

Nowe zalecenia dotyczące oceny zagrożenia światłem niebieskim emitowanym przez lampy i oprawy LED

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych międzynarodowych dokumentów omawiających kwestię ryzyka fotobiologicznego jest norma PN-EN 62471. Określa ona zasady oceny zagrożeń i bezpieczeństwa fotobiologicznego sztucznych i naturalnych źródeł promieniowania optycznego. Odnosi się do wszelkiego rodzaju źródeł emitujących promieniowanie optyczne w bardzo różnym zakresie długości fali – w nadfiolecie, w zakresie widzialnym i w dalekiej podczerwieni.

Przebywanie w pobliżu źródła emitującego, w zależności od jego rodzaju, może prowadzić do obrażeń ciała, a nawet poważnych chorób. U osób narażonych na promieniowanie nadfioletowe, widzialne lub podczerwone, mogą wystąpić uszkodzenia tkanek biologicznych oczu i skóry. Częstym skutkiem promieniowania nadfioletowego jest zapalenie spojówki i rogówki oraz rumień skóry. Długotrwałe napromienienie UV może powodować uszkodzenia oczu i skóry, takie jak zaćma, starzenie się skóry i rak skóry.

Również u osób wystawionych na intensywne działanie promieniowania widzialnego lub podczerwieni mogą pojawić się zmiany. Promieniowanie widzialne może spowodować uszkodzenie siatkówki oka wskutek działania mechanizmów termicznych lub fotochemicznych. Nawet krótkotrwałe napromienianie podczerwienią, o wysokim natężeniu napromienienia, może uszkodzić zewnętrzną warstwę oczu (rogówki), a w przypadku skóry doprowadzić do przedwczesnego jej zestarzenia.

Dlatego zakres pomiarowy narzucony przez normę jest tak szeroki i obejmuje 200 – 3000nm. To sprawia, że ocena zagrożeń fotobiologicznych staje się złożonym procesem metrologicznym i wymaga posiadania specjalistycznej wywzorcowanej aparatury pomiarowej i wysokich kompetencji technicznych personelu laboratorium. Sprzęt pomiarowy, stosowany do oceny zagrożeń, powinien charakteryzować się wysoką rozdzielczością oraz być odpowiednio wywzorcowany.

2. Ocena zagrożenia stwarzanego przez lampy i oprawy LED.

Lampy i oprawy oświetleniowe LED stosowane w oświetleniu ogólnym i zastosowaniach przemysłowych emitują głównie promieniowanie optyczne z obszaru widzialnego. Zatem w odróżnieniu od lamp innych rodzajów, lampy i oprawy oświetleniowe LED stwarzają głównie zagrożenie fotobiologiczne światłem niebieskim.

Ocena bezpieczeństwa fotobiologicznego źródeł światła i opraw oświetleniowych emitujących światło niebieskie przedstawiona w normie PN-EN 62471:2010 [1] i szeroko opisana w publikacji J. Pietrzykowskiego [2] dotyczy lamp i opraw:

- o działaniu ciągłym lub impulsowych,
- dużych i małych, wg klasyfikacji podanej w powyższej normie,
- przeznaczonych do zastosowań w oświetleniu ogólnym i zastosowań przemysłowych,
- o jednorodnym lub niejednorodnym rozkładzie przestrzennym natężenia napromienienia.

Oceny zagrożenia światłem niebieskim dokonuje się przez wyznaczenie, albo wartości skutecznej natężenia napromienienia światła niebieskiego E_B , albo wartości skutecznej luminancji energetycznej światła niebieskiego L_B w zależności od rozmiaru źródła, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Zagrożenie siatkówki oka światłem niebieskim

Nazwa zagrożenia	Wielkość mierzona	Zależność	Zakres widmowy [nm]
Zagrożenie oka światłem niebieskim – małe źródło o rozmiarze kątowym $\alpha < 0,011$ rad	Natężenie napromienienia światła niebieskiego E_B [$W \cdot m^{-2}$]	$E_B = \int E_\lambda(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	300 - 700
Zagrożenie oka światłem niebieskim źródło o rozmiarze kątowym $\alpha \geq 0,011$ rad	Luminancja energetyczna światła niebieskiego L_B [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	$L_B = \int L_\lambda(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	300 - 700

