

Analiza parametrów promieniowania optycznego kompaktowych lamp wyładowczych HID oraz modułów LED COB używanych do oświetlenia witryn sklepowych

Streszczenie. W artykule zaprezentowana została analiza parametrów promieniowania optycznego emitowanego przez diody LED typu COB oraz kompaktowe lampy wyładowcze HID. Tego rodzaju źródła światła znajdują powszechne zastosowanie w aplikacjach oświetlenia sklepowego (tzw. naświetlacze „spot light”, w związku z czym potencjalnie wielu ludzi przebywa w miejscach ich oddziaływania. Emitowane przez nie promieniowanie optyczne powinno być przedmiotem szczególnej uwagi, gdyż może być odpowiedzialne za deregulację naturalnego zegara biologicznego człowieka.

Abstract. The article presents optical radiations parameters analysis of light emitted by LEDs and HID lamps used for shop illuminations (spot lights). Especially this paper is focus on their possible impact on regulation of natural biological clock of human. Because this effect might have negative influence on health the data presented in this paper are useful from costumer point of view. (Analysis of optical radiation parameters of compact discharge HID lamps and LED COB modules used for illuminating shop windows)

Słowa kluczowe: oświetlenie wnętrz, reflektory punktowe, lampy LED COB, lampy HID

Keywords: interior lighting, spot lamps, LED COB lamps, HID lamps

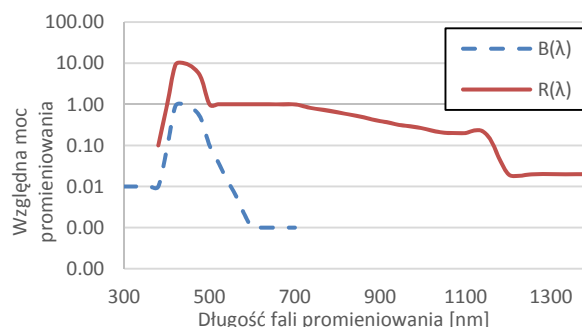
Wstęp

Od czasów Edisona witryny sklepowe są oświetlane przy użyciu elektrycznych źródeł światła. Tego rodzaju oświetlenie ma zachęcać potencjalnych klientów do odwiedzenia sklepu, poprzez przyciągnięcie ich uwagi. Cel ten osiąga się stosując wysokie poziomy jaskrawości oraz odpowiednio dobierając kontrasty oświetleniowe. Współcześnie dąży się do tego, aby źródła światła przy stosunkowo niewysokim koszcie charakteryzowały się bardzo dobrą żywotnością oraz wysoką wartością skuteczności świetlnej i wskaźnika oddawania barw. Tak sprecyzowane wymagania powodują, iż naświetlacze z wyładowczymi źródłami metalohalogenkowymi (HID - high intensity discharge lamp) cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem w aplikacjach oświetlenia sklepowego (tzw. „spot lamps”). W przypadku najnowszej generacji kompaktowych lamp metalohalogenkowych z jarznikiem ceramicznym udało się uzyskać bardzo wysoki poziom ogólnego wskaźnika oddawania barw $R_a > 90$ oraz skuteczność świetlną na poziomie około 120 lm/W w przypadku lamp o najwyższej mocy. Jednakże w coraz większej liczbie współczesnych opraw oświetleniowych diody LED zaczynają wypierać z użycia lampy wyładowcze. Aby w pełni ocenić korzyści i wady wynikające ze stosowania obydwu technologii, należy dokonać analizy porównawczej nie tylko ich parametrów świetlnych, ale również odpowiedzieć na pytanie czy spełniają one inne wymagania normatywne i zalecenia dotyczące lamp i systemów lampowych. Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej, zawartymi w dokumencie CIE TN003-2015 [1], w celu pełnego scharakteryzowania parametrów lamp, oprócz wielkości fotometrycznych i kolorymetrycznych, należy wyznaczać też wielkości charakteryzujące ich oddziaływanie fotobiologiczne. Wymagania odnośnie bezpieczeństwa fotobiologicznego źródeł światła i opraw oświetleniowych opisują ponadto zalecenia zawarte w dokumencie IEC/EN 62471 znanym w Polsce jako norma PN-EN 62471 „Bezpieczeństwo fotobiologiczne lamp i systemów lampowych”.

Wizualne, termiczne, fototoksyczne i cyrkadialne efekty oddziaływania światła na organizm człowieka

Bez względu na rodzaj źródła światła, emitowanie przez nie promieniowanie może mieć bezpośredni i często niemal natychmiastowy wpływ na organizm człowieka [2]. Promieniowanie optyczne o długościach fali od 380 nm do

780 nm powoduje u ludzi pobudzenie odpowiedzialnych za widzenie receptorów oka (czopki i pręciki) oraz generuje efekty poza wizualne, które w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do degradacji ekspozowanych tkanek. Efekty biologiczne promieniowania zależne są od jego rozkładu widmowego, pochłoniętej jego ilości, czasu i częstotliwości ekspozycji oraz rodzaju ekspozowanej tkanki. Standard IEC 62741 określa dwa sposoby uszkodzeń tkanek - termiczne i fotochemiczne. Uszkodzenie termiczne, w wyniku którego dochodzi do przegrzania i obumierania komórek, dotyczy zakresu widmowego od 380 nm do 1400 nm (rys. 1) i może powstać w czasie bardzo krótkich ekspozycji. Ryzyko zajścia nieodwracalnych uszkodzeń na drodze fotochemicznej w komórkach siatkówki ludzkiego oka (prowadzących nawet do ślepoty) zachodzi pod wpływem padającego na siatkówkę promieniowania z zakresu długości fali pomiędzy 400 nm a 490 nm. Zapalenie siatkówki może być natomiast spowodowane światłem o długościach fali odpowiadającym barwom niebieskim (tzw. *blue light hazard*). Ponadto luminancja jest również czynnikiem o dużym znaczeniu dla rozwoju uszkodzeń siatkówki. Zagrożenie nadmiernymi jej wartościami jest rozpatrywane w zakresie długości fali (300÷700) nm (rys. 1).



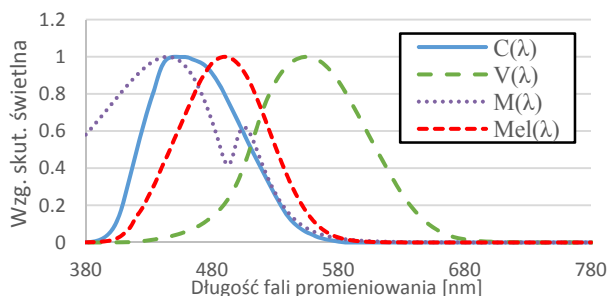
Rys. 1. Funkcje skuteczności widmowej, na podstawie których określa się stopień ryzyka związany z promieniowaniem elektromagnetycznym, gdzie $R(\lambda)$ – krzywa dotycząca uszkodzenia termicznego siatkówki oka, $B(\lambda)$ – krzywa dotycząca uszkodzenia fotochemicznego siatkówki oka

Obecnie zalecenia IEC 62741 określają 4 grupy oceny ryzyka 0, 1, 2 i 3 (od 0= brak ryzyka do 3 = wysokie ryzyko) do których może zostać zaklasyfikowane źródło światła [2].

Klasyfikacja ta opiera się na maksymalnych dopuszczalnych ekspozycjach (MDE) przyjmowanych dla

zagrożenia zdrowia człowieka promieniowaniem optycznym oraz uwzględnia poziom promieniowania emitowanego przez dane urządzenie (źródło lub system lampowy), zakres widmowy promieniowania i dostęp człowieka.

