

Rozkład widmowy światła sztucznego a skuteczność hamowania wydzielania melatoniny

Streszczenie. Skuteczność hamowania wydzielania melatoniny przez światło o określonym rozkładzie widmowym jest istotna w przypadku projektowania oświetlenia skutecznego biologicznie. Aby projektować takie oświetlenie istotne jest zastosowanie znormalizowanej krzywej skuteczności hamowania wydzielania melatoniny, a takiej jak dotąd nie ma. Przedstawione w artykule wyniki pomiarów natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny przy zastosowaniu różnych świetlówek oraz źródeł ledowych wskazują na duże różnice w oddziaływaniu emitowanego przez nie światła na ten proces. Ponadto stwierdzono znaczne rozbieżności wyników przy zastosowaniu różnych krzywych skuteczności hamowania wydzielania melatoniny, które są dostępne w literaturze.

Abstract. Melatonin suppression efficiency under particular spectral distribution of light is essential for designing the biologically effective lighting. For doing this there is a need to use standardized melatonin suppression action spectrum, but it hasn't been established yet. The results of melatonin suppression effective irradiance measