

PIOTR JAKUBOWSKI

E-mail: piotr.7akubowski@gmail.com

WPŁYW ROZKŁADU WIDMOWEGO MOCY PROMIENISTEJ ULICZNYCH OPRAW OŚWIETLENIOWYCH TYPU LED NA ZANIECZYSZCZANIE ŚWIATŁEM OTOCZENIA

WSTĘP

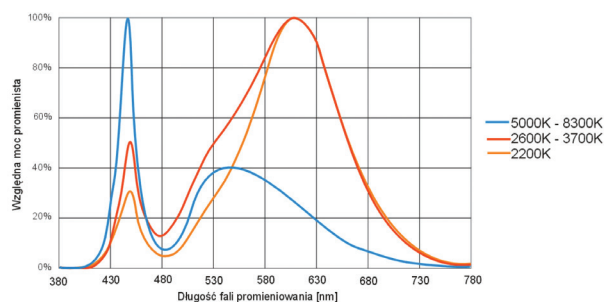
Nieustanny rozwój cywilizacyjny i postępująca urbanizacja niosą ze sobą konieczność zmian infrastruktury oświetleniowej, co w konsekwencji prowadzi do zwiększonego popytu na energię elektryczną. Z uwagi na nowe wymagania normatywne dotyczące jakości i efektywności źródeł światła oraz ograniczenia związane z siecią energetyczną, konieczne jest poszukiwanie zupełnie nowych rozwiązań w dziedzinie oświetlenia. W ostatnich latach coraz bardziej popularne stają się półprzewodnikowe źródła światła LED (ang. Light Emitting Diodes), zarówno w oświetleniu wewnętrznym, jak i zewnętrznym. Z uwagi na duży potencjał tej technologii, ów trend utrzyma się w perspektywie kolejnych kilkunastu lat. Konieczność szukania oszczędności w produkowanym sprzęcie oświetleniowym może mieć niekorzystny wpływ na końcową jakość opraw oświetleniowych. Niewłaściwy dobór lub niska jakość komponentów, błędnie zaprojektowane oprawy oraz nieprzemyślane zastosowania mogą pro-

wadzić nie tylko do ograniczenia zalet płynących z technologii LED, ale również, pośrednio lub bezpośrednio, wpływać na bezpieczeństwo użytkowników oraz na środowisko, w którym pracują. Pomimo rosnącej świadomości projektantów i użytkowników oświetlenia kwestia zanieczyszczenia światłem jest niestety ciągle drugorzędna. Z marketingowego punktu widzenia, poruszanie tego tematu może być niekorzystne. Rynek oczekuje wysokich skuteczności świetlnych, a ze względów technologicznych najwyższe wartości daje się uzyskać z diod o wysokich temperaturach barwowych. Takie diody odznaczają się dużą emisją promieniowania w zakresie fal 430–480 nm, tj. światła niebieskiego, które w atmosferze ulega silnemu rozproszeniu i wzmaga efekt zanieczyszczenia światłem. W następstwie możemy mieć do czynienia nie tylko ze spadkiem komfortu życia, ale również z bezpośrednim, negatywnym wpływem na ludzki organizm oraz cały ekosystem.

ZASADA EMISJI PROMIENIOWANIA O BARWIE BIAŁEJ PRZEZ ŹRÓDŁA ŚWIATŁA TYPU LED

Idea funkcjonowania popularnych białych diod LED jest oparta na zjawisku konwersji światła i mieszaniu barw. Chip półprzewodnikowy wytwarza światło niebieskie, które z kolei pobudza luminofor generujący światło żółte. Powstałe w ten

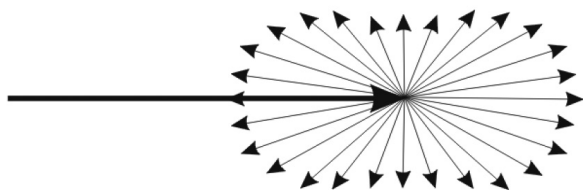
sposób promieniowanie ulega zmieszaniu, a oko ludzkie odbiera to jako wrażenie światła białego. W zależności od składu chemicznego luminoforu możliwe jest wytwarzanie światła białego o różnorodnych rozkładach widmowych, czyli w konsekwencji o niskiej lub



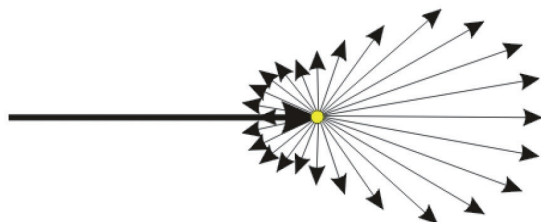
Ryc. 1. Charakterystyki względnego rozkładu mocy promienistej białych diod Cree (charakterystyki sporządzone na podstawie karty katalogowej <http://www.cree.com>).

wysokiej temperaturze (tzw. światło ciepłe, neutralne lub zimne). Na Ryc. 1 zaprezentowano charakterystyki względnego rozkładu widmowego mocy promienistej białych diod LED firmy Cree, jako przykład emisji promieniowania o różnych wartościach temperatury barwowej. Widoczna jest zależność: przy niższych temperaturach barwowych w tym promieniowaniu dominuje odpowiedź żółtego luminoforu, który pełni funkcję konwertera, zaś przy wysokich temperaturach barwowych mamy do czynienia z relatywnie dużą zawartością promieniowania niebieskiego w granicach od 430 do 480 nm.

W związku z ekonomiczną presją, która preferuje oświetlenie o wysokiej wartości skuteczności świetlnej [lm/W], w aplikacjach



Ryc. 2. Ilustracja zjawiska rozpraszania Rayleigh'a (<http://home.comcast.net/~vinelandrobotics/>).



Ryc. 3. Ilustracja rozpraszania Mie na małych i dużych cząstkach (<http://home.comcast.net/~vinelandrobotics/>).

