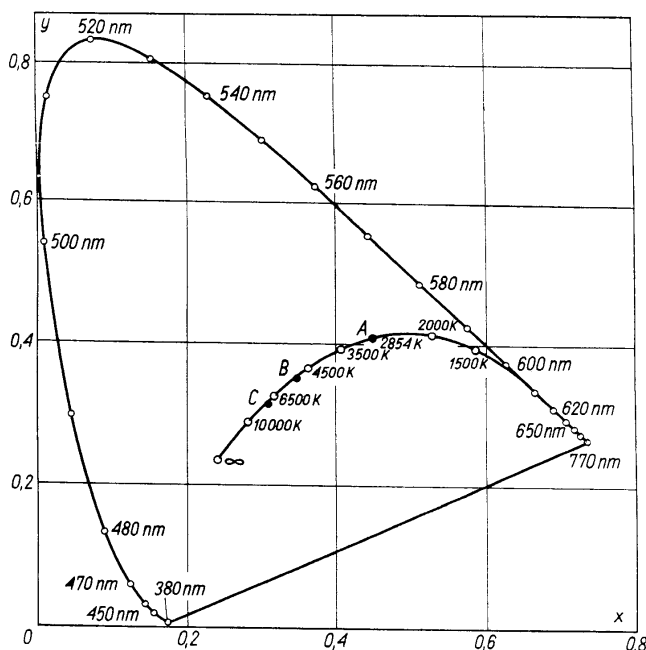
fali promieniowania monochromatycznego. Linie tej samej długości fali dopełniającej λ_{dop} są przedłużeniem poprzednich poza punkt E do linii purpur.

Czystość pobudzenia p określa względny udział bodźca barwowego (barwy widmowej lub czystej purpury) w mieszaninie ze światłem białym. Na wykresie chromatyczności (x, y) jest to mierzona wzdłuż linii jednakowej długości fali (dominującej lub dopełniającej) odległość punktu określającego barwę od punktu E odniesiona do pełnej odległości od punktu E do skrajnej linii trójkąta barw (linii barw widmowych lub linii purpur). Zatem na linii barw widmowych i na linii purpur $p = 1$, a w punkcie E bieli bieli równoenergetycznej $p = 0$; między tymi punktami skrajnymi podziałka jest liniowa.

4. Barwa postrzegana światła

Od dawna kusiła możliwość określania barwy światła za pomocą tylko jednej liczby. Skoro ciało (doskonale) czarne nagrzane do odpowiednio wysokiej temperatury zaczyna świecić i nagrzane do 800 K wydaje się czerwone, nagrzane do 3000 K – żółte, nagrzane do 4000 K – ciepłobiałe, nagrzane do 5000 K – zimnobiałe, nagrzane do 8000 K – niebieskawobiałe, to można jednoznacznie zdefiniować barwę podając tylko jedną liczbę – temperaturę ciała czarnego. Miejscem geometrycznym punktów chromatyczności światła emitowanego przez ciało czarne (promiennik zupełny) o różnej temperaturze jest krzywa ciała czarnego (rys. 3). Z jej przebiegu wynika, że może ona reprezentować stosunkowo nieliczne barwy z trójkąta barw. Tak się jednak składa, że liczne elektryczne źródła światła emitują światło o chromatyczności usytuowanej dość dokładnie na tej krzywej (żarówki) bądź w jej pobliżu. Dzięki temu **barwę postrzeganą światła** emitowanego przez elektryczne źródło można scharakteryzować

- **temperaturą barwową** T_b , czyli temperaturą ciała czarnego wytwarzającego promieniowanie o tej samej chromatyczności, co dotyczy żarówek, przy czym dzięki selektywności żarnika wolframowego temperatura barwowa światła żarówki jest o 50÷85 K większa niż temperatura żarnika,
- **temperaturą barwową najbliższą** T_b' , czyli temperaturą ciała czarnego wytwarzającego promieniowanie o chromatyczności najmniej różniącej się od chromatyczności światła rozpatrywanego źródła.



Krzywa ciała czarnego na wykresie chromatyczności (x, y)

Rys. 3. Krzywa ciała czarnego na wykresie chromatyczności (x, y)

Liczby przy krzywej podają temperaturę [K] ciała czarnego świecącego światłem o barwie usytuowanej w podanym punkcie krzywej.

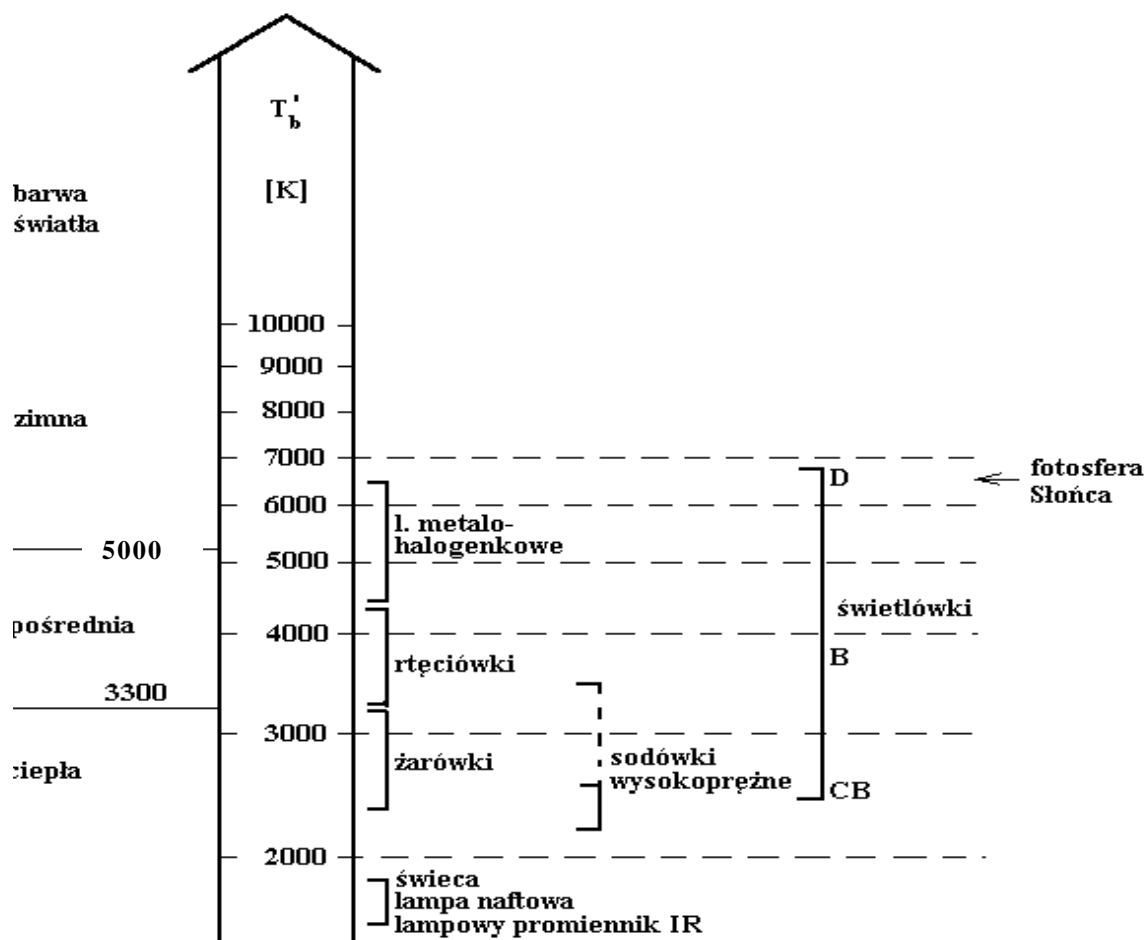
Litery podają usytuowanie punktów chromatyczności iluminantów porównawczych A, B, C.

Nieprzedstawiony na rysunku punkt E bieli równoenergetycznej $(x = 1/3, y = 1/3)$ znajduje się w pobliżu punktu C.

Jeżeli punkt chromatyczności rozpatrywanego źródła światła nie leży na krzywej ciała czarnego, to w równomiernej przestrzeni barw (u, v) wystarczy znaleźć najbliżej (w sensie geometrycznym) leżący punkt na tej krzywej i odpowiadającą mu temperaturę podać jako temperaturę barwową najbliższą T_b' światła rozpatrywanego źródła. Podobna operacja na wykresie chromatyczności (x, y) jest bardziej skomplikowana, bo w różnych obszarach trójkąta barw tej samej różnicy wrażenia barwy odpowiadają różne odległości geometryczne.

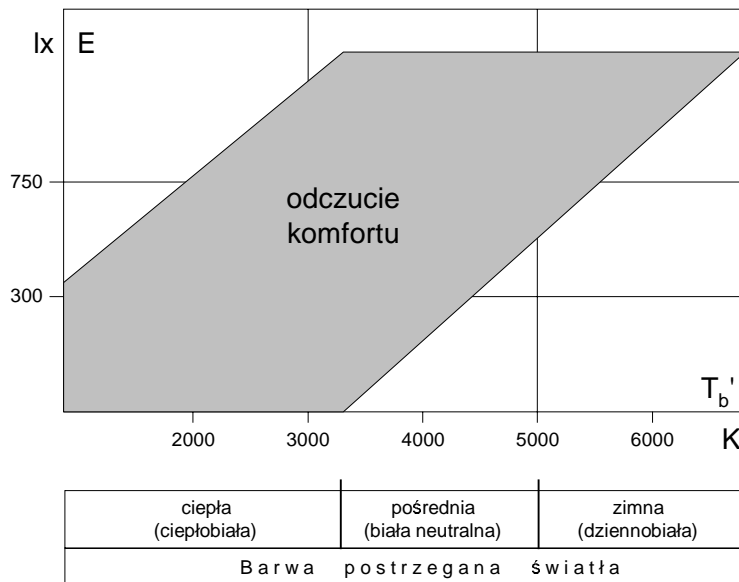
W zależności od temperatury barwowej najbliższej światła barwę postrzeganą światła (rys. 4) określa się jako ciepłą ($T_b' \leq 3300$ K), pośrednią (3300 K $< T_b' \leq 5000$ K) lub zimną ($T_b' > 5000$ K). Operując tym parametrem dobrze jest pamiętać, że:

- o wartości temperatury barwowej decyduje rozkład widmowy rozpatrywanego promieniowania (ściślej *gęstość monochromatyczna egzytancji promienistej*) tylko w zakresie widzialnym,
- identyczna temperatura barwowa źródeł światła oznacza identyczną barwę światła, ale nie oznacza identycznego rozkładu widmowego promieniowania.



Rys. 4. Barwa postrzegana światła i odpowiadająca jej temperatura barwowa najbliższa przykładowych źródeł światła

Kiedy upowszechniły się świetlówki i inne lampy wyładowcze o temperaturze barwowej światła znacznie wyższej niż światło żarówek, zwrócono uwagę, że przy małym natężeniu oświetlenia (na przykład poniżej 150 lx) dają one efekt ponurości, podczas gdy światło żarówek może być wtedy przyjemnie odczuwane. Kierowano się dawniej wykresem Kruithofa zalecającym wyższe natężenie oświetlenia wraz ze zwiększeniem temperatury barwowej światła. Obniżało to, a czasem zupełnie znosiło, spodziewany efekt ekonomiczny wynikający z zastąpienia żarówek lampami wyładowczymi o większej skuteczności świetlnej. Przykładem nowszych zaleceń w tej mierze jest rys. 5.



