

ŚWIATŁO BIAŁE

ASPEKTY BARWY ŚWIATŁA W OŚWIETLENIU DROGOWYM

Wprowadzenie

Najważniejszymi parametrami ilościowymi i jakościowymi dla oświetlenia drogowego są:

- poziom luminancji (natężenia oświetlenia),
- równomierność luminancji (natężenia oświetlenia),
- ograniczenie oślnienia.

Czynniki te wpływają na zdolność postrzegania i łatwość oceny sytuacji na drodze przez uczestników ruchu.

Na drogach przeznaczonych głównie dla ruchu zmotoryzowanego o średniej i wysokiej prędkości podstawowe wymagania oparte są na kryteriach luminancyjnych.

W strefach komunikacyjnych, w których głównymi użytkownikami są piesi i rowerzyści, podstawowym parametrem oświetleniowym jest poziom i równomierność natężenia oświetlenia. Parametry te stosowane są również dla ruchu samochodowego w przypadkach, kiedy obserwacja sytuacji drogowej prowadzona jest z niewielkiej odległości, przykładowo na drogach lokalnych, osiedlowych, parkingach, itp.[1]

Dobór odpowiednich parametrów fotometrycznych oświetlenia drogowego jest uzależniony od szeregu czynników, zazwyczaj zmiennych w czasie, tj. np. od natężenia ruchu pojazdów, jasności otoczenia, istnienia zaparkowanych pojazdów.

Na warunki widzenia, w różnych sytuacjach oświetleniowych, może mieć również wpływ barwa światła. Obecnie obowiązująca norma, PN-EN 13201:2016 „Oświetlenie dróg”, nie zawiera procedur, umożliwiających uwzględnienie tego czynnika i dokonanie doboru odpowiednich wymagań oświetleniowych. Zmiany w tej normie są obecnie przedmiotem prac Komitetu Technicznego 169 „Światło i oświetlenie” (CEN/TC169 „Light and lighting”), w Europejskiej Komisji Normalizacyjnej. Powinny one uwzględniać zalecenia zawarte w Raporcie Technicznym 191:2010, „System zalecany dla fotometrii mezopowej oparty na wydolności wzrokowej” [2], opublikowanym przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową. Zawiera on propozycje dotyczące możliwości uwzględnienia wpływu barwy światła w oświetleniu drogowym na dobór parametrów normatywnych, szczególnie na drogach o niskich wymaganiach oświetleniowych.

Barwa światła w oświetleniu drogowym

W instalacjach oświetlenia dróg i miejsc publicznych najczęściej wykorzystywano lampy sodowe wysokoprężne, sukcesywnie zastępujące lampy rtęciowe, często jeszcze stosowane w oświetleniu parków, dróg lokalnych, osiedlowych itp.

Podstawową przeszkodą w zastępowaniu nieefektywnych lamp rtęciowych przez inny rodzaj lamp był brak zamiennika, spełniającego odpowiednie wymagania zarówno pod względem energooszczędności i trwałości, jak i jakości światła, tj. barwy światła i oddawania barw. Lampy sodowe charakteryzują się wysoką trwałością i skutecznością świetlną, jednak cechy barwy ich światła nie odpowiadają potrzebom oświetlania np. terenów zielonych i osiedli mieszkaniowych. Lampy metalohalogenkowe, z uwagi na jakość światła, mogą zastąpić lampy sodowe. Charakteryzują się one jednak niższą trwałością i niższą skutecznością świetlną, przy jednocześnie wyższej cenie. Są także bardziej wrażliwe na zmiany napięcia zasilającego i mają znacząco dłuższy czas powtórnego zapłonu.

Źródła światła najnowszej generacji - diody LED, stają się rozwiązaniem łączącym praktycznie wszystkie pożądane cechy lamp stosowanych w oświetleniu zewnętrznym: wysoką trwałość i skuteczność świetlną, szeroki zakres dostępnych mocy, możliwość regulacji strumienia świetlnego, itp.

Ważną cechą lamp LED w oświetleniu zewnętrznym jest możliwość wyboru różnej barwy światła, często jednak stwarzająca pewne problemy.

W odniesieniu do „tradycyjnych” rozwiązań oświetleniowych, problem barwy był marginalny, ponieważ powszechnie stosowano wysokoprężne lampy sodowe o żółtym świetle. Stosowanie lamp metalohalogenkowych, o zróżnicowanych barwach światła białego, należało do wyjątków. Obecnie dostępne i coraz powszechniej wykorzystywane lampy LED mają bardzo zróżnicowane cechy barwy światła.

Parametrem opisującym wygląd barwy światła jest temperatura barwowa T_{CP} , której wartość została powiązana z subiektywną oceną wyglądu barwy, zestawioną w tabeli 1 [4].

Tab. 1. Grupy wyglądu barwy [4]

Wygląd barwy	Temperatura barwowa najbliższa T_{CP}
ciepły	poniżej 3 300 K
neutralny	od 3 300 K do 5 300 K
chłodny	powyżej 5300 K

Jak wynika z tabeli 1, określenia wyglądu barwy- ciepły, neutralny, chłodny - odpowiadają stosunkowo szerokim zakresom temperatur barwowych, stąd w specyfikacjach sprzętu oświetleniowego należy używać opisu tej cechy lamp powiązanego z określonym przedziałem wartości temperatury barwowej, np. $T_{CP} = 3200K \pm 100K$.

Poza technicznym uszczegółowieniem opisu barwy światła, coraz ważniejszym problemem staje się jej dobór do określonych zastosowań w oświetleniu dróg i ulic. Pierwsze instalacje z lampami LED wykorzystywały źródła światła o wysokich temperaturach barwowych, co bezpośrednio wynikało z niedoskonałości technologii uzyskiwania światła białego, tj. nałożenia żółtego luminoforu na niebieską diodę. Zwiększenie udziału promieniowania samej diody w strumieniu świetlnym lampy poprawiało skuteczność świetlną.

Obecne rozwiązania technologiczne umożliwiają uzyskiwanie niższych temperatur barwowych, a więc cieplejszego światła, praktycznie bez obniżenia skuteczności świetlnej. Daje to możliwość dokonania właściwego wyboru, zależnie od oświetlanego obszaru.

Strefy staromiejskich uliczek czy też strefy osiedli powinny być oświetlone ciepłym światłem. Jest to ważne z dwóch powodów – ciepłe światło w mniejszym stopniu negatywnie wpływa na ludzi i zwierzęta, powoduje też mniejsze „zanieczyszczenie nieba światłem”.

Światło o barwie neutralnej można zastosować na ważniejszych drogach o większej prędkości i natężeniu ruchu, a także w strefach zagrożonych aktami agresji.

Wykorzystanie światła chłodnego powinno być ograniczone wyłącznie do zastosowań specjalnych – np. do wyróżniania przejść dla pieszych na drogach z oświetleniem o niższej temperaturze barwowej.

Parametrem opisującym jakość oddawania barw przez światło lamp – jest ogólny wskaźnik oddawania barw R_a . Jego wartość może się zawierać w przedziale $R_a = 0 \div 100$. Znaczenie tego parametru zależy od miejsca i funkcji oświetlenia.

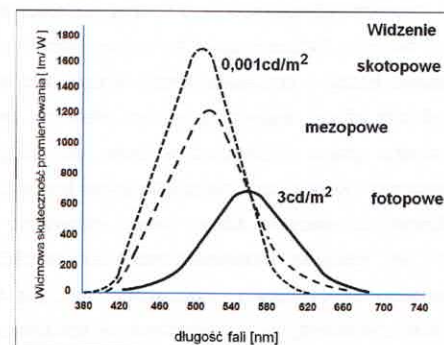
W zastosowaniach do oświetlenia drogowego wartość wskaźnika wynoszącą $R_a \geq 70$ należy uznać za całkowicie wystarczającą, zapewniającą dobre oddawanie barw. Stosowanie lamp LED o wyższych wskaźnikach oddawania barw jest nieekonomiczne, ponieważ poprawa R_a zawsze wiąże się z obniżeniem

skuteczności świetlnej. Również uzyskany efekt estetyczny jest ograniczony, ponieważ zdolność rozróżniania barw przez człowieka pogarsza się przy niższych poziomach oświetlenia, a takie właśnie są stosowane w oświetleniu dróg i ulic.