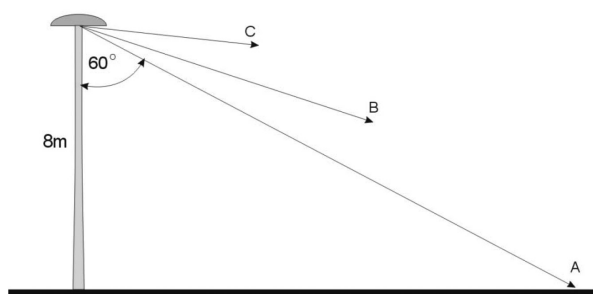
oświetlenia ulicznego stosuje się przeważnie diody o wysokich temperaturach barwowych, najczęściej powyżej 5000 K. Źródła takie są określane w literaturze mianem BRWL (ang. Blue-Rich White Light) (IDSA 2010). Wysoka zawartość promieniowania niebieskiego podnosi niestety efekt zanieczyszczenia światłem otocznia, za co odpowiada rozpraszanie Rayleigh'a oraz Mie. W pierwszym przypadku (Ryc. 2), światło jest rozpraszane na cząstkach o rozmiarach dużo mniejszych niż długość rozpraszanej fali światła. Zależność ta jest silnie uwarunkowana długością padającej fali i jest proporcjonalna do odwrotności czwartej potęgi jej długości ($\sigma_{\text{Ray}} \sim \lambda^{-4}$).

Krótsze fale ulegają silniejszemu rozproszeniu niż fale dłuższe. Na przykład fale o długości 440 nm są ponad dwukrotnie bardziej rozpraszane niż te o długości 550 nm. Z tego właśnie względu możemy obserwować niebieski kolor nieba za dnia (światło słoneczne rozprasza się na cząsteczkach tlenu i azotu).

Z kolei rozpraszanie Mie (Ryc. 3) dotyczy większych cząstek, nie jest już tak silne i jest odwrotnie proporcjonalne do danej długości fali ($\sigma_{\text{Mie}} \sim \lambda^{-1}$). Światło jest rozpraszane w niewielkich kątach w stosunku do początkowego biegu promieni, dzięki czemu zjawisko to nie ma aż tak silnego wpływu na zanieczyszczenie światłem jak rozpraszanie Rayleigh'a (IDSA 2010).

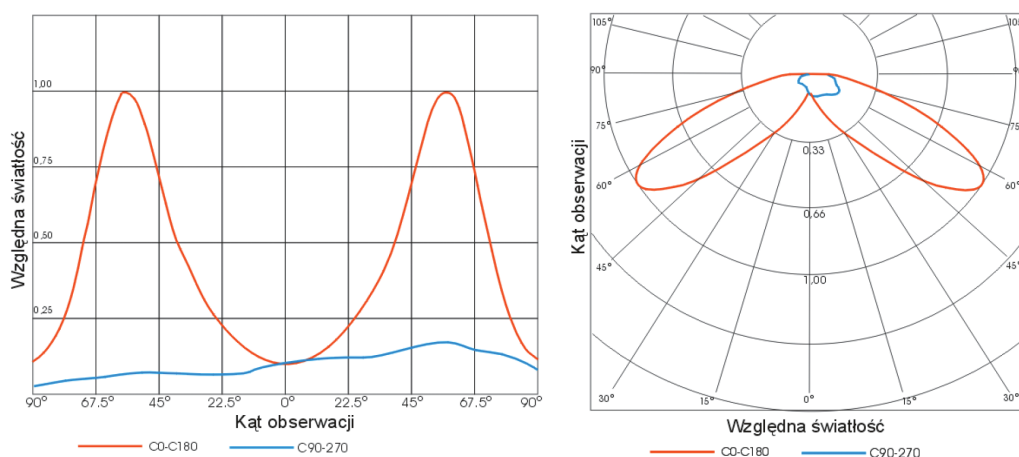
W przypadku opraw ulicznych mamy najczęściej do czynienia z szerokim kątem rozsyłu strumienia świetlnego (Ryc. 4). Konieczność stosowania tego typu rozsyłu wynika ze względów ekonomicznych, praktycznych, regulacji prawnych związanych z rozmieszczeniem i wysokością słupów oświetleniowych oraz oczekiwanymi parametrami fotometrycznymi (natężenie oświetlenia, luminancja, kąt ochrony). W konsekwencji, bryły fotometryczne typowych soczewek do diod LED w aplikacjach ulicznych są asymetryczne i po-





Ryc. 4. Geometria strumienia świetlnego emitowanego przez uliczną oprawę oświetleniową.

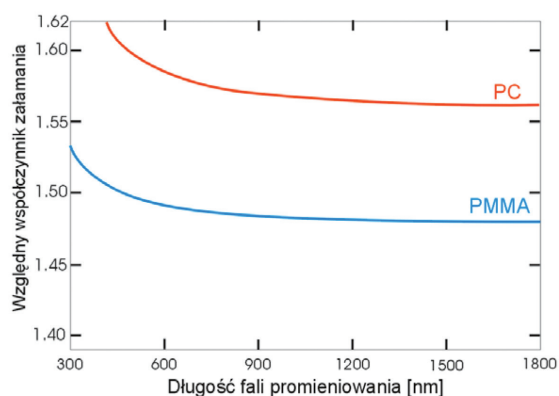
siadają maksima światłości w okolicach kąta 60° lub więcej. Przykładowe krzywe światłości przedstawiono na Ryc. 5.



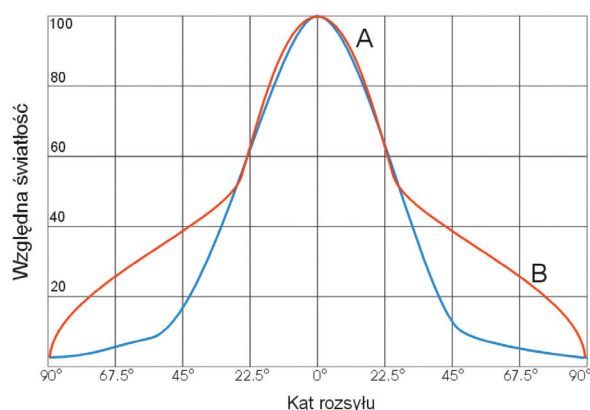
Ryc. 5. Względne krzywe światłości soczewek do diod LED dedykowanych do opraw ulicznych (na podstawie charakterystyk z kart katalogowych LEDIL Strada) (<http://www.ledil.fi/>).

W przeciwieństwie do typowego oświetlenia wewnętrznego, w oświetleniu ulicznym spotykamy się ze stosunkowo długim biegiem promieni od źródła do płaszczyzny oświetlanej. Rys. 4 przedstawia sytuację, w której oprawa jest zawieszona na wysokości 8m, a promienie wychodzące pod kątem 60° przebywają drogę około 16 m. Zwiększa się zatem stopień rozproszenia światła. W warunkach miejskich, gdzie mamy do czynienia ze zwiększoną koncentracją pyłów i innych zanieczyszczeń powietrza, silniej rozproszone światło niebieskie może być mocniej absorbowane przez otoczenie niż inne długości fali. W konsekwencji efekt zanieczyszczenia światłem o dużej zawartości fal krótkich występuje w pobliżu źródła promieniowania i ulega redukcji w miarę zwiększania odległości od oprawy oświetleniowej.