Rys. 5. Zalecana koordynacja barwy postrzeganej światła z zastosowanym natężeniem oświetlenia w przeciętnych urządzeniach oświetleniowych

Światło zimne o wysokiej temperaturze barwowej może być potrzebne w obiektach, gdzie należy zapewnić doskonale rozróżnianie barw. Niezależnie od tego waloru jest ono chętnie stosowane w tropiku, bo w pomieszczeniach przegrzanych daje subiektywne wrażenie niższej temperatury. Ponadto takie światło subiektywnie powiększa małe i przepelnione pomieszczenia o jasnych ścianach. Oczywiście odwrotne wnioski dotyczą stosowania światła o niskiej temperaturze barwowej.

5. Oddawanie barw

Barwa postrzegana światła scharakteryzowana temperaturą barwową nie informuje, jak są w tym świetle oddawane barwy różnych obiektów w polu widzenia. Do tego celu są potrzebne innego rodzaju informacje. Padały i nadal są wysuwane różne propozycje, spośród których wypada rozumieć przede wszystkim przyjęty w normalizacji system wskaźników oddawania barw (ang. *CRI* – *colour rendering index*). Oblicza się je – podobnie jak i temperaturę barwową najbliższą – za pomocą programu komputerowego [12], w oparciu o widmo promieniowania w zakresie widzialnym. Procedura obliczeń jest następująca.

1. Komputer wczytuje rozkład widmowy promieniowania rozpatrywanego źródła światła w zakresie widzialnym i na tej podstawie oblicza temperaturę barwową najbliższą T_b' .
2. Komputer wybiera iluminant porównawczy (rys. 3) o zbliżonej chromatyczności i tak na przykład dla żarówki wybierze iluminant A (promiennik zupełny, ciało czarne o temperaturze barwowej $T_b' = 2856$ K), a dla świetłówki de Luxe o świetle dziennym – iluminant D (fazę światła dziennego D_{65} , $T_b' = 6500$ K).
3. Komputer porównuje oddawanie barw w świetle rozpatrywanego źródła z oddawaniem tych samych barw w świetle iluminantu porównawczego. Jeżeli chromatyczność próbki barwnej i oświetlanej jednym i drugim światłem nie różni się albo różni się w stopniu nie rozpoznawalnym przez oko, to indywidualny wskaźnik oddawania tej barwy R_i wynosi 100. Jeśli występuje różnica chromatyczności próbki, to komputer wyraża ją liczbą n progów odczuwalności różnicy barwy i przypisuje tej próbce indywidualny wskaźnik oddawania barwy