Barwa światła a warunki widzenia w oświetleniu drogowym

Problem stosowania światła białego w oświetleniu zewnętrznym jest od kilkunastu lat przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie. Wskazuje się, że strumień świetlny lamp jest wyznaczany dla widzenia fotopowego, a więc adaptacji oczu do warunków widzenia dziennego, natomiast poziomy stosowane w oświetleniu zewnętrznym leżą w przedziale, w którym strumień świetlny lamp, obliczony dla widzenia fotopowego, nie zawsze odpowiada rzeczywistej percepcji wzrokowej. Wrażenie wzrokowe zależy od skuteczności świetlnej widmowej, która zmienia się wraz ze zmianą poziomu adaptacji wzroku.

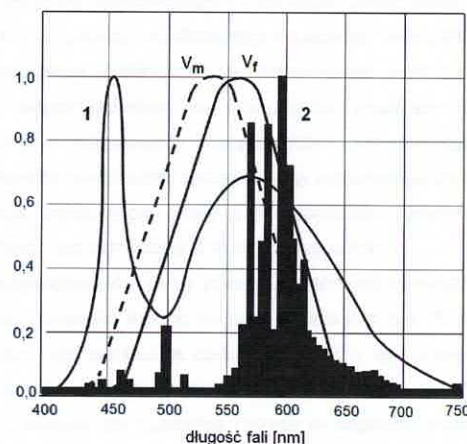
W oświetleniu drogowym stosowane normatywne poziomy luminancji zawierają się w przedziale od ok. $0,1cd/m^2$ do $3cd/m^2$, co odpowiada warunkom widzenia mezopowego, a więc pośredniego pomiędzy widzeniem dziennym i nocnym. Przy takim poziomie adaptacji, maksimum czułości widmowej oczu obserwatorów jest przesunięte w kierunku krótszych długości fali w porównaniu do widzenia fotopowego. Ponadto, bezwzględna czułość widmowa wzroku ulega także zwiększeniu, co przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ warunków adaptacyjnych na czułość widmową wzroku

Zastosowanie w oświetleniu zewnętrznym źródeł światła z dużym udziałem promieniowania z zakresu krótkofalowego, a więc światła białego, powoduje

zwiększenie bodźca działającego na oko ludzkie [2, 4]. Wzrost czułości oka przy niskich poziomach luminancji adaptacji i przesunięcie maksimum w kierunku fal krótszych powoduje przewartościowanie strumienia świetlnego na korzyść tych źródeł światła, które emitują strumień energetyczny w krótkofalowej części widma. Ten właśnie przypadek występuje w oświetleniu lampami metalohalogenkowymi oraz, szczególnie wyraźnie, przy stosowaniu diod elektroluminescencyjnych.



Rys. 2. Widmo promieniowania: 1- diody LED, 2- lampy sodowej wysokoprężnej; względne widmowe czułości oka: V_f - przy widzeniu: fotopowym, V_m - przy widzeniu mezopowym

Z porównania, przedstawionych na rysunku 2, rozkładów widmowych promieniowania typowej diody LED oraz lampy sodowej wysokoprężnej wynika, że:

- dla lampy sodowej dobre dopasowanie widma do czułości wzroku zaadaptowanego do jasności skutkuje wysoką skutecznością świetlną. Przy obniżeniu poziomu adaptacji i przesuwaniu się maksimum czułości wzroku w kierunku fal krótszych, efektywnie oddziałujący na wzrok strumień świetlny jest mniejszy,

- dla diod LED niższy poziom adaptacji wzroku powoduje zwiększenie udziału krótkofalowej części widma w odczuwanym wrażeniu wzrokowym, co skutkuje wzrostem efektywnej skuteczności świetlnej.