W przypadku biegu pozostałych promieni, zaznaczonych na Ryc. 4 literami „B” oraz „C”, sytuacja może wydawać się korzystniejsza ze względu na niskie wartości światłości w tych kierunkach (zaleta soczewek typu „free form optics”, które dają możliwość osiągnięcia ostrych charakterystyk odcięcia). Tym niemniej należy pamiętać o zjawisku wynikającym z prawa załamania światła na granicy ośrodków: im krótsza długość fali, tym większy kąt załamania (Ryc. 6). W efekcie może się okazać, że nieco większa ilość światła niebieskiego jest emitowana w szerszych kątach (zjawisko określane jako „changing color over observation angle” objawia się zmianą barwy światła w zależności od kąta obserwacji, może mieć różne przyczyny, ale niektóre soczewki mogą wzmacniać ten efekt).



Ryc. 6. Współczynnik załamania światła w zależności od długości fali dla typowych materiałów stosowanych w soczewkach do diod LED (PMMA oraz PC) (<http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/mobile/article.aspx?articleid=1157700>).



Ryc. 7. Zestawienie dwóch źródeł o rozsyłach $\pm 30^\circ$.

Zwykle oprawy LED są zaprojektowane do zawieszenia poziomo (chyba, że producent zaznaczył inaczej), gdyż zaawansowana optyka pozwala precyzyjnie kierować światło w pożądane miejsce. Wszelkie zmiany orientacji lampy, mające na celu zwiększanie płaszczyzny oświetlanej, mogą prowadzić do nadmiernego zanieczyszczenia światłem i podnosić efekt olśnienia.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na to, co kryje się pod pojęciem „kąta rozsyłu oprawy”. Najczęściej jest to tzw. kąt połówkowy, czyli taki, przy którym wartość światłości danego źródła lub oprawy spada do połowy wartości maksymalnej. Nie zawsze jest to jednak informacja miarodajna, gdyż nie za-

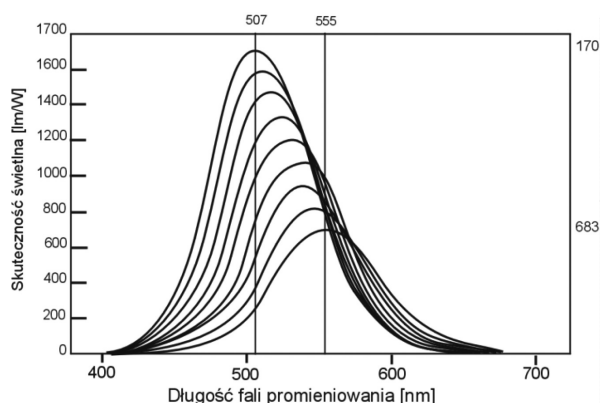
wiera danych o tym, ile strumienia świetnego jest emitowane w daną część przestrzeni. Na Ryc 7 przedstawiono dwie krzywe światłości o kącie połówkowym około $\pm 30^\circ$. W przypadku krzywej B znacznie większa część strumienia jest emitowana w kątach powyżej $\pm 30^\circ$ (w stosunku do krzywej A, która ma dużo bardziej ostrą charakterystykę odcięcia). Zatem, zarówno w przypadku projektowania, jak i modernizacji oświetlenia należy przeprowadzać szczegółowe symulacje z użyciem stosowanych źródeł.

W przypadku nowych instalacji oświetleniowych projektant ma możliwość optymalizacji rozwiązania pod kątem zmniejszenia emisji światła w szerszych, niepożądanych kątach (głównie ze względów spełnienia norm dotyczących ograniczania olśnienia). Przede wszystkim może to być dokonane poprzez odpowiedni dobór opraw o ostrej charakterystyce odcięcia oraz ich właściwy sposób rozmieszczenia (rozstaw słupów oraz ich wysokość). Okazuje się jednak, że bardzo często inwestor oczekuje jedynie modernizacji oświetlenia ulicznego polegającego na wymianie opraw oświetleniowych, przy zachowaniu dotychczasowego rozmieszczenia i wysokości słupów. Szczególnie niekorzystne są sytuacje, gdy słupy są niskie, a odległości między nimi znaczne. Wówczas, aby zapewnić równomierność natężenia oświetlenia konieczne jest stosowanie opraw o bardzo szerokich kątach rozsyłu, a w konsekwencji wzrasta ryzyko zanieczyszczenia światłem.

WPLYW ŚWIATŁA NIEBIESKIEGO NA ORGANIZM LUDZI ORAZ ŚRODOWISKO NATURALNE

Silnie rozpraszane promieniowanie o krótkich falach potęguje efekt zanieczyszczenia światłem. Wiąże się to z kilkoma mniej lub bardziej uciążliwymi następstwami. Dowiedziono eksperymentalnie, że źródła BRWL (o wysokich temperaturach barwowych, zawierające więcej światła niebieskiego) potęgują efekt olśnienia. Doświadczenie przeprowadzone na grupie 36 osób potwierdziło nie tylko oczywisty fakt zależności odczucia olśnienia od luminancji źródła oraz kąta obserwacji, ale również od temperatury barwowej. Niezależnie od wieku, osoby biorące udział w eksperymencie wskazały źródło o wyższej temperaturze barwowej (6000K) jako to, które wywołuje bardziej nieprzyjemne odczucie olśnienia niż źródło o niskiej temperaturze barwowej (3000K). Do tych samych wniosków

doszli badacze analizujący wpływ temperatury barwowej czołowych lamp samochodowych na wrażenie olśnienia. Odczucia klasyfikowano na podstawie skali De Bora. Ponownie, osoby badane wskazały źródło o wyższej temperaturze barwowej (LED 6000K) jako powodujące silniejsze odczucie dyskomfortu niż źródło o niskiej temperaturze barwowej (halogen, ok. 3000K). Średnia wartość olśnienia dla źródła żarowego wyniosła 5,3 w skali Boera (co określone jest jako „akceptowalne”), natomiast dla światła zimnego było to średnio 3,3 w skali Boera (co klasyfikuje się jako „przeszkadzające”) (SIVAK i współaut. 2005, XIAOYAN i współaut. 2013). Powodem takiego stanu rzeczy jest zmiana czułości oka w zależności od luminancji otoczenia. W obydwu eksperymentach badacze starali się



Ryc. 8. Zmiana czułości oka w zależności od poziomu luminancji otoczenia (płynne przejście od widzenia fotonowego do mezopowego).

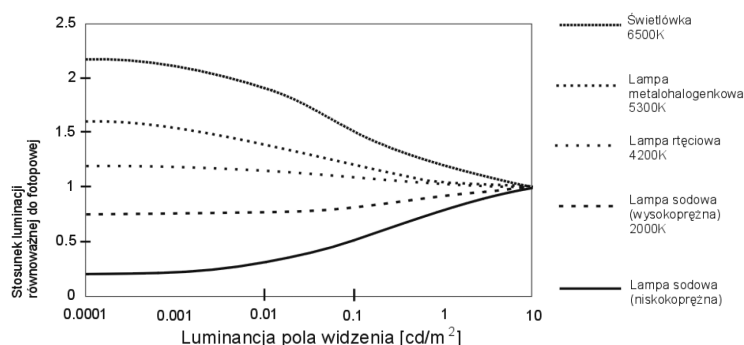
zasymulować warunki panujące w nocy, a więc w sytuacji, kiedy oko ludzkie musi zaadaptować się do niskiej luminancji otoczenia, czyli małej liczby słabych bodźców docierających do siatkówki. Większą aktywność wykazują wtedy pręciki, które odznaczają się dużo większą czułością w obszarze fal krótszych. Zatem, im większy udział fal krótkich, tym większa jest postrzegana luminancja źródła. W praktyce najczęściej mamy jednak do czynienia z aktywnością obydwu receptorów (czopków i pręcików), co określa się mianem widzenia mezopowego. Maksimum czułości jest wówczas zlokalizowane pomiędzy 507 nm (pełne widzenie skotopowe) a 555 nm (pełne widzenie fotonowe), a jego dokładne położenie zależy od luminancji otoczenia (im mniejsza tym bardziej przesuwają się w kierunku fal krótkich (Ryc. 8) (JIN i współaut. 2009).

Zatem stosowanie oświetlenia o niskiej temperaturze barwowej może istotnie przy-

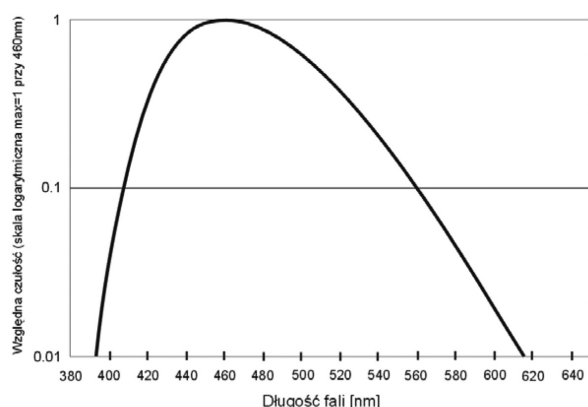
czynić się do polepszenia percepcji w warunkach niskiej luminancji, co z kolei może mieć pozytywny wpływ na bezpośrednie bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego. Tym niemniej, luminancja takiego źródła w warunkach ograniczonej ilości światła otoczenia może powodować wrażenie większego ośnienia, co przekłada się niekorzystnie na bezpieczeństwo. Parametry źródeł światła są określane dla warunków widzenia fotonowego, dlatego przy projektowaniu oświetlenia zewnętrznego warto uwzględnić współczynnik korekcji, w zależności od luminancji otoczenia oraz od temperatury barwowej źródła (przykład na Ryc. 9; im wyższa temperatura barwowa i niższa luminancja, tym wyższy współczynnik korekcji). W przypadku stosowania źródeł światła o wysokich temperaturach barwowych, odpowiednio skorygowane obliczenia pozwolą nie tylko na zmniejszenie zużycia energii i redukcję ośnienia, ale również na ograniczenie efektu zanieczyszczenia światłem (GRYNCEWICZ 2012).

W przytoczonych powyżej badaniach dotyczących ośnienia, analizowano również wpływ temperatury barwowej źródła (a więc niejako pośrednio zawartości światła niebieskiego) na wielkość źrenicy. Dowiedziano, że zwiększona zawartość krótkich fal przy niskich wartościach luminancji otoczenia, wpływa na zmniejszenie wielkości źrenicy, co prowadzi do zmniejszenia ilości światła wpadającego do oka. Ponadto, światło niebieskie wydłuża czas adaptacji oka (od widzenia fotonowego do skotopowego/mezopowego), co może stanowić pewien czynnik zagrożenia, np. w ruchu ulicznym przy opuszczaniu stref silnie oświetlonych światłem o niskiej temperaturze barwowej. Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym ilość światła docierającego do siatkówki jest żółknięcie soczewki oka. Jest to zjawisko naturalne, postępujące z wiekiem. Sprawia, że w miarę upływu lat czułość oka zmniejsza się w zakresie fal krótkich. W konsekwencji osoby starsze mają słabszą zdolność postrzegania światła o dużej zawartości krótkich fal, czyli światła o wysokich temperaturach barwowych.

Światło niebieskie jest w znacznej mierze odpowiedzialne za ograniczanie wydzielania melatoniny w organizmie, która jest



Ryc. 9. Współczynnik korekcji luminancji w zależności od temperatury barwowej źródła (GRYNCEWICZ 2012).



Ryc. 10. Wpływ długości fali światła na tłumienie wydzielania melatoniny.

między innymi syntezowana przez siatkówkę. Hormon ten reguluje naturalny rytm dobowy uwarunkowany przez tysiące lat ewolucji człowieka. Wraz ze spadkiem natężenia oświetlenia w otaczającym środowisku, organizm zwiększa wydzielanie melatoniny przygotowując się do niezbędnej fazy snu. Ryc. 10 przedstawia wpływ długości fali światła na tłumienie wydzielania melatoniny; maksimum tej funkcji przypada na obszar emisji niebieskich chipów służących do pobudzania konwertera w białych diodach LED. Nadmierna ilość światła niebieskiego może w znacznym stopniu ograniczać wydzielanie melatoniny prowadząc do zaburzeń snu, a w konsekwencji do innych schorzeń wynikających z jego niedoboru.

Problem szkodliwego wpływu światła niebieskiego na organizm ludzki został odnotowany przez komisję IEC, w wyniku czego stworzono standard klasyfikacji diod LED pod względem ryzyka uszkodzenia wzroku – dokument IEC62471 (*Photobiological safety of lamps and lamp systems IEC 62471:2006*). Opracowanie dotyczy zagrożeń wynikających z bliskiej, bezpośredniej obserwacji diod LED, które z natury odznaczają się dużą luminancją. Standard określa cztery tzw. grupy ryzyka, do których mogą zostać zaklasyfikowane diody LED. Zakłada się obserwację źródła z bliskiej odległości 20 cm. Długość czasu ekspozycji, który może doprowadzić do uszkodzenia wzroku wyznacza grupę ryzyka (im czas ten jest krótszy, tym wyższa grupa ryzyka). Rozwinięciem tego standardu jest publikacja IEC 62778 (*Application of IEC 62471 for asses-*

sment of blue light hazard to light source and luminaires) dotycząca zależności wyznaczonych grup ryzyka źródeł światła do opraw oświetleniowych. Bezpieczeństwo fotobiologiczne jest kwestią bardzo istotną, aczkolwiek rozpatrywane w kontekście zanieczyszczenia światłem ma znaczenie raczej wtórne. Niepożądane światło, które określamy mianem zanieczyszczającego odznacza się bowiem mocno zredukowaną luminancją (http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00079436_0.pdf/Details).

Zanieczyszczenie światłem może mieć również daleko idący wpływ na faunę. Podobnie jak w przypadku człowieka, światło niebieskie może wywoływać efekt w postaci zaburzenia dobowego rytmu funkcjonowania zwierząt, prowadząc w konsekwencji do zmiany naturalnych zachowań. Niebieskie światło może utrudniać orientację w terenie i przyczyniać się do zmian naturalnych kierunków migracji. Każdy ekosystem to sieć silnych relacji pomiędzy poszczególnymi gatunkami, a najdrobniejsze zmiany mogą prowadzić do poważnych zaburzeń równowagi. Światło niebieskie jest czynnikiem przyciągającym owady, których przelot w kierunku miast może wpłynąć na migrację lub ograniczenie populacji nietoperzy lub innych drapieżników, które się nimi żywią. Innym przykładem jest zachowanie młodych żółwi, które myliły poświatę nieba z oceanem i przemieszczając się w przeciwnym kierunku obniżały swoje szanse na przeżycie.

Poświata nieba (ang. sky glow) jest kolejnym, negatywnym efektem zanieczyszczenia światłem. Warto zwrócić uwagę, że zależnie od temperatury barwowej źródła, efekt może mieć różny charakter. W przypadku wysokich temperatur barwowych, poświata jest skumulowana bliżej źródeł światła i szybko maleje ze wzrostem odległości (światło niebieskie jest mocniej rozpraszane i szybciej pochłaniane). Nie eliminuje to jednak problemu, gdyż ze względu na adaptację oka do widzenia skotopowego, wrażenie poświaty jest potęgowane i dla zimnego światła może być odczuwalne kilkukrotnie mocniej. W przypadku źródeł o niskich temperaturach barwowych efekt jest odwrotny, co skutkuje dużym zasięgiem poświaty (IDSA 2010, FALCHI i współaut. 2011, LUGINBUHL i współaut. 2014, ASHDOWN 2015).

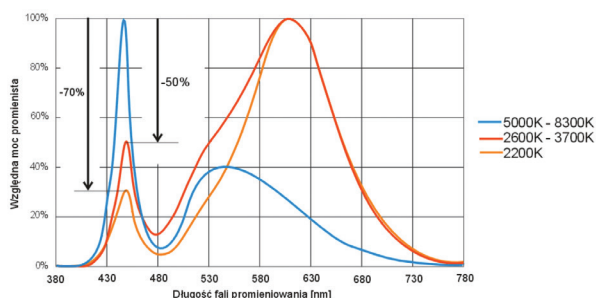
ROZWIĄZANIA – PROPOZYCJE OGRANICZANIA ILOŚCI ŚWIATŁA NIEBIESKIEGO

Rozwój i popularyzacja oświetlenia w technologii LED są nieuniknione. Naturalnym wnioskiem są więc starania mające na celu redukcję mocy promienistej w obrębie światła niebieskiego (przedział widmowy od 430 nm do 480 nm). Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie źródeł LED o niskiej temperaturze barwowej (CCT = 3000K i mniej). Dzięki temu względna moc przypadająca na maksymalną długości fali, tj. ok. 450 nm, może zostać zmniejszona o 50–70% (Ryc. 11).

Przekłada się to wprost na niższą emisję w paśmie 380–480 nm. Na podstawie danych liczbowych dotyczących względnego rozkładu widmowego mocy promienistej (ang. spectral power distribution, SPD), obliczono stosunek mocy w zakresie 380–480 nm, do mocy w całym paśmie promieniowania dla diod Oslon Square produkcji Osram Semiconductors, emitujących promieniowanie o temperaturze barwowej 3000 K oraz 6500 K (Ryc. 12).

W przypadku diody o temperaturze barwowej 6500 K, udział mocy w paśmie 380–480 nm wynosi około 31%. Natomiast w przypadku diody o barwie ciepłej białej (3000 K) udział ten to zaledwie 10%.

Na niekorzyść stosowania diod o niskich temperaturach barwowych przemawia głównie niższa sprawność. W związku z większymi stratami na luminoforze ciepłych diod LED, mamy do czynienia z niższą skutecznością świetlną nawet o około 15% (obliczono na podstawie średnich wartości strumienia świetlnego z kart katalogowych komercyjnie dostępnych diod LED mocy). Ponadto należałoby uwzględnić korekcję związaną z percepcją światła o niższej temperaturze barwowej w widzeniu mezopowym (Ryc. 8). Czynniki

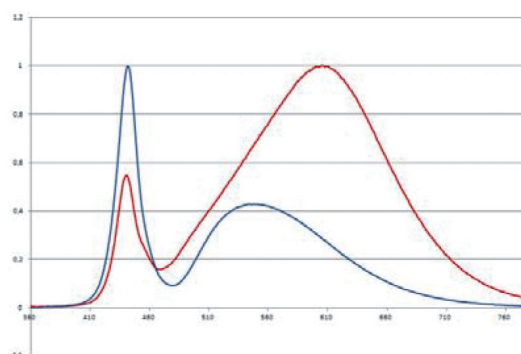


Ryc. 11. Względna redukcja mocy promienistej w obrębie maksimum emisyjnego ~450 nm.