Do pomiarów natężenia napromienienia światła niebieskiego E_B [$W \cdot m^{-2}$] w zakresie 300 – 700 może być zastosowany wysokiej klasy spektrometr wyposażony w głowicę pomiarową z odpowiednio dobraną korekcją kątową. Rys. 1 przedstawia spektrometr GL SPECTIS 5.0 UV VIS pracujący w zakresie 200 – 800nm. Do wzorcowania spektrometru stosowane są wzorce spektrometryczne: deuterowa lampa wyładowcza do obszaru UV i wolframowo-halogenowa do nadfioletu UVA, obszaru widzialnego i obszaru bliskiej podczerwieni. Taki sprzęt pomiarowy jest stosowany przez Centralny Instytut Ochrony Pracy w Warszawie do oceny zagrożenia fotobiologicznego.



Rys. 1 Wysokiej klasy spektrometr GL SPECTIS 5.0 UV VIS w zakresie 200 – 800nm wyposażony w głowicę do pomiarów natężenia napromienienia.

Natomiast do pomiaru luminancji energetycznej światła niebieskiego L_B [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$] w zakresie 300 – 700nm może być zastosowana dodatkowa przystawka pomiarowa - teleskop połączony ze spektrometrem za pomocą światłowodu [Rys.2.]



Rys. 2 Teleskop – przystawka do pomiaru luminancji energetycznej podłączana do spektrometru za pomocą światłowodu

3. Raport techniczny IEC TR 62778:2014

3.1 Informacje ogólne

Normę PN-EN 62471 uzupełniono raportem technicznym IEC TR 62778:2014 [3] zawierającym niezwykle ważne wyjaśnienia i wytyczne dotyczące oceny zagrożenia światłem niebieskim emitowanym przez produkty oświetleniowe, które emitują głównie promieniowanie optyczne w obszarze widzialnym. Stosując obliczenia optyczne i spektralne, w raporcie pokazano, że pomiary bezpieczeństwa fotobiologicznego opisane w normie IEC 62471 informują nas o produkcie, a jeżeli produkt ten przeznaczony jest do użycia jako składnik produktu oświetleniowego bardziej złożonego, jak ta informacja może zostać przeniesiona od produktu będącego komponentem do produktu złożonego.

Raporty techniczne IEC w wielu krajach, w tym także w Polsce, nie są wprowadzane do zbioru norm, co skutkuje brakiem odpowiednich dokumentów normatywnych. Na szczęście dana sytuacja wkrótce ulegnie poprawie, ponieważ Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC) postanowiła zastąpić wspomniany Raport Techniczny międzynarodową normą. Pierwszy projekt danej normy już został opublikowany [4].

3.2 Nowe terminy i definicje

Jak to stwierdzono powyżej wiele źródeł światła stosowanych do celów ogólnooświetleniowych emituje głównie promieniowanie widzialne. Źródła te w mniejszym lub większym stopniu stwarzają zagrożenie fotobiologiczne światłem niebieskim.

Z uwagi na pokrywanie się zakresów widmowych promieniowania widzialnego i funkcji skuteczności widmowej zagrożenia światłem niebieskim można znaleźć zależności wiążące wielkości fotometryczne i kolorymetryczne z wielkościami skutecznego zagrożenia światłem niebieskim $B(\lambda)$, co daje dodatkową bogatą informację o lampie lub oprawie

oświetleniowej (zwłaszcza o lampach i oprawach oświetleniowych opartych na źródłach LED o świetle białym).