W literaturze przedmiotu [2] opisana jest uproszczona metoda wyznaczania „efektywnej” luminancji, odpowiadającej aktualnemu poziomowi adaptacji wzroku.

Wykorzystuje się parametr S/P – tj. stosunek strumieni świetlnych źródła dwukrotnie przeliczonych, tj:

- dla oka zaadaptowanego do ciemności (S – scotopic)
- dla oka zaadaptowanego do jasności (P - photopic).

Przykładowe wartości S/P dla wybranych lamp wynoszą [4]:

- niskoprężna lampa sodowa	0,25
- wysokoprężna lampa sodowa	0,66
- lampa rtęciowa z luminoforem	1,08
- lampa metalohalogenkowa	1,57
- LED 4300K	2,04

W Raporcie CIE 191:2010 dla danego rozkładu widmowego lampy, opisanego parametrem S/P, oraz dla danego poziomu luminancji adaptacji, wyznaczonego dla widzenia fotopowego, podano różnice pomiędzy luminancją mezopową i odniesieniową luminancją fotopową – Tabela 1. Zaznaczono różnice istotne dla praktyki projektowej, przekraczające 5%.

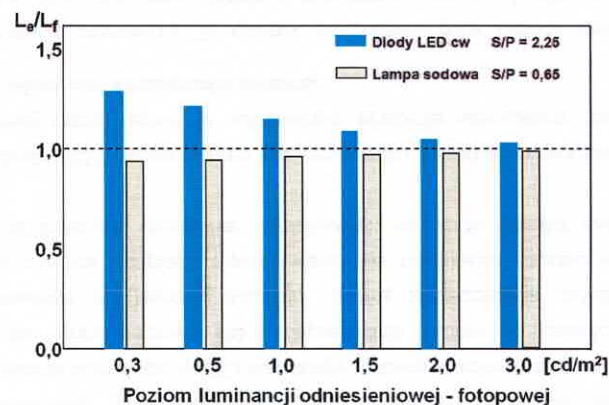
Tab.1. Procentowe różnice pomiędzy luminancją mezopową i fotopową, dla różnych wartości S/P i różnych poziomów luminancji fotopowej

Lampa	S/P	Poziom luminancji fotopowej [cd/m ²]					
		0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
LPS	0,25	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%
HPS	0,65	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%
LRF	1,05	1%	1%	1%	0%	0%	0%
MH ww	1,45	9%	7%	5%	3%	3%	1%
LED cw	2,25	24%	19%	12%	9%	7%	4%

Oznaczenia w tabeli

1: LPS - niskoprężna lampa sodowa, HPS - wysokoprężna lampa sodowa, LRF – wysokoprężna lampa rtęciowa z luminoforem, MH ww – lampa metalohalogenkowa ciepło-biała, LED cw– dioda elektroluminescencyjna chłodno-biała.

Na rysunku 3 przedstawiono graficznie względne zmiany subiektywnie odczuwanej luminancji przy oświetleniu typowymi, wysokoprężnymi lampami sodowymi i lampami LED o chłodno-białej barwie światła.



Rys.3. Względne zmiany subiektywnie odczuwanej luminancji L_e odniesione do luminancji fotopowej L_f .

Z tabeli 1 wynika, że znaczące różnice w odbiorze luminancji, zależne od rozkładu widmowego promieniowania lamp, powstają dla niskich poziomów luminancji, a więc dla poziomów oświetlenia dróg i ulic o mniejszym znaczeniu komunikacyjnym. Powstaje jednak problem, ponieważ dla tych dróg stosuje się wymagania oświetleniowe oparte na kryterium natężenia oświetlenia, podczas gdy o warunkach adaptacji wzroku decyduje poziom luminancji.

Przeliczenie parametrów opartych na natężeniu oświetlenia na parametry luminancyjne wymaga znajomości charakterystyk odbiciowych nawierzchni jezdni dla typowych warunków obserwacji, występujących na oświetlanej powierzchni. Charakterystyki wykorzystywane w programach komputerowych do obliczeń parametrów oświetlenia drogowego nie odpowiadają warunkom obserwacji na drogach lokalnych o małych odległościach obserwacji, wynikających z niewielkiej prędkości poruszania się obserwatorów – kierowców, rowerzystów i pieszych.