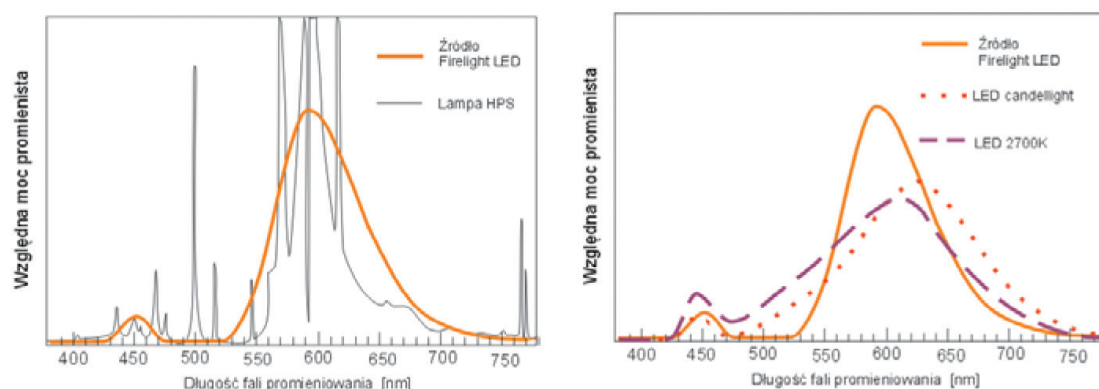
te mogą okazać się kluczowe przy wyborze pomiędzy diodami o barwie ciepłej i zimnej, gdyż obecnie rynek oświetleniowy jest silnie zdominowany dążeniem do podnoszenia skuteczności świetlnej opraw, a troska o redukcję zanieczyszczenia światłem jest raczej wtórna. Tym niemniej obserwowany obecnie szybki rozwój technologii i poprawianie sprawności diod przez każdego z producentów napawają optymizmem i dają podstawy sądzić, że diody o niskich temperaturach barwowych dostarczą wkrótce zadowalających parametrów, których oczekuje rynek (ŚLĘK i GÓRCZEWSKA 2008).

Innym, ciekawym rozwiązaniem jest zastosowanie źródła „Firelight LED” (ZUKAUSKAS i współaut. 2014) opracowanego i przebadanego przez litewskich naukowców. Stworzony przez nich moduł LED wykorzystuje diodę niebieską (ang. royal blue 452 nm) oraz diody bursztynowe pracujące w technologii konwersji światła (ang. phosphor converted amber). W konsekwencji udało się uzyskać rozkład widmowy bardzo zbliżony do tego, prezentowanego przez wysokoprężną lampę sodową SON-T PIA PLUS 70W E E27 1SL. Temperatura barwowa tak skonstruowanego źródła światła jest zbliżona do tej, którą oferują świece, tj. ok. 1850 K (stąd nazwa) (Ryc. 13).

Zespołowi badawczemu udało się udowodnić, że w stosunku do klasycznych diod LED, źródło Fireled oferuje istotną redukcję promieniowania w zakresie fal krótkich ok. 430–450 nm. W efekcie udaje się uzyskać mniejsze zanieczyszczenie otoczenia światłem rozproszonym, co z kolei wprost przekłada się na ograniczenie efektu zanieczyszczenia światłem (biorąc pod uwagę zarówno



Ryc. 12. Rozkład względnej mocy promienistej diody LED o barwie białej ciepłej i zimnej na podstawie charakterystyk SPD (Osram OS).



Ryc. 13. Porównanie charakterystyk spektralnych klastra Fireled z innymi źródłami LED (ZUKAUSKAS i współaut. 2014).

zanieczyszczenie światłem niebieskim w paśmie 380–480 nm, jak również w pozostałym paśmie 480–780 nm. Niższymi wskaźnikami zanieczyszczenia odznacza się niskoprężna lampa sodowa, ale za to źródło Fireled posiada 3 do 5 razy mniejszy współczynnik zanieczyszczenia światłem w paśmie 380–540 nm w stosunku do białych diod LED.

Analiza widma klastra Fireled wykazała, że z uwagi na mniejszą zawartość krótkich fal światła, współczynnik określający skuteczność świetlną w widzeniu skotopowym, w stosunku do skuteczności w widzeniu fotopowym, jest mniej korzystny niż w przypadku źródeł o wysokiej temperaturze barwowej. Z drugiej jednak strony ma on wartość porównywalną do tego, którym odznaczają się wysokoprężne lampy sodowe. Jednak w przypadku widzenia mezopowego, przy górnej granicy luminancji otoczenia 2 cd/m² skuteczność świetlna źródła Fireled wzrasta i jest porównywalna z diodami LED o wysokich temperaturach barwowych.

Parametry określające jakość światła (między innymi wskaźnik oddawania barw CRI oraz wskaźnik zgodności koloru CFI) niestety również są niższe niż w przypadku standardowych białych diod LED. Z drugiej jednak strony, wskaźniki te są lepsze niż dla lamp sodowych (zarówno wysokoprężnych jak i niskoprężnych). Gorsze parametry kolorymetryczne mogą być jednak akceptowalne w obliczu widzenia mezopowego i skotopowego, gdy zdolność postrzegania kolorów i tak jest upośledzona względem widzenia fotopowego.

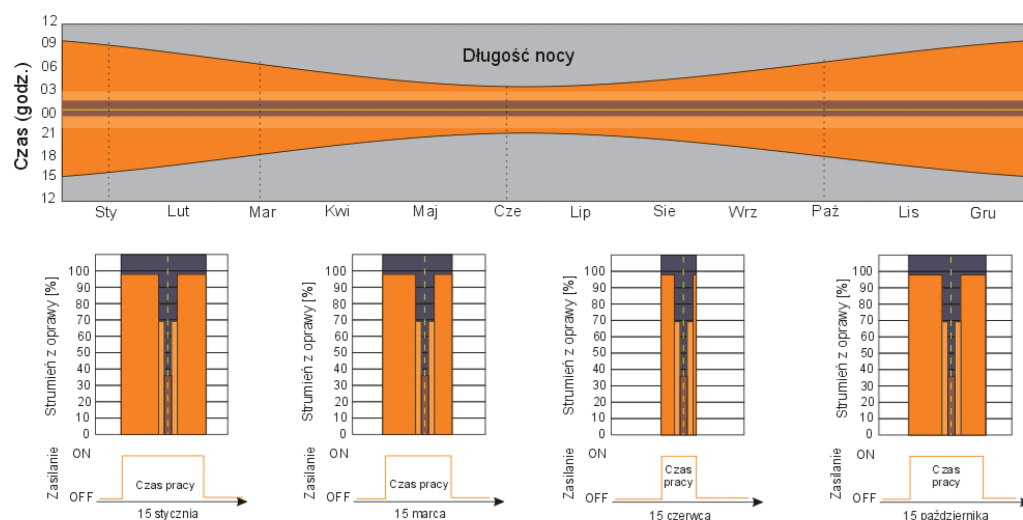
Potwierdzono również inne, dobre właściwości takiego źródła, w stosunku do wysokoprężnych lamp sodowych: między innymi nieznacznie lepszy czas reakcji na bodźce

oraz próg wykrywalności kontrastujących obiektów. Natomiast zdecydowanie lepiej wypadł test sprawdzający odróżnianie odcieni (tzw. Fransworth-Munsell 100-Hue test).