Współcześnie przedmiotem intensywnych badań naukowych jest wpływ przewlekłej ekspozycji siatkówki oka na małe dawki światła niebieskiego [3]. Promieniowanie optyczne z zakresu widmowego od 380 nm do 600 nm odpowiada za efekty cyrkadialne. W roku 2001 dowiedziono, że poza czopkami i pręcikami w ludzkim oku występują również komórki zwojowe RGC (retina ganglion cells). Komórki te są połączone z podwzgórzem, a ich stymulacja bodźcami światła niebieskiego przyczynia się do ograniczania wydzielania melatoniny, która to pełni kluczową rolę w regulacji cyklu okołodobowego (cyrkadianego) trwającego około 24 godziny [4,5,6]. Na rysunku 2 przedstawiono względną charakterystykę widmowej skuteczności komórek ipRGC (krzywa $C(\lambda)$). Maksimum tej funkcji przypada dla około 460 nm tj. w obszarze niskiej czułości oka dla widzenia fotonowego (tj. krzywej $V(\lambda)$). Czyli źródła światła odznaczające się podobną luminancją i strumieniem świetlnym, ale różniące się rozkładem widmowym mocy promienistej, mogą w odmiennym stopniu oddziaływać na komórki ipRGC, a tym samym na cykl cyrkadialny człowieka.



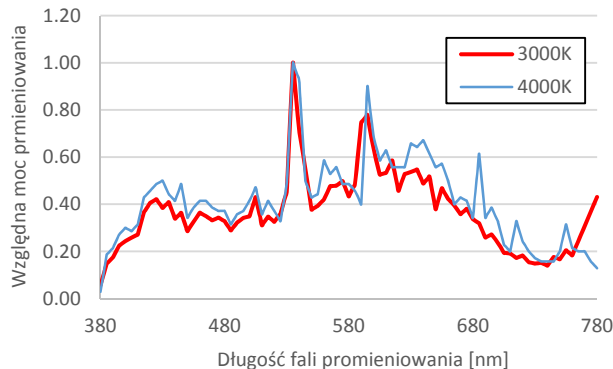
Rys. 2 Względna charakterystyka skuteczności świetlnej oka w widzeniu fotonowym $V(\lambda)$, komórek ipRGC $C(\lambda)$, tłumienia wydzielania melatoniny $M(\lambda)$ oraz czułości melanopsyny $S_{mel}(\lambda)$

W związku z tym, promieniowanie optyczne emitowane przez źródła światła białego charakteryzujące się relatywnie dużą zawartością procentową promieniowania niebieskiego, powinny być przedmiotem szczegółowej analizy. Do tego rodzaju źródeł należą zarówno lampy HID jak i LED. Zarówno niedobór jak i nadmiar promieniowania z zakresu dł. fal światła niebieskiego może prowadzić do zaburzeń w cyklu okołodobowym, co z kolei może przekładać się na przemęczenie, złe samopoczucie a nawet prowadzić do chorób przewlekłych [4,5,6]. Określenie potencjalnych wielkości tego niepożądanego efektu jest bardzo istotne z punktu widzenia ludzi przebywających w zasięgu światła tego rodzaju lamp.

Charakterystyka lamp wyładowczych HID

Emisja promieniowania w zakresie widzialnym w lampach HID jest uzyskiwana dzięki wyładowaniu łukowemu zachodzącemu, w oparach specjalnie skomponowanej mieszaniny gazów umieszczonych, w jarzniku. Odpowiedna konstrukcja oraz dobór związków chemicznych wewnątrz jarznika pozwala na wytwarzanie lamp emitujących światło białe o różnych rozkładach widmowych mocy promienistej, czyli o różnych temperaturach barwowych najbliższych oraz wskaźnikach oddawania barw. Przykładowe rozkłady mocy promienistej takich lamp zostały przedstawione na rysunku 3. Lampy te charakteryzują się znaczną procentową zawartością światła z zakresu odpowiadającego długościom fali zakresu niebieskiego w generowanym przez nie promieniowaniu [7],

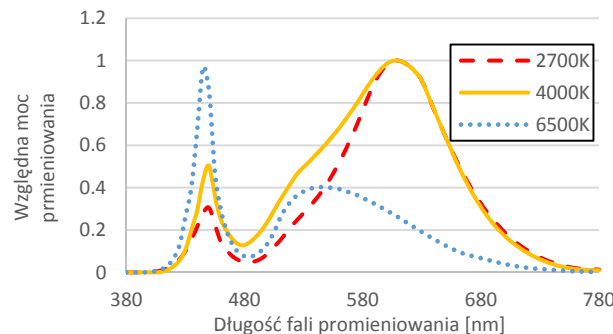
co powoduje że ich promieniowanie może znacząco wpływać na proces hamowania wydzielania melatoniny u człowieka (krzywa $M(\lambda)$ na rysunku 2).