W Raporcie wprowadzono kilka nowych terminów fizycznych wraz z definicjami. Terminy te są wykorzystywane przy ocenie zagrożenia światłem niebieskim. Do terminów tych zalicza się:

- a) skuteczność zagrożenia światłem niebieskim promieniowania widzialnego (ang. *blue light hazard efficacy of luminous radiation*) $K_{B,v}$

Definicja: Stosunek wielkości skutecznej zagrożenia światłem niebieskim (np. E_B lub L_B) do odpowiedniej wielkości fotometrycznej

$$K_{B,v} = \frac{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int E_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{E_B}{E_v} \quad [\text{W} \cdot \text{lm}^{-1}]$$

lub zależność równoważna

$$K_{B,v} = \frac{\int L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int L_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{L_B}{L_v} \quad [\text{W} \cdot \text{lm}^{-1}]$$

gdzie: $E_{\lambda}(\lambda)$ – widmowe natężenie napromienienia,
 $L_{\lambda}(\lambda)$ – widmowa luminancja energetyczna,
 $B(\lambda)$ – funkcja skuteczności widmowej względnej zagrożenia światłem niebieskim,
 $V(\lambda)$ – funkcja skuteczności widmowej świetlnej przy widzeniu fotopowym,
 K_m – 683 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
 E_B – natężenie napromienienia światła niebieskiego,
 E_v – natężenie oświetlenia,
 L_B – luminancja energetyczna światła niebieskiego,
 L_v – luminancja świetlna.

- b) skuteczność zagrożenia światłem niebieskim promieniowania optycznego (ang. *blue light hazard efficacy of radiation*) η_B

Definicja: Stosunek wielkości skutecznej zagrożenia światłem niebieskim (np. E_B lub L_B) do odpowiedniej wielkości promienistej.

$$\eta_B = \frac{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{E_B}{E_e}$$

lub zależność równoważna

$$\eta_B = \frac{\int L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{\int L_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{L_B}{L_e}$$

gdzie: E_e – natężenie napromienienia,
 L_e – luminancja energetyczna.

c) Natężenie oświetlenia progowe (ang. *threshold illuminance*) E_{thr}

Definicja: Wartość progowa natężenia oświetlenia poniżej której źródło światła nie może nigdy osiągnąć czasu ekspozycji $t_{max} < 100$ s, bez względu na wartość L_B źródła światła.

d) Odległość progowa (ang. *threshold distance*) d_{thr}

Definicja: Odległość od źródła światła, przy której natężenie oświetlenia wytwarzane przez to źródło światła jest równa wartości natężenia oświetlenia progowego E_{thr} tego źródła światła.

4. Metody szacowania i pomiaru zagrożeń światłem niebieskim

4.1 Przegląd metod

Ocena zagrożenia fotobiologicznego światłem niebieskim na ogół wymaga wykonania dość pracochłonnych pomiarów, jednakże istniejące korelacje pomiędzy wielkościami fotometrycznymi i kolorymetrycznymi a wielkościami skutecznymi zagrożenia światłem niebieskim, pozwalają w pewnych przypadkach na znaczne uproszczenie oceny. Wynik oceny polega na stwierdzeniu przynależności do grupy ryzyka RG0 lub RG1, albo jeżeli źródło lub oprawa oświetleniowa klasyfikuje się do grupy ryzyka RG2 na wyznaczeniu natężenia oświetlenia progowego E_{thr} .

Obecnie stosowane są następujące metody oceny zagrożenia światłem niebieskim:

- ocena oparta na wykonanych pomiarach wielkości fotometrycznych i kolorymetrycznych,
- ocena oparta na pomiarach wielkości widmowych i luminancji,
- ocena oparta tylko na pomiarach wielkości widmowych i odpowiednich obliczeniach.

4.2 Ocena oparta na pomiarach wielkości fotometrycznych i kolorymetrycznych

Metoda opisana w niniejszym punkcie wykorzystuje zależności istniejące między wielkościami opisującymi zagrożenie światłem niebieskim, a wielkościami fotometrycznymi i kolorymetrycznymi źródła światła. Metoda dotyczy oczywiście tylko źródeł o świetle białym. Po wyznaczeniu temperatury barwowej najbliższej T_{cp} źródła światła w tabeli 2 znajduje się odpowiadającą jej wartość natężenia oświetlenia progowego E_{thr} .