Niestety, podobnie jak w przypadku diod LED o niskich temperaturach barwowych, tak i tutaj czynnikiem ograniczającym szerokie zastosowanie tego rozwiązania może okazać się skuteczność świetlna. Z uwagi na zdecydowanie niższą skalę produkcji diod w barwie royal-blue oraz PC amber, ich koszt jest również dużo wyższy niż białych diod LED. W efekcie cena lumena może okazać się nieatrakcyjna, co dodatkowo utrudni przyjęcie takiego rozwiązania przez rynek.

Jeśli z pewnych względów konieczne jest stosowanie źródeł LED o wysokich temperaturach barwowych (czyli zawierających znaczny komponent światła niebieskiego), efekt zanieczyszczenia światłem można ograniczać poprzez precyzyjne modelowanie bryły fotometrycznej (zestaw indywidualnie dobieranych soczewek) oraz regulację mocy pracujących opraw. Jedną z kluczowych zalet diod LED jest możliwość niemal dowolnego ich ściemniania. Nowoczesne zasilacze i systemy sterowania dają szerokie możliwości kontroli strumienia wyjściowego (nawet indywidualne sterowanie oprawami z wykorzystaniem komunikacji GSM).

Jednym z ciekawszych i tańszych rozwiązań jest w pełni autonomiczny system ograniczania natężenia oświetlenia, który zyskuje na popularności (występuje obecnie w ofercie wielu producentów pod różnymi nazwami: DynaDimmer, AstroDim) (<http://www.osram.com/media/resource/HIRES/339643/3dim-application-guide-gb.pdf>). System ten został zaprojektowany, aby ograniczać zużycie energii, a dzięki temu w



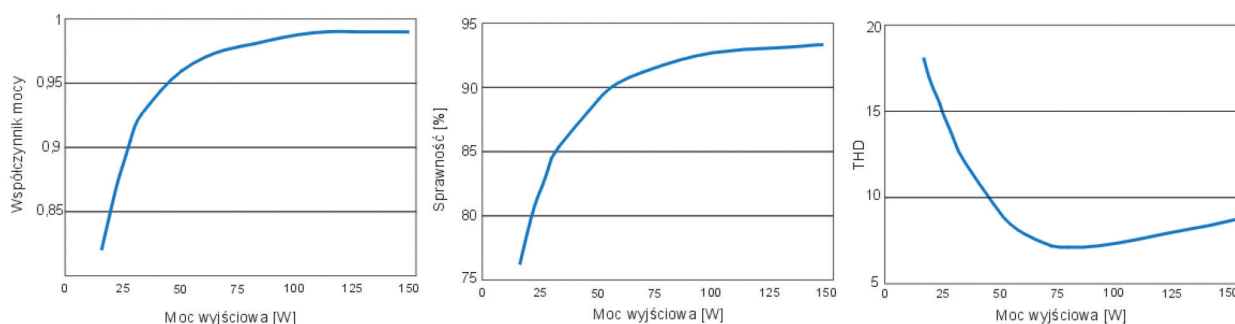
Ryc. 14. Schemat regulacji mocy oprawy w wybranych godzinach w cyklu rocznym (na podstawie karty katalogowej zasilaczy Osram).

sposób pośredni przyczynia się do ograniczenia zanieczyszczenia światłem. Zasilacz wyposażony w tę funkcję obniży prąd wyjściowy do poziomu zadanego przez programistę w określonej porze nocy. Nie wymaga przy tym dodatkowego sygnału do indywidualnej synchronizacji z zegarem astronomicznym, ale sam dostosowuje czas trwania cykli do długości nocy poprzez analizę czasu włączenia i wyłączenia zasilania. Dzięki temu w późnych godzinach nocnych, kiedy mamy do czynienia ze zmniejszonym ruchem ulicznym, możliwe jest obniżenie natężenia oświetlenia bez konieczności angażowania dodatkowej infrastruktury kontrolującej (Ryc. 14).

W zależności od przyjętej metody, ściemnianie może powodować pewne konsekwencje. Wybierając zasilacz z modulacją szerokości impulsu na wyjściu (PWM) można osiągnąć bardzo szeroki zakres liniowej regulacji z bardzo małym krokiem, zależnym od roz-

dzielczości kontrolera sterującego. Metoda ta nie powoduje ponadto zmian współrzędnych chromatycznych, które w pewnym stopniu są zależne od wartości prądu zasilania. Główną wadą jest tutaj jednak migotanie (mniej lub bardziej widoczne, zależne od częstotliwości kluczowania PWM). Przy wysokich częstotliwościach wrażenie migotania ustaje, ale może objawiać się w sposób pośredni jako zjawisko stroboskopowe, które jest potencjalnie niebezpieczne (pozornie mniejsze prędkości obrotowe elementów wirujących). Może być też widoczne poprzez zaburzenia w obrazie rejestrowanym przez kamery monitoringu.

Alternatywną metodą jest ściemnianie stałoprądowe. W tym przypadku ograniczony zostaje zakres regulacji (producenci nie zalecają zasilania diod prądem poniżej pewnej wartości; w przypadku typowych diod mocy 1-3W, minimalna wartość jest na poziomie



Ryc. 15. Charakterystyki współczynnika mocy, sprawności zasilacza oraz zniekształceń harmoniczych w zależności od obciążenia zasilacza (na podstawie karty katalogowej zasilaczy Xitanium).

ok. 200 mA). Ponadto, może dochodzić do pewnych zmian współrzędnych chromatycznych. Liniowa regulacja wiąże się też z większymi stratami w samym zasilaczu, ale daje pewność stabilnego oświetlenia. W obydwu przypadkach, przy małych obciążeniach możemy mieć ponadto do czynienia ze spadkiem sprawności konwersji energii przez

zasilacz, pogorszeniem współczynnika mocy oraz zwiększoną emisją zakłóceń THD generowanych do sieci (Ryc. 15) (http://www.lighting.philips.com/main/prof/lighting-electronics/led-electronic-drivers/xitanium-constant-current-xtreme/913710859002_EU/product).

PODSUMOWANIE

Problem zanieczyszczenia światłem może być zredukowany w znaczny sposób, ale wymaga to pewnych dodatkowych nakładów i kompromisów. Odpowiednio zaprojektowana optyka to możliwość precyzyjnego kierowania światła i ograniczenia promieni biegnących pod małymi kątami względem ziemi oraz wysyłanych w górną półprzestrzeń. Dodatkowo, stosowanie diod o niskich temperaturach barwowych może istotnie ograniczyć efekt zanieczyszczenia światłem, ale odbędzie się to kosztem skuteczności świetlnej (a więc poboru energii). Innym sposobem jest ograniczanie mocy opraw w momentach, kiedy nie jest wymagane pełne natężenie oświetlenia (późne godziny nocne przy zmniejszonym natężeniu ruchu), co z kolei

podnosi straty energetyczne w układach zasilających i może generować podwyższoną ilość zakłóceń.

Właściwie wykorzystane diody LED są bardzo dobrą alternatywą dla konwencjonalnych źródeł światła. Pomimo tego, że nowoczesne technologie mogą stwarzać potencjalne zagrożenia, to jednak dają też szerokie możliwości ograniczania ich skutków. Świadome i odpowiedzialne podejście projektantów i inwestorów w kwestiach oświetleniowych oraz zaakceptowanie pewnych kompromisów, przyniosą nie tylko wydatne korzyści ekonomiczne, ale również pozwolą na ochronę naturalnego „zasobu środowiska” jakim jest czyste, ciemne niebo nocą.

LITERATURA

- ASHDOWN I., 2015. *Color temperature and outdoor*. <http://agi32.com/blog/2015/07/07/color-temperature-and-outdoor-lighting/>
- JIN P., WANG Y.-F., ZHOU Q.-F., ROOYMANS J., YU C.-Y., 2009. *Luminous efficiency of white LED in the mesopic vision state*. Optoelectr. Lett. 5, 265–267.
- FALCHI F., CINZANO P., ELVIDE C. D., KEITH D. M., HAIM A., 2011. *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*. J. Environ. Manag. 92, 2714–2722.
- GRYNCEWICZ W., 2012. *Wpływ barwy światła na poziom energooszczędności w oświetleniu zewnętrznym*. Oświetlenie info. 3, 55–59.
- LUGINBUHL CH. B., BOLEY P. A., DAVIS D. R., 2014. *The impact of light source spectral power distribution on sky glow*. J. Quantit. Spectrosc. Radiat. Trans. 139, 21–26.
- SIVAK M., SCHOETTLE B., MINODA T., FLANNAGAN M. J., 2005. *Blue content of LED headlamps and discomfort glare*. The University of Michigan Transportation Research Inst.
- IDSIA, 2010. *Visibility, environmental and astronomical issues associated with blue-rich white outdoor lighting*. International Dark-Sky Association.
- ŚLĘK B., GÓRCZEWSKA M., 2008. *Analizy i ekspertyzy dotyczące źródeł światła*. Ministerstwo Gospodarki, Departament Energetyki.
- XIAOYAN Z., SHIATA D., ZHANG M., WENTING C., HEYN-DERICKX I., 2013. *Perception study of discomfort glare from LED road lighting*. Light Engine. 21, 61–68.
- ZUKAUSKAS A., VAICEKAUSKAS R., TUZIKAS A., PETRULIUS A., STANIKUNAS R., SVEGZDA A., EIDIKAS P., VITTA P., 2014. *Firelight LED source: toward a balanced approach to the performance of solid-state lighting for outdoor environments*. IEEE Photon. J. 6, 8200316.

PIOTR JAKUBOWSKI

E-mail: piotr.7akubowski@gmail.com

WPŁYW ROZKŁADU WIDMOWEGO MOCY PROMIENISTEJ ULICZNYCH OPRAW OŚWIETLENIOWYCH TYPU LED NA ZANIECZYSZCZANIE ŚWIATŁEM OTOCZENIA

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę propagacji widmowego strumienia świetlnego emitowanego przez uliczne oprawy LED. Diody LED w zależności od technologii wykonania emitują światło białe o różnych temperaturach barwowych, a tym samym o różnorodnej zawartości w ich promieniowaniu światła z zakresu niebieskiego. Jako że istnieje negatywny wpływ światła niebieskiego na organizm ludzki oraz środowisko naturalne należy dążyć do ograniczania efektu zanieczyszczenia otoczenia tego rodzaju światłem. W pracy wskazano, że poprzez stosowanie źródeł LED o niskich temperaturach barwowych lub optymalizowanych klastrów LED oraz redukcję mocy opraw oświetleniowych, w sytuacji, gdy nie istnieją wskazania do zapewniania wysokich poziomów luminancji, możliwa jest reedukacja zanieczyszczenia otoczenia światłem niebieskim. Obecnie kluczowym parametrem przy wyborze opraw drogowych jest ich skuteczność świetlna, dlatego też przeprowadzona została analiza wartości tego parametru w przypadku proponowanych rozwiązań.

PIOTR JAKUBOWSKI

E-mail: piotr.7akubowski@gmail.com

THE INFLUENCE OF THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF THE STREET LIGHTING LED LIGHT SOURCES ON BLUE LIGHT POLLUTION IN THE AREA

Summary

The paper presents analysis of spectral flux distribution by LED street lamps. Depends on applied technology, LEDs can generate white light in wide verity of correlated color temperature (CCT), and different content of blue light in their spectrum. As blue light might have negative influence on human being and natural environment – the article presents methods which help to reduce this kind of light pollution. The paper shows that blue light pollution might be limited by using LEDs with low CCT and optimized LED clusters with relative spectral power distribution (SPD) similar to high pressure sodium lamps. This goal can be also achieved by decreasing lamp power, while high luminance level is not required (i.e. dimming). Nowadays, luminous efficiency is a key parameter which influences users on lamp choice, thus analysis of this parameter is presented for proposed solutions.