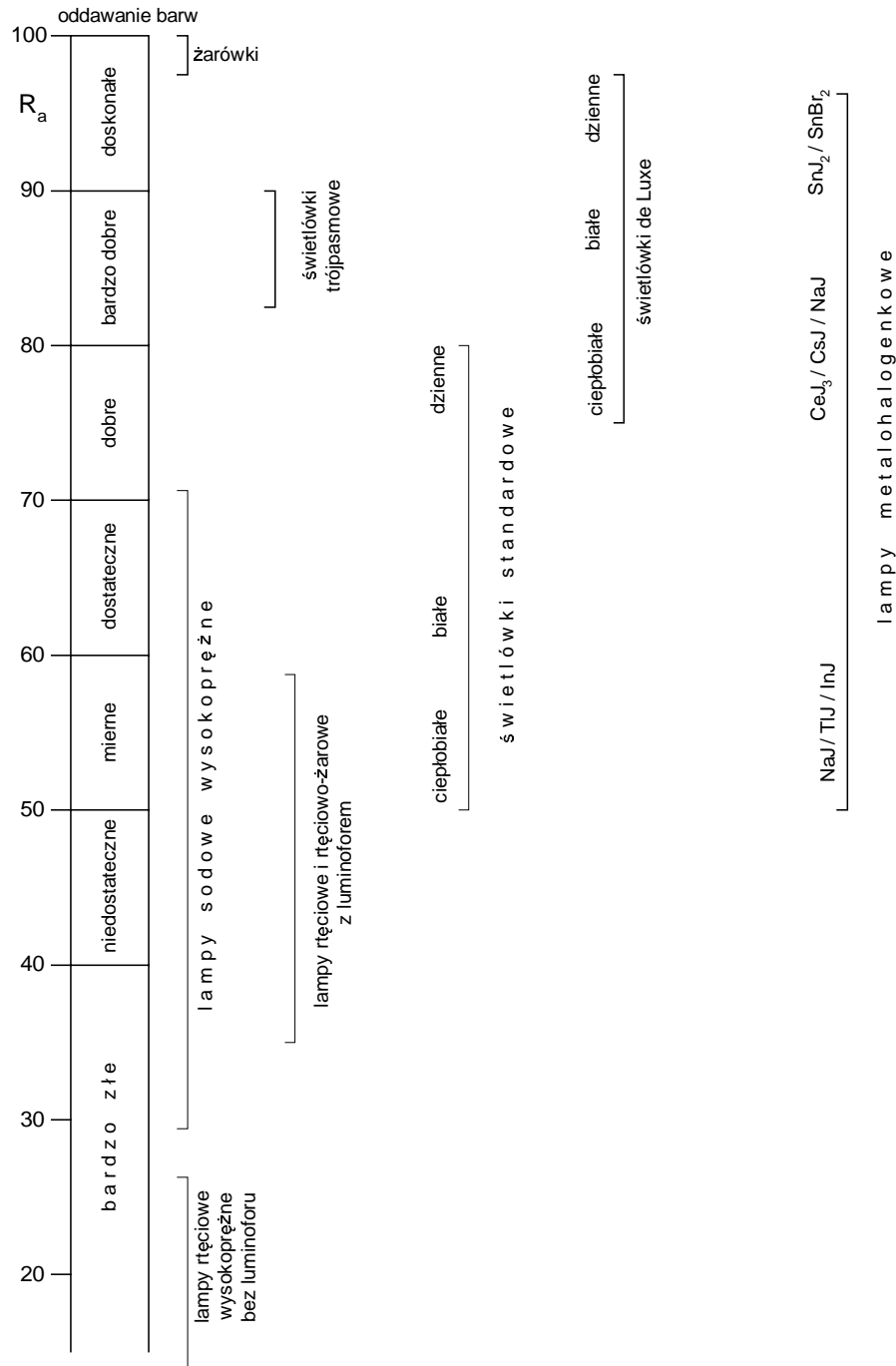
$$R_i = 100 - n \cdot 5$$

Jeżeli na przykład $R_2 = 65$, oznacza to, iż w przypadku drugiej próbki (o barwie ciemnej szarawożółtej przy świetle dziennym) jej chromatyczność przy oświetleniu jednym i drugim światłem tak się różni, że normalne oko jest w stanie dostrzec między jedną a drugą barwą siedem progów odczuwalności różnicy barwy (bo $R_i = 100 - 7 \cdot 5 = 65$). Wskaźnik R_i ma wartość ujemną, jeśli między jedną a drugą barwą oko jest w stanie dostrzec ponad dwadzieścia progów odczuwalności różnicy barwy.

4. Opisaną wyżej operację komputer wykonuje osiem razy dla ośmiu próbek podstawowych z atlasu Munsella reprezentujących wybrane barwy złamane, dominujące zwykle w polu widzenia (jasna szarawoczerwona, ciemna szarawożółta, silna żółtozielona, średnia żółtawozielona, jasna niebieskawozielona, jasna niebieska, jasna fioletowa, jasna czerwono purpurowa), po czym oblicza średnią arytmetyczną otrzymanych ośmiu indywidualnych wskaźników oddawania barwy:

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8}{8}$$

Tak obliczona średnia jest to **ogólny wskaźnik oddawania barw** R_a (rys. 6), przy czym wytwórca źródeł światła może, ale nie musi podawać wartości poszczególnych wskaźników indywidualnych od R_1 do R_8 .



Rys.6. Przeciętne wartości wskaźnika oddawania barw elektrycznych źródeł światła

Poza przedstawioną skalą wartości R_a sytuują się lampy sodowe niskoprężne ($R_a = -20$ przy iluminancie A)

5. Operację opisaną w punkcie 3 można kontynuować dla sześciu dalszych próbek barwnych (silna czerwona, silna żółta, silna zielona, silna niebieska, jasna żółtaworóżowa – skóra ludzka, średnia oliwkowozielona – liście) obliczając **dodatkowe (szczególne) wskaźniki oddawania barw** od R_9 do R_{14} , które podaje się każdy z osobna, bo uśrednianie ich byłoby bezsensowne. Są one przydatne na przykład, kiedy chodzi o oświetlenie dekoracyjne uwydatniające albo szczególnie wiernie oddające określoną barwę bądź określone barwy.

Z powyższych wyjaśnień wynikają ważne wnioski praktyczne.

Po pierwsze, ogólny wskaźnik oddawania barw R_a niewiele mówi, dopóki nie zna się temperatury barwowej najbliższej światła, tzn. dopóki nie wie się z jakim iluminantem (o jakiej temperaturze barwowej) porównywano oddawanie barw. Pełna informacja może zatem wyglądać następująco

R_a (P 2300) = 35 dla sodówki wysokoprężnej,

R_a (D 6500) = 80 dla świetlówki De Luxe Daylight

z tym, że podanych wyżej dwóch wartości R_a żadną miarą porównywać nie można. Wskaźniki R_a różnych źródeł światła można sensownie porównywać, jeśli ich temperatury barwowe nie różnią się więcej niż o 300 K. Dla świetlówek, które – jak się ocenia – wytwarzają 70% ilości światła sztucznego, w systemie ILCOS (ang. *International Lamp Coding System*) [11] przewidziano skrócone oznaczanie własności barwowych za pomocą trzech cyfr „rff”, przy czym:

- pierwsza cyfra „r” oznacza wskaźnik oddawania barw R_a podzielony przez 10, z odrzuceniem cyfry po przecinku (wynik zaokrąglony w dół),
- dwie następne cyfry „ff” oznaczają temperaturę barwową najbliższą T_b' [K] podzieloną przez 100, z odrzuceniem cyfr po przecinku (wynik zaokrąglony w dół).

Zatem napis 850 na świetlówce informuje: $R_a = 80 \div 89$, $T_b' = 5000 \div 5099$ K.

Po drugie, ogólny wskaźnik oddawania barw R_a jest średnią (arytmetyczną) ośmiu wskaźników indywidualnych. Jeżeli ta średnia jest duża, np. 85 lub 90, to znaczy, że wszystkie próbki wyglądają bardzo podobnie przy świetle rozpatrywanym i przy świetle wzorcowym iluminantu. Jeżeli natomiast ta średnia jest mała, np. 40 lub 50 (rys. 6), to nie wiadomo, czy w przypadku większości próbek występuje około 10 progów odczuwalności różnicy barwy, czy też niektóre barwy są oddawane doskonale, a inne bardzo źle i o które z nich chodzi.