Rys. 3. Względny rozkład widmowy mocy promienistej metalohalogenkowych lamp wyładowczych HID w zależności od temperatury barwowej

Charakterystyka lamp typu LED wykonanych w technologii COB

Funkcjonowanie większości białych diod LED polega na wykorzystaniu zjawiska konwersji i mieszaniu światła. W wyniku rekombinacji promienistej w półprzewodnikowym złączu $p-n$ wytwarzane jest światło niebieskie z zakresu długości fali około (440÷460) nm, które pobudza luminofor generujący promieniowanie barwy żółtej. Powstałe w wyniku współdziałania niebieskich i żółtych długości fali promieniowanie charakteryzuje się szerokim zakresem widmowym (rys. 4). Po dotarciu do ludzkiego oka wywołuje w nim ono wrażenie światła barwy białej.



Rys. 4. Charakterystyki względnego rozkładu mocy promienistej białych diod LED w zależności od temperatury barwowej

Pomimo tego, że luminancja pojedynczych diod LED przyjmuje wartości rzędu nawet milionów cd/m^2 , czyli jej wartość jest bardzo wysoka [8], to ich strumień świetlny jest ograniczony do wartości kilkudziesięciu/kilkuset lumenów z pojedynczej diody. Z tego względu w typowych aplikacjach oświetleniowych konieczne jest wykorzystanie większej liczby niezależnych diod lub stosowanie tzw. modułów COB (Chip On Board), które w jednej obudowie integrują wiele struktur LED. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zastosowania pojedynczego układu optycznego (soczewka, reflektor lub rozwiązania hybrydowego). Odpowiedni dobór własności luminoforu oraz proporcji światła niebieskiego i żółtego pozwalają na wytwarzanie diod o różnych parametrach (temperatura barwowa najbliższa, wskaźnik oddawania barw). W tego rodzaju źródłach światła, dzięki właściwie ukształtowanej charakterystyce widmowej, możliwe jest wzmocnienie percepcji nasycenia barw lub uzyskanie wrażenia intensywniejszej bieli. Dzięki temu można tworzyć oświetlenie specjalizowane do konkretnych zastosowań.

Tendencja ta jest szczególnie widoczna w przypadku profesjonalnych źródeł używanych do oświetlenia sklepowego. Oferowane są specjalistyczne moduły LED COB dostosowane do oświetlenia: mięsa czerwonego lub białego, do ryb, warzyw, pieczywa a także tekstyliów kolorowych oraz białych.

Przykładowe charakterystyki rozkładu mocy promienistej białych diod LED przedstawiono na rysunku 4. Uwidacznia się zależność, że im wyższa temperatura barwowa najbliższa tym większy jest w całkowitym strumieniu świetlnym emitowanym przez to źródło, procentowy udział składowych mocy promienistej z zakresu światła niebieskiego.

Parametry opisujące zawartość promieniowania niebieskiego w danym rozkładzie widmowym

Jedną z najprostszych miar określania zawartości promieniowania niebieskiego w dowolnym rozkładzie widmowym jest procentowy udział mocy promienistej z dowolnego zakresu (na przykład od 380 nm do 600 nm) do całej mocy promienistej emitowanej przez dane źródło w zakresie widzialnym:

(1)

$$Z_{nieb} = \frac{\int_{380nm}^{600nm} S(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) d\lambda} 100\%$$

gdzie: $S(\lambda)$ oznacza względny rozkład mocy promienistej rozpatrywanego źródła światła.

Taki sposób oceny zawartości promieniowania niebieskiego nie niesie jednak informacji o tym, jak emitowane światło jest odbierane i transformowane przez organizm człowieka. W związku z faktem, iż światło niebieskie wywołuje również efekty pozawzrokowe – jednym z kryteriów oceny jego zawartości może być współczynnik oddziaływania cyrkadijalnego, określający wpływ światła na rytm dobowy człowieka [9]. Współczynnik ten definiowany jest równaniem 2:

(2)

$$a_{cv} = \frac{\int_{380nm}^{780nm} C(\lambda)S(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} V(\lambda)S(\lambda) d\lambda}$$

gdzie: $C(\lambda)$ - skuteczność widmowa komórek ipRGC, $V(\lambda)$ -fotopowa widmowa skuteczność świetlna, $S(\lambda)$ – względny rozkład mocy promienistej rozpatrywanego źródła światła.

Kolejną metodą oceny zawartości światła niebieskiego w kontekście oddziaływania pozawzrokowego może być wskaźnik tłumienia wydzielania melatoniny (MSI):

(3)

$$MSI = \frac{\int_{380}^{730} S(\lambda)M(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{730} S_{D65}M(\lambda)d\lambda}$$

gdzie: $M(\lambda)$ - funkcja skuteczności widmowej hamowania wydzielania melatoniny (rys. 2), $S_{D65}(\lambda)$ – rozkład widmowy źródła odniesienia (iluminant D65), $S(\lambda)$ – względny rozkład mocy promienistej rozpatrywanego źródła światła.

Przytoczone wskaźniki odnoszą się do wtórych efektów oddziaływania światła na organizm człowieka (np. wpływ na wydzielanie melatoniny). W związku z tym, CIE w swym dokumencie (rekomendacji) [1] zaleca uwzględnianie wielkości najbardziej pierwotnych. Rekomendowane jest, aby obliczenia i pomiary promieniowania czynnego cyrkadialnie były odnoszone do krzywej czułości barwnika komórek ipRGC – melanopsyny

(rys. 2). Uwzględniając tę skuteczność widmową, można obliczyć strumień promieniowania zdolnego pobudzić ten barwnik (*melanopic flux*):

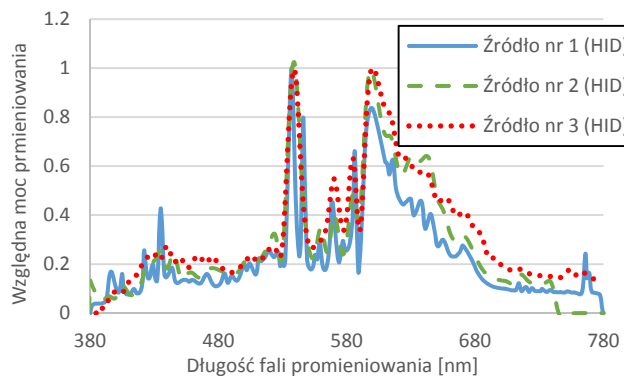
(4)

$$\Phi_{mel} = K \int_{380}^{780} S_{mel}(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

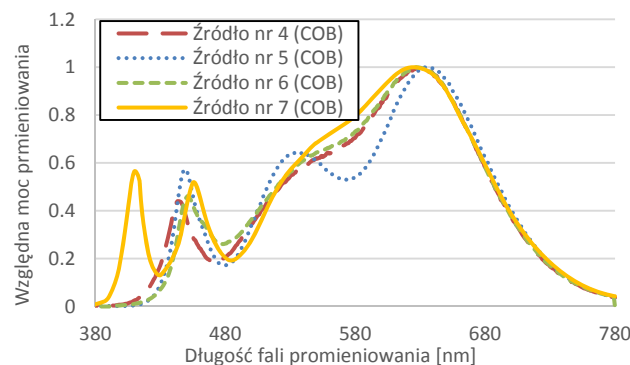
gdzie: $S_{mel}(\lambda)$ oznacza względną skuteczność widmową melanopsyny, $S(\lambda)$ oznacza względny rozkład mocy promienistej rozpatrywanego źródła, zaś stała K jest równoważnikiem skuteczności oddziaływania promieniowania (*non-visual spectral efficacy constant*).