Ważnym źródłem informacji o możliwości wykorzystania cech światła białego może być norma brytyjska BS 5489 – 1:2013 [5], w której uwzględniono zmianę warunków widzenia przy niskich poziomach oświetlenia, związaną z jakościowymi cechami barwy światła różnych lamp. W normie tej uwzględniono zarówno parametr S/P jak również wskaźnik oddawania barw, opisujący jakość barwy – tabela 2.

Tab.2. Poziomy oświetlenia odpowiadające różnym warunkom adaptacyjnym [5]

Klasa S (P)	Wymagany poziom natężenia oświetlenia E [lx]					
	zależny od S/P					
	S/P = nieznane Ra < 60		S/P = 1,2 Ra > 60		S/P = 2 Ra > 60	
	E _{sr}	E _{min}	E _{sr}	E _{min}	E _{sr}	E _{min}
S1 (P1)	15,0	3,0	13,4	2,7	12,3	2,5
S2 (P2)	10,0	2,0	8,0	1,7	7,7	1,5
S3 (P3)	7,5	1,5	6,3	1,3	5,5	1,1
S4 (P4)	5,0	1,0	4,0	0,8	3,4	0,7
S5 (P5)	3,0	0,6	2,2	0,4	1,8	0,4
S6 (P6)	2,0	0,4	1,4	0,4	1,1	0,4

Wnioski

W warunkach adaptacji wzroku do niskich poziomów luminancji, oprawy z lampami metalohalogenkowymi lub z diodami elektroluminescencyjnymi są bardziej efektywne niż oprawy z lampami sodowymi, dotychczas uważanymi za najefektywniejsze rozwiązanie.

Szczególnie korzystne może być zastosowanie światła białego o wysokim wskaźniku S/P, na drogach lokalnych, osiedlowych, parkingach itp.

Należy jednak podkreślić, że wykorzystanie w praktyce projektowej cech lamp o białym świetle w pełni możliwe będzie po opracowaniu zasad doboru wymagań oświetleniowych, sprowadzających się do zastąpienia poziomów natężenia oświetlenia i poziomów luminancji fotopowej, poziomami oświetlenia odpowiadającymi widzeniu mezopowemu. Wartości te będą zmienne, zależnie od rozkładu widma promieniowania zastosowanego źródła światła oraz od poziomu i rozkładu luminancji w polu widzenia.

Dane literaturowe [6] wskazują, że w badaniach i kryteriach doboru poziomów oświetlenia należy uwzględnić również wiek obserwatorów, z którym jest związane pogorszenie widzenia dla krótkofalowego zakresu widzialnego widma promieniowania. Charakterystyki fotometryczne lamp oraz normy są opracowywane dla tzw. „fotometrycznych obserwatorów normalnych”, a więc osób młodych, o normalnym wzroku.

Literatura

- [1] CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic, ISBN 978 3 901906 86 2
- [2] CIE 191:2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance, ISBN 978 3 901906 88 6
- [3] PN-EN 13201:2016: Oświetlenie dróg
- [4] Górczewska M., Mroczkowska S., Valuation of road lighting parameters for luminaires with LED, Przegląd Elektrotechniczny Nr 10/2010, ISSN 0033-2097
- [5] BS 5489 – 1:2013 Code of practice for the design of road lighting
- [6] Sagawa K. Vision of the elderly and visual impaired - for accessible design In light and lighting, CIE Proceedings, Pekin (2007), D1 62-65

Politechnika Poznańska
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Zakład Techniki Świetlnej i Elektrotermii
Tel. 605 408 388
e-mail: luxel@hot.pl

PROFESOR
WYDZIAŁ BUDYNKÓW I DRÓG

Roman Buła

PIERWSZY WICEPREZYDENT
INSTYTUTOWICZ

Bogumił Sobuła