6. Własności barwowe elektrycznych źródeł światła

Wytwórcy powinni podawać w katalogach źródeł światła podstawowe informacje o ich własnościach barwowych, tzn. co najmniej temperaturę barwową najbliższą T_b' oraz ogólny wskaźnik oddawania barw R_a . Mogą do tego dodać rysunek przedstawiający rozkład widmowy promieniowania (w zakresie widzialnym i ew. poza nim) oraz wartości dodatkowych wskaźników oddawania barw od R_9 do R_{14} . Z tego punktu widzenia elektryczne źródła można podzielić na trzy grupy:

a) Źródła światła, których własności barwowe jednoznacznie wynikają z ich zasady działania, są ustalone i na tyle oczywiste, że informacje wytwórcy na dobrą sprawę są zbędne. Dotyczy to żarówek o przezroczystej bańce, których temperatura barwowa światła jest nieco większa niż temperatura żarnika, a ta jest nierozdzielnie związana ze skutecznością świetlną, natomiast wskaźnik R_a jest bliski 100, bo iluminantem porównawczym jest wzorcowa żarówka. Dotyczy to również lamp sodowych niskoprężnych, wyróżniających się rekordową skutecznością świetlną rzędu 200 lm/W, które dają światło monochromatyczne żółtopomarańczowe (dublet sodowy 589 i 589,6 nm) o bardzo złych własnościach barwowych.

b) Źródła światła, których własności barwowe wytwórca może w pewnych granicach kształtować, przede wszystkim przez dobór luminoforu, ale nie są one w stanie zapewnić doskonałego oddawania barw (stopień 1A), chociażby ze względu na zbyt niską temperaturę barwową. Do tej grupy należą lampy rtęciowe wysokoprężne i lampy rtęciowo-żarowe, lampy sodowe wysokoprężne, standardowe świetlówki, a także lampy żarowe o kolorowej bańce w roli filtru.

c) Źródła światła, których własności barwowe mogą być kształtowane w szerokich granicach,

również do poziomu ($T_b' \geq 5500$ K, $R_a \geq 90$) zapewniającego doskonałe rozróżnianie barw (stopień 1A). Do tej grupy należą świetlówki, zwłaszcza świetlówki deLuxe, w których odbywa się to przede wszystkim przez dobór luminoforów oraz lampy metalohalogenkowe, w których odbywa się to przez odpowiednie wypełnienie jarznika (dobór metali tworzących halogenki dysocjujące w łuku). Do tej grupy można też zaliczyć lampy złożone z dużej liczby osobno sterowanych diod świecących LED o różnej barwie.

Jak ostrożnie trzeba podchodzić do oceny własności barwowych źródeł światła mogą świadczyć następujące przykłady.

Pierwszy przykład. W roku 1991 dwóch Niemców podwoziło mnie parokrotnie późnym wieczorem z Neuss do Düsseldorfu. Długi odcinek tej trasy, w obrębie miast, był oświetlony lampami sodowymi niskoprężnymi. Objasniałem moim gospodarzom, że są to rewelacyjne lampy o rekordowej skuteczności świetlnej, ale mają ogromną wadę, monochromatyczne światło uniemożliwiające rozróżnianie barw. Byli zaskoczeni, nie wierzyli, mówili „jeździmy tędy niemal codziennie, również nocą, i nie mamy żadnych problemów z rozróżnianiem barw”. Zacząłem obserwować mijane obiekty i rzeczywiście: sygnalizacja uliczna świeci swoim światłem czerwonym, żółtym bądź zielonym, samochód jadący przed nami oświetlony białym światłem swoich reflektorów i widzimy poprawnie barwę tablic rejestracyjnych i barwę karoserii, witryny sklepowe są należycie oświetlone swoimi lampami, a nawet doświetlają chodniki. Czy to takie ważne, że nawierzchnia jezdni albo pobliskie drzewa mają zniekształconą barwę? Dla kierowcy nie ma to znaczenia, inaczej mogą to odczuwać przechodnie. To zdarzenie zmieniło moje spojrzenie na lampy sodowe niskoprężne. Zmieniło też spojrzenie moich gospodarzy, bo wysiedliśmy i pod uliczną latarnią pokazałem im ich mapę drogową, na której ze zdumieniem nie mogli dostrzec kolorów, do których przywykli.

Tablica 1. Porównanie własności barwowych dwóch lamp sodowych wysokoprężnych o mocy 70 W: lampy o standardowym układzie zasilania (L1) oraz lampy o jarzniku zasilanym prądem impulsowym o dużej częstotliwości [6]

Wyszczególnienie		L1	L2
Temperatura barwowa T_b' [K]		2000	3000
Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a		20	70
Indywidualny wskaźnik oddawania barwy	R_1 – barwa jasna szarawoczerwona	11	63
	R_2 – barwa ciemna szarawożółta	65	81
	R_3 – barwa silna żółtozielona	51	91
	R_4 – barwa średnia żółtawozielona	-11	57
	R_5 – barwa jasna niebieskawozielona	7	63
	R_6 – barwa jasna niebieska	53	73
	R_7 – barwa jasna fioletowa	34	82
	R_8 – barwa jasna czerwopurpurowa	-50	50
	R_9 – barwa silna czerwona	-211	-12
	R_{10} – barwa silna żółta	46	61
	R_{11} – barwa silna zielona	-38	39
	R_{12} – barwa silna niebieska	26	63
	R_{13} – barwa jasna żółtaworóżowa (skóra ludzka)	18	62
	R_{14} – barwa średnia oliwkowozielona (listowie)	67	94

Drugi przykład. Intuicyjnie kojarzy się rodzaj źródła światła z jego własnościami barwowymi. W tabl.1 są zestawione liczne szczegółowe parametry barwowe dwóch lamp sodowych wysokoprężnych, czyli lamp o tej samej zasadzie działania i podobnej konstrukcji, ale różniących się sposobem zasilania jarznika. Widać, że ich parametry różnią się tak bardzo, iż te lampy nie są równoważne w zastosowaniach, gdzie oddawanie barw jest ważne.