Zestawienie parametrów świetlnych wybranych LED COB i lamp HID stosowanych w oświetleniu witryn

Analizie porównawczej poddano względne rozkłady widmowe czterech modułów LED COB dedykowanych do zastosowań w aplikacjach oświetleniowych typu „spot” oraz trzech kompaktowych lamp wyładowczych HID. Dostępne parametry nominalne oraz wskaźniki oddawania barw obliczone na podstawie rozkładów widmowych (rys. 5 oraz 6) zostały zestawione w tabeli 1. Analiza została przeprowadzona w kolejności uszeregowania źródeł w tabeli 1.



Rys. 5. Rozkłady mocy promienistej analizowanych lamp HID



Rys. 6. Rozkłady mocy promienistej analizowanych modułów LED

W związku z faktem, iż temperatura barwowa najbliższa jest związana z zawartością światła niebieskiego – analizę porównawczą przeprowadzono pomiędzy źródłami o zbliżonych temperaturach barwowych. Rozpatrywano moduły COB oraz lampy HID charakteryzujące się temperaturą barwową najbliższą wynoszącą około 3000K oraz ogólnym wskaźnikiem oddawania barw R_a wynoszącym minimum 90, gdyż są to jedne z najczęściej oczekiwanych parametrów w aplikacjach typu „spot”. Takie porównywanie uzasadnione jest również tym, że w danej aplikacji oświetleniowej

zarówno temperatura barwowa najbliższa jak i wskaźnik oddawania barw są parametrami które nie powinny być zmieniane. Ponadto, aby porównanie było miarodajne charakterystyki w poszczególnych grupach zostały znormalizowane, tak aby można było analizować jednakowy strumień świetlny emitowany przez określone źródło światła niezależnie od technologii jego wykonania.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych analizowanych źródeł światła

Nr	typ	Oznaczenie	T_b	η	Ra	Trwałość L70
	[-]	[-]	[K]	[lm/W]	[-]	[tys. godz.]
1	HID	CDM-T Evolution 35W/930 G12	298 4	110	91	25
2	HID	CDM-T Elite 35W/930 G12	295 3	98	91	20
3	HID	HCI-T Shop	293 8	79	92	15
4	LED COB	GW KAHLB1.CM	294 0	102	95	50*
5	LED COB	GW KAHLB2.DM	324 0	94	89	50*
6	LED COB	GW KAAMB3.CM	302 3	95	96	50*
7	LED COB	L2C5-30901208E15C0	298 8	97	91	50*

* szacunkowa trwałość określana jako B50/L70 dla nominalnych warunków pracy, może ulegać dużym zmianom w zależności od prądu zasilania i temperatury pracy modułu COB

Wnioski

Na podstawie rozkładów mocy promienistej oraz uprzednio zdefiniowanych zależności obliczono i przeanalizowano wskaźniki charakteryzujące zawartość światła niebieskiego rozpatrywanych źródeł światła (tabela 2).

Tabela 2. Parametry wybranych do analizy źródeł światła

Nr	lampa	Oznaczenie	Z_{nieb}	MSI	Φ_{mel}	a_{cv}
1	HID	CDM-T Evolution 35W/930 G12	16,88	0,33	30,2	0,40
2	HID	CDM-T Elite 35W/930 G12	16,04	0,31	29,8	0,39
3	HID	HCI-T Shop	15,60	0,32	30,1	0,41
4	LED COB	GW KAHLB1.CM	12,21	0,28	30,2	0,41
5	LED COB	GW KAHLB2.DM	12,51	0,31	34,6	0,44
6	LED COB	GW KAAMB3.CM	12,28	0,27	32	0,40
7	LED COB	L2C5-30901208E15C0	16,45	0,34	29,7	0,40

Zdecydowanie największy udział wagowy promieniowania niebieskiego (Z_{nieb}) w zakresie od 380 nm do 500 nm wykazują poddane analizie źródła HID. Lampa numer 1 generuje blisko 40% więcej mocy promienistej niż moduł LED COB o numerze 4. Znajduje to też odzwierciedlenie we wskaźniku MSI, który jest wyższy dla lampy numer 1. Nie znajduje to natomiast odzwierciedlenia w wartości względnego strumienia pobudzającego melanopsynę (wartość jest jednakowa dla źródła 1 i 4).