Tabela 2 Zachowawcze oszacowanie wartości E_{thr} jako funkcji temperatury barwowej najbliższej T_{cp}

Nominalna T_{cp} [K]	Zachowawcze wartości E_{thr} [lx]
$CCT \leq 2\ 350\ K$	4 000
$2\ 350\ K < CCT \leq 2\ 850\ K$	1 850
$2\ 850\ K < CCT \leq 3\ 250\ K$	1 450
$3\ 250\ K < CCT \leq 3\ 750\ K$	1 100
$3\ 750\ K < CCT \leq 4\ 500\ K$	850
$4\ 500\ K < CCT \leq 5\ 750\ K$	650
$5\ 750\ K < CCT \leq 8\ 000\ K$	500

Jeżeli znana jest temperatura barwowa najbliższa T_{cp} i luminancja źródła L_s można również korzystając z Tablicy 3 wyznaczyć wartość zachowawczą luminancji L i porównać ją z wartością L_s . Jeżeli $L_s < L$ to źródło należy do grupy RG1 nieograniczone, natomiast jeżeli $L_s \geq L$ należy jak poprzednio wyznaczyć wartość E_{thr} .

Tabela 3 Zachowawcze oszacowanie wartości luminancji dających grupę ryzyka nie większą niż RG1

Nominalna temperatura barwowa najbliższa [K]	Zachowawcze wartości luminancji L [Mcd/m ²]
$CCT \leq 2\ 350\ K$	40
$2\ 350\ K < CCT \leq 2\ 850\ K$	18,5
$2\ 850\ K < CCT \leq 3\ 250\ K$	14,5
$3\ 250\ K < CCT \leq 3\ 750\ K$	11
$3\ 750\ K < CCT \leq 4\ 500\ K$	8,5
$4\ 500\ K < CCT \leq 5\ 750\ K$	6,5
$5\ 750\ K < CCT \leq 8\ 000\ K$	5
Nominalne wartości temperatury barwowej najbliższej i luminancji świetlnej podane przez producenta mogą być użyte jako podstawa tej oceny.	

4.3 Ocena oparta na pomiarach wielkości widmowych i luminancji

Metodę opisaną poniżej można zastosować jeżeli dostępne są pomiary wielkości widmowych i luminancji źródła lub oprawy oświetleniowej L_s . W przypadku nierównomiernej luminancji należy wykonać pomiar rozkładu luminancji i wyznaczyć najwyższą wartość luminancji przy 200 mm i polu widzenia 0,011 rad oraz wykonać pomiar względnego rozkładu widmowego natężenia napromienienia $E_\lambda(\lambda)$. Korzystając z podanych wzorów na

skuteczność zagrożenia światłem niebieskim promieniowania widzialnego obliczyć wartość $K_{B,v}$ oraz wartość luminancji energetycznej światła niebieskiego przy użyciu wzoru

$$L_B = L_s \cdot K_{B,v}$$

Jeżeli $L_B \leq 10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, to źródło należy do grupy ryzyka RG1 nieograniczone, natomiast jeśli $L_B > 10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ należy obliczyć E_{thr} na podstawie wzoru

$$E_{\text{thr}} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / K_{B,v}$$

Wyznaczanie wartości natężenia oświetlenia progowego E_{thr} i odległości progowej d_{thr} przedstawiono szczegółowo w rozdziale 5.

4.4 Ocena oparta tylko na pomiarach wielkości widmowych i odpowiednich obliczeniach

Niniejsza metoda oceny jest bardzo podobna do poprzedniej i jest bardzo wygodna do stosowania z użyciem spektrometrii. Po wykonaniu pomiarów widmowej luminancji energetycznej przy odległości 200 mm i polu widzenia 0,011 rad oblicza się wartości L_B oraz $K_{B,v}$ i E_{thr} .

5. Wyznaczanie wartości natężenia oświetlenia progowego E_{thr} i odległości progowej d_{thr}

Badanie zagrożenia światłem niebieskim źródeł o rozciągłości kątowej większej niż 11 mrad z użyciem spektrometrii rozpoczyna się od wykonania pomiarów widmowej luminancji energetycznej przy odległości pomiarowej 200 mm i z polem widzenia 11 mrad.