7. Zalecenia projektowe

Międzynarodowe dokumenty normalizacyjne stawiają wyraźne wymagania co do jakości oświetlenia, ilekroć ma to znaczenie z punktu widzenia funkcjonalnego albo bezpieczeństwa ludzi, mienia i środowiska. W innych przypadkach formułują tylko zalecenia bądź wskazówki pozostawiając swobodę projektantowi działającemu w porozumieniu z przyszłym użytkownikiem obiektu.

Dotyczy to również własności barwowych użytego światła sztucznego. Rozróżniać trzeba co najmniej następujące sytuacje (tabl. 2):

- stanowiska pracy, na których jest wymagane doskonałe rozróżnianie barw (np. druk barwny, farbiarnie, przemysł tekstylny i galanteryjny, wzorcownie i stanowiska kontroli takich wyrobów, sale operacyjne i gabinety diagnostyczne) oraz inne miejsca, w których jest to nieodzowne ze względu na oczekiwane efekty (np. galerie malarstwa), gdzie należałoby stosować światło o temperaturze barwowej najlepiej 6500 K¹ i wskaźniku R_a co najmniej 90 (stopień IA),
- wnętrza, w których ludzie pracują bądź z innych powodów przebywają przez wiele godzin dziennie, a poprawne oddawanie barw jest dość istotne i wobec tego wskaźnik R_a powinien wynosić co najmniej 80 (stopień IB) przy barwie postrzeganej światła dobranej do charakteru wnętrza, a nawet – do strefy klimatycznej (tabl. 2).

Tablica 2. Zalecane własności barwowe źródeł światła przy oświetlaniu wnętrz

Stopień (oddawanie barw)	Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a	Temperatura barwowa Tb' [K]	Przykładowe zastosowania
1A (doskonałe)	90 ÷ 99	≈ 6500	Sale operacyjne, gabinety diagnostyczne, stanowiska kontroli barwy wyrobów, druk barwny, galerie obrazów.
1B (bardzo dobre)	80 ÷ 89	> 5000	Farbiarnie, druk barwny, laboratoria, sprzedaż konfekcji, tekstyliów, mieszkania w tropiku.
		3300 ÷ 5000	Szpitala, muzea, domy towarowe, hotele, audytorium, laboratoria.
		< 3300	Mieszkania, biura i szkoły w strefie klimatu zimnego.
2A (dobre)	70 ÷ 79		Jak wyżej, jeśli przemawiają za tym względy ekonomiczne.
2B (dostateczne)	60 ÷ 69		Wnętrza, w których dobre oddawanie barw ma małe znaczenie (ograniczona barwność otoczenia, czasowe przebywanie ludzi).
3 (mierne)	50 ÷ 59		Wnętrza, w których poprawne oddawanie barw jest bez znaczenia.
4 (niedostateczne) (bardzo złe)	40 ÷ 49		Zastosowania specjalne, np. zamierzone zniekształcenie oddawania barw, efekty specjalne, iluminacje, dyskoteki. Użycie źródeł energooszczędnych, kiedy oddawanie barw nie ma znaczenia.
	< 40		

Kierując się między innymi różnicą odcienia barwy tkanki chirurg decyduje, czy jest ona zdrowa, czy też chora bądź martwa i wymaga usunięcia. Kiedy po trzyletnim procesie produkcji cygara marki Davidoff pakuje się, do każdego pudełka muszą trafić cygara o identycznym odcieniu barwy i w tym celu pracownik musi odróżniać 60 odcieni barwy pozornie identycznych cygar.

Nie zawsze chodzi o dobre oddawanie barw, niekiedy – na odwrót – chodzi o ich zniekształ-

¹ Jest to temperatura fotosfery Słońca, promiennika zupełnego przy świetle którego przez miliony lat kształtował się aparat wzrokowy człowieka.

cenie, zafalszowanie. Można tak dobrać światło w restauracji, by wydrukowane w karcie dań ceny były prawie niewidoczne. Można tak dobrać światło w sklepie, aby przydać świeżości mięsu, rybam bądź warzywom albo uatrakcyjnić wygląd innych towarów. W tym celu próbuje się na potrzeby handlu wprowadzić specjalny parametr charakteryzujący światło, wskaźnik CPI (ang. *colour preference index*) uwzględniający preferencje reprezentatywnej populacji osób co do barwy określonych towarów, np. barwy sugerującej świeżość.

Własności barwowe elektrycznego źródła światła mogą się zmieniać przy zasilaniu napięciem o wartości odbiegającej od znamionowej. Przy zasilaniu napięciem przemiennym 50 Hz lamp wyładowczych, z częstotliwością podwójną (100 Hz) występuje tętnienie strumienia świetlnego, ale również tętnienie barwy światła. Aparat wzrokowy efekt uśrednia (prawo Talbota) i tętnienia nie zauważa, nie dochodzi ono do świadomości, ale nużący jego efekt przy większym współczynniku tętnienia jest niewątpliwy. Barwę światła zmienia też stosowanie ściemniaczy bądź ograniczników mocy. Wreszcie, postępującemu procesowi starzenia się źródeł światła towarzyszy degradacja wielu parametrów i może towarzyszyć powolna zmiana barwy światła.