W niemal wszystkich analizowanych źródłach światła wskaźnik oddziaływania cyrkadiannego (a_{cv}) jest na podobnym poziomie, tj. około 0,4. Wyjątkiem jest moduł COB o numerze 5. W tym przypadku mamy do czynienia z wartością większą o około 10% od pozostałych.

Moduł COB oznaczony numerem 7 wyróżnia się na tle pozostałych modułów zdecydowanie największym udziałem wagowym mocy promienistej w zakresie dł. fali od 380 nm do 500 nm. Wynika to z konstrukcji tego źródła, gdyż zawiera ono dodatkowe diody LED emitujące promieniowanie z maksimum przypadającym na około 410 nm. Celem producenta było w tym przypadku spotęgowanie percepcji bieli oświetlanych przedmiotów. Z drugiej zaś strony – wpływ na zakłócenie cyklu cyrkadiannego jest podobny jak w przypadku innych analizowanych źródeł.

Zagadnienie wpływu światła na organizm ludzki jest złożony i ściśle związany z rozkładem widmowym światła emitowanego przez dany produkt. Szczegółowa analiza pokazuje, iż trudna jest jednoznaczna ocena ilościowej zawartości światła niebieskiego, gdyż zależy ona ściśle od przyjętych kryteriów. Większy udział wagowy promieniowania niebieskiego nie musi oznaczać większego wpływu na organizm i odwrotnie.

Wyniki analizy pokazują, że moduły COB mogą być atrakcyjną alternatywą dla źródeł wyładowczych nie tylko pod kątem wyższej trwałości lub korzystniejszej skuteczności świetlnej (tabela 1), ale mogą również ograniczać w pewnym stopniu pozawzrokowe oddziaływanie światła na organizm ludzki. Nie jest to jednak zasadą i każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie, szczególnie jeśli mowa jest o wyższych temperaturach barwowych, gdyż wówczas omawiane parametry mogą ulec pogorszeniu.

Praca została wykonana w Politechnice Białostockiej w ramach działalności statutowej Wydziału Elektrycznego S/WE/4/13

Autorzy: dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d, E-mail: i.fryc@pb.edu.pl; mgr inż. Piotr Jakubowski, członek PKOŚ SEP, E-mail: piotr.jakubowski@gmail.com; dr Katarzyna Kołacz, Instytut Optyki Stosowanej imienia prof. Maksymiliana Pluty, ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, E-mail: kkolacz@inos.pl

LITERATURA

- [1] CIE TN 003:2015, Report on the first International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013
- [2] Stich A., Teich W., Rafael Ch.: Details on photobiological safety of LED light sources. dok. elektr.: www.osram-os.com, 2012.
- [3] Novotny P., Schwarz M.J., Kohls N., Plischke H.: Impact of the solid angle of light sources upon the suppression of melatonin in adults – a feasibility study, Lebensqualität im Wandel von Demografie und Technik - 6. Deutscher AAL-Kongress mit Ausstellung, Berlin 2013
- [4] Lahti T.: Circadian rhythm disruptions and health. Publications of the National Public Health Institute Helsinki. Finland 2008.
- [5] Rea M. S.: Light – much more than vision, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Troy. NY. USA, 2015
- [6] Falchi F., Pierantonio C., David M.K., Haima A.: Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. J. Environ. Manag. 92, 2001, str. 14-22.
- [7] Jakubowski P.: Wpływ rozkładu widmowego mocy promienistej ulicznych opraw oświetleniowych typu LED na zanieczyszczenie światłem otoczenia. Kosmos. Tom 64. Numer 4. 2015, str. 643-653.
- [8] Czyżewski D.: Investigation of COB LED luminance distribution, 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries Lumen V4, 2016
- [9] Wandachowicz K. Obliczanie rozkładów cyrkadiannych wielkości promienistych we wnętrzach Prace Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej. Politechnika Poznańska. Zeszyt 256, 2015, str. 101-111