Jeżeli spektrometr stosowany do wykonywania pomiarów jest wywzorcowany w wartościach widmowego natężenia napromienienia należy otrzymane wartości przeliczyć według poniższego wzoru:

$$L_e(\lambda) = E_e(\lambda) / \Omega = \frac{E_e(\lambda) \cdot r^2}{A}$$

gdzie: $L_e(\lambda)$ –
 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,

widmowa luminancja energetyczna

$E_e(\lambda)$ – widmowe natężenie napromienienia $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,

Ω – kąt przestrzenny (bryłowy), sr,

r – odległość pomiarowa, m,

A – pole aparatury, m^2

Na podstawie otrzymanych wartości $L_{e\lambda}$ oblicza się wartość luminancji energetycznej światła niebieskiego L_B korzystając z wzoru:

$$L_B = \int L_{e\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$$

gdzie: $B(\lambda)$ – funkcja skuteczności widmowej zagrożenia siatkówki oka światłem niebieskim

Jeżeli wartość L_B jest mniejsza niż $10\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ to grupa ryzyka źródła jest nie większa niż RG1, natomiast jeśli wartość L_B jest większa niż $10\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, to źródło jest w grupie ryzyka RG2 i zachodzi potrzeba obliczenia wartości natężenia oświetlenia progowego E_{thr} . W tym celu należy obliczyć luminancję świetlną źródła na podstawie wzoru:

$$L_v = K_m \cdot \int L_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Z definicji natężenia oświetlenia progowego E_{thr} wynika, że dla wartości $E < E_{\text{thr}}$ źródło światła przejdzie do grupy ryzyka RG1.

Wzór pozwalający na obliczenia natężenia oświetlenia progowego ma postać:

$$E_{\text{thr}} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / K_{B,v} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot L_v / L_B$$

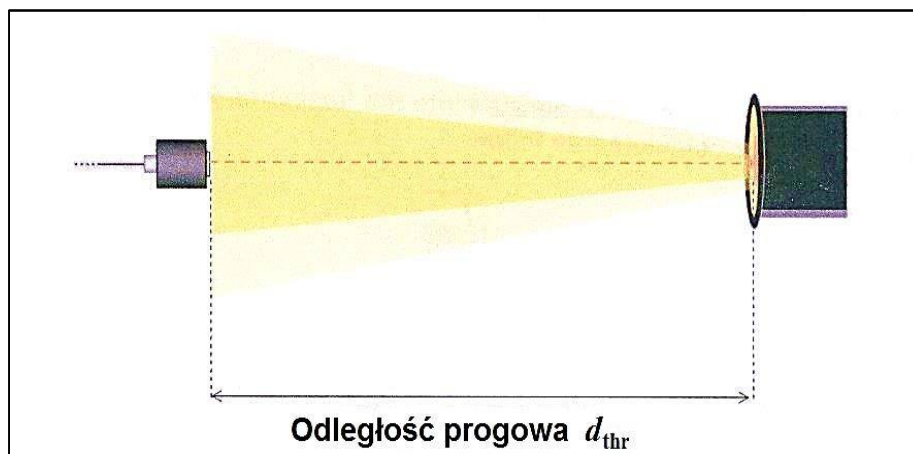
Przykład

Dla pewnego źródła LED otrzymano następujące wartości: $L_B = 19624,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$; $L_v = 15465113 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Podstawiając te wartości do wzoru (10) otrzymujemy się

$$E_{\text{thr}} = \frac{1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 15465113 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}}{19624,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}} = 788 \text{ lx}$$

Wartości odległości progowej d_{thr} można otrzymać jedną z następujących metod:

- z użyciem luksomierza z odpowiednio nachylonym odbiornikiem, gdy kierunek maksymalnej światłości daje się łatwo wyznaczyć



Rys. 3 Układ pomiarowy do wyznaczania odległości progowej źródeł o rozsyłe kierunkowym (punktowym)

b) z użyciem goniofotometru, jeśli nie jest znany kierunek maksymalnej światłości.

W pierwszym przypadku dla źródeł punktowych układ pomiarowy ma bardzo prostą konfigurację pokazaną na rys. 3; natomiast w przypadku drugim z użyciem goniofotometru wyznacza się rozsył światłości. Z rozsyłu wyznacza się kierunek maksymalnej światłości I_{\max} i odległość progową d_{thr} oblicza się z poniższego wzoru

$$d_{\text{thr}} = \sqrt{\frac{I_{\text{mzx}}}{E_{\text{thr}}}}$$

6. Kwestia zagrożenia światłem niebieskim w normach dotyczących źródeł i opraw oświetleniowych

Zmiany wniesione do oceny zagrożenia światłem niebieskim przez Raport TR 62778 przenoszą się na normy dotyczące źródeł i opraw oświetleniowych. Jako przykład może posłużyć norma IEC 60598-1:2014 [5] zawierająca wymagania ogólne i badania opraw oświetleniowych, która odnosi się również do problemów związanych z tym zagrożeniem w p. 4.24.2.

Oprawy oświetleniowe ze źródłami światła, których norma bezpieczeństwa nie wyłącza z oceny zagrożenia siatkówki światłem niebieskim, powinny być ocenione zgodnie z IEC/TR 62778.

Użycie źródeł światła z grupą ryzyka, ze względu na światło niebieskie, większą niż RG2 nie jest spodziewane. Wymagało by to spełnienia uciążliwych wymagań dotyczących eksploatacji tego typu źródeł światła. Obecnie typami źródeł światła, które powinny być rozważane ze względu na zagrożenie światłem niebieskim są tylko lampy LED, lampy metalohalogenkowe i niektóre typy specjalistycznych żarówek halogenowych.

Dla opraw oświetleniowych stosujących źródła światła mające grupę ryzyka RG0 nieograniczona lub RG1 nieograniczona zgodnie z IEC/TR 62778, lub które oszacowano jako RG0 nieograniczona lub RG1 nieograniczona po ich całkowitym zmontowaniu, przy tych samych warunkach, nie stosuje się żadnych wymagań dotyczących zagrożenia siatkówki oka światłem niebieskim.

Dla opraw oświetleniowych mających progowe natężenie oświetlenia E_{thr} wyznaczone zgodnie z IEC/TR 62778 stosuje się następujące wymagania:

a) Dla opraw oświetleniowych montowanych na stałe, należy wykonać dodatkową ocenę zgodnie z IEC/TR 62778 w celu znalezienia odległości X między oprawą oświetleniową, a linią graniczną między RG2 i RG1. Oprawa oświetleniowa powinna być oznakowana i mieć instrukcję zgodnie z ustaleniami normy.

- b) Oprawy oświetleniowe przenośne i ręczne przewyższające grupę ryzyka RG1 przy 200 mm, oceniane zgodnie z IEC/TR 62778, powinny być oznakowane zgodnie z ustaleniami normy.

Więcej informacji na powyższy temat znajduje się na stronie www.gloptic.com.

Literatura

- [1] PN-EN 62471:2010 Bezpieczeństwo fotobiologiczne lamp i systemów lampowych
- [2] Pietrzykowski J.: Bezpieczeństwo fotobiologiczne sztucznych i naturalnych źródeł promieniowania optycznego. Część 1: LUX Magazyn nr 2, 54-57 (2015). Część 2: LUX Magazyn nr 3, 59-66 (2015)
- [3] IEC TR 62778:2014 Application of IEC 62471 for the assessment of blue hazard to light sources and luminaires
- [4] 34A/1887/DC Draft for an International Standard IEC 62778 to replace the Technical Report IEC/TR 62778 (2016)
- [5] IEC 50598-1:2014 Luminaires. Part 1: General requirements and tests

Autorzy:

mgr Jerzy Pietrzykowski , mgr Mikołaj Przybyła

GL OPTIC R&D CENTER SP. Z O.O.

ul. Poznańska 70

62-040 Puszczykowo

Poland

Phone: +48 61 819 40 03

E-Mail: office@gloptic.com

www.gloptic.com