Pojawiły się **lampy elektryczne o regulowanej barwie światła**. Lampa sodowa wysokoprężna Colorstar® DSX-T 80 W [2] o skuteczności świetlnej 52 lm/W ma przełącznik statecznika elektronicznego pozwalający wybrać temperaturę barwową 2500 K lub 2900 K, co oznacza niewielką zmianę. Znacznie większe możliwości dają najnowsze lampy złożone z dużej liczby osobno sterowanych diod świecących LED o różnej barwie.

Niekoniecznie dążyć trzeba do zapewnienia widma bądź tylko barwy światła dziennego. Kupując kupon materiału bądź konfekcję w źle oświetlonym sklepie klienci podchodzą do dużego okna wystawowego, by je obejrzeć w świetle dziennym. W przypadku odzieży zewnętrznej noszonej na wolnym powietrzu jest to uzasadnione, ale balowe suknie wybierać należy i wieczorowy makijaż nakładać należy przy świetle sztucznym takim, jakie ma sala bankietowa.

Widmo promieniowania źródła światła może sięgać poza zakres widzialny, co może mieć duże znaczenie, a tego wskaźnik R_a ani temperatura T_b w ogóle nie ujmują. Nadfiolet w zasadzie jest szkodliwy i dla ludzi i dla różnych oświetlanych obiektów, zwłaszcza dla dzieł sztuki, ale pewna dawka bliskiego nadfioletu jest pożądana ze względów zdrowotnych. Promieniowanie podczerwone ze względu na efekt cieplny jest z reguły niepożądane, a w pewnych sytuacjach (lampa operacyjna) wymaga radykalnego filtrowania.

Dużej rozważki wymagają przypadki oświetlania roślin i zwierząt. Można to uczynić tylko z egocentrycznego punktu widzenia człowieka, który ma je oglądać i jego odczucia estetyczne są decydujące. Można też za rozstrzygające, a co najmniej równie ważne uznać potrzeby oświetlanych obiektów, których czułość widmowa (oczu zwierząt, fotosyntezy i innych procesów wegetacyjnych u roślin) może być zupełnie inna.

Intensywna hodowla roślin wymaga widma światła dostosowanego do rodzaju upraw i do stadium wegetacji. Pożądane jest widmo możliwie równoenergetyczne w całym zakresie widmowym czynnym w procesie fotosyntezy (do uprawy roślin selekcyjowanych), z przewagą promieniowania czerwono-pomarańczowego (do upraw roślin węglowodanowych), a z przewagą promieniowania niebiesko-fioletowego (do upraw roślin białkowych), przy czym istotna jest też dawka nadfioletu i podczerwieni. Czerwone światło pobudza kiełkowanie nasion sałaty, podczas gdy podczerwone je opóźnia; opóźnia też kwitnienie roślin *short-day*, a sprzyja kwitnieniu roślin *long-day*.

Kiedy osiedliłem się na kilka lat prawie na równiku, gdzie dawał się we znaki nadmiar słońca, chociaż dzień trwał zawsze tylko 12 godzin, byłem początkowo zdumiony widząc, jak zasiedziała tam sąsiadka Belgijka o zachodzie słońca (godz. 18) włączała na kilka godzin wysokoprężne lampy sodowe nad ogródkiem warzywnym. Tak przedłużała, zwłaszcza sałacie, zbyt krótki dzień.

Altanniki, skromnie ubarwione ptaki wróblowate z Nowej Gwinei i Australii gniazdują na drzewach, ale na okres godowy samczyki budują na ziemi altanki z chrustu, które ozdabiają jaskrawymi – najchętniej niebieskimi – kwiatami, kamykami, muszlami i innymi przedmiotami. Czy takim stworzeniom, które subtelnej grze miłosnej poświęcają więcej troski niż wielu ludzi, są obojętne barwy?

Aktywne nocą owady mają czułość widmową oka inną niż człowiek, z maksimum przesun-

niętym w kierunku światła niebieskiego. Lampy rtęciowe oraz świetlówki przyciągają je i masowo giną one bądź od kontaktu z nagrzaną lampą (niem. „*Insektengrill*”), bądź pożerane przez czyhające tam gady albo ptaki. Użycie lamp o dominującej czerwieni nie zakłóca w takim stopniu funkcjonowania świata owadów. Z tą myślą niektóre firmy prawie wszystkie oprawy do oświetlenia zewnętrznego przystosowują do użycia sodówek wysokoprężnych.

Nagłaśnia się ostatnich latach problem **zanieczyszczenia środowiska światłem** (niem. *Lichtverschmutzung*). Oświetlenie zewnętrzne powinno być nieszkodliwe dla środowiska (niem. *umweltgerechte Außenbeleuchtung*), światło ma być jasne i użyteczne dla człowieka, a możliwie niewidoczne dla owadów i innych zwierząt. Można to podejście rozszerzyć. Urządzenia oświetlenia zewnętrznego mają wytwarzać światło użyteczne dla ludzi, do których jest ono adresowane (np. przechodniów), a nie powinno narzucać się ono ludziom, którzy sobie tego nie życzą, np. wnikając nocą przez okna do mieszkań. Światło to nie powinno też – bezpośrednio czy przez rozproszenie – trafić do półprzestrzeni górnej i rozświetlać nieboskłonu, na którym zanikają gwiazdy, co zakłóca naturalną więź człowieka z widokiem rozgwieżdżonego nocnego nieba.

Ze względu na potencjalne zagrożenie człowieka promieniowaniem nadfioletowym [7, 8] ocenia się zarówno lampy do ogólnych celów oświetleniowych (na podstawie efektów biologicznych wywoływanych w odległości, na której wywołują natężenie oświetlenia 500 lx), jak i lampy do celów specjalnych (projektory kinowe, aparaty do reprografii, fototerapii, lampy błyskowe). Rozróżnia się cztery grupy źródeł światła:

- bez oznaczenia – nie występują żadne efekty fotobiologiczne,
- RG-1 – niskie ryzyko efektów fotobiologicznych, nie ma żadnego zagrożenia w zwykłych warunkach użytkowania, przy zwykle spotykanych czasach ekspozycji,
- RG-2 – umiarkowane ryzyko efektów fotobiologicznych,
- RG-3 – duże ryzyko efektów fotobiologicznych, zagrożenie nawet przy krótkotrwałej ekspozycji.

Badania wydolności wzrokowej dużych populacji osób prowadzą niekiedy do wniosków [4], które trudno byłoby wysnuć z zasad kolorymetrii. Dla osiągnięcia tej samej wydolności wzrokowej przy określonych zadaniach, zastąpienie lamp sodowych wysokoprężnych świetlówkami o barwie ciepłobiałej pozwala dwukrotnie obniżyć potrzebne natężenie oświetlenia. Dalsze obniżenie o 20 % jest możliwe dzięki użyciu świetlówek o pełniejszym widmie (ang. *full-spectrum*).

Jeśli ludzie nie są zadowoleni z oświetlenia, nie jest łatwo wyizolować pojedyncze czynniki za to odpowiedzialne, nawet jeśli zainteresowani je sugerują i mają na to swój pogląd. Rzadko jest on racjonalny.

Przypuszczalnie pewne typy psychiki ludzkiej charakteryzuje skłonność do określonych barw. Ekstrawertycy preferują jasne ciepłe barwy, są otwarci na nowinki, również oświetleniowe. Intra-wertycy wolą raczej stonowane barwy zimne, tradycyjne wyposażenie mieszkań i miejsc pracy, w tym tradycyjne oświetlenie.

Drobne anomalie psychiki można leczyć kolorami (chromoterapia): poprzez naświetlanie światłem o określonych barwach, barwne otoczenie, barwne pokarmy oraz wizualizację barw (wyobrażanie sobie wybranego koloru).

Hydrotechnicy budują zaporę elektrowni wodnej i związane z nią budowle ziemne i instalacje hydrauliczne. Nie zajmują się częścią elektryczną tej elektrowni ani dalszymi losami wytwarzanej energii elektrycznej, mimo iż pochodzi ona z energii potencjalnej i kinetycznej wody. Tymczasem od elektryka oczekuje się, że nie tylko doprowadzi energię elektryczną do lamp wytwarzających światło, ale kompetentnie i pod każdym względem ukształtuje pole świetlne, zoptymalizuje wszelkie jego parametry, a do tego większość elektryków nie jest przygotowana. Poza najprostszymi instalacjami powinni się tym zajmować specjaliści – oświetleniowcy, inżynierowie światła. Oświetleniowiec powinien posiadać wiedzę z zakresu techniki świetlnej, nabrać doświadczenia w jej stosowaniu, ale powinien też mieć zmysł plastyczny, powinien umieć bawić się światłem. Jeśli przy tym jest elektrykiem, to tym lepiej, znajomość elektrotechniki będzie mu bardzo pomocna.

Literatura

1. Birren F.: Light, color and environment. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
2. Colorstar[®] DSX-T 80 W – die erste Lichtquelle mit wählbarer Lichtfarbe. ÖZE, 1993, nr 7/8, s. 412.
3. Felhorski W., Stanioch W.: Kolorymetria trójchromatyczna. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
4. Fotios S., Levermore G. J.: Perception of electric light sources of different colour properties. Lighting Research and Technology, 1997, nr 3, s. 161-171.
5. Gregory R.L.: Oko i mózg. Psychologia widzenia. PWN, Warszawa, 1971.
6. Günther K. u.a.: Natrium-Hochdrucklampen mit einer Farbtemperatur von 3000 K. Elektrische, 1990, nr 9, s. 328-331.
7. Khanh T.Q., Swarlik Ch.: Photobiologisch wirksame Strahlung – Einführung, Stand der Meßtechnik. Licht, 1997, nr 4, s. 334-339.
8. Levin R.E.: Photobiological safety and risk – ANSI/IESNA RP-27 series. Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1998, s. 136-143.
9. Lindsay P.H., Norman D.A.: Procesy przetwarzania informacji u człowieka. Wprowadzenie do psychologii. PWN, Warszawa, 1984.
10. Manzoni L.: Il colore – The colour. Quaderni tecnici 1. Reggiani Editore, 1995.
11. Thaele R.: „ILCOS” – das internationale Lampenbezeichnungssystem. Der Elektro- und Gebäudetechniker, 1997, nr 24, s. 2346-2348, 1998, nr 1-2, s. 34-38.
12. Zdziebłowski K.: Wyznaczanie własności barwowych światła. Praca dyplomowa pod kierunkiem E. Musiała. Politechnika Gdańska, 2001.
13. BN-80/3008-03: Urządzenie elektroenergetyczne. Zasady doboru barw. Wymagania i badania.
14. PN-91/E-04042.01: Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Postanowienia ogólne.
15. PN-91/E-04042.03: Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Metody wyznaczania charakterystyk widmowych i kolorymetrycznych źródeł światła.
16. PN-92/N-01255: Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa.

Dane bibliograficzne

Musiał E.: **Dobór własności barwowych źródeł światła.** W: [Materiały] Seminarium „Aktualne problemy techniki świetlnej” ElmarCo, Bydgoszcz, 12.05.2003, s. [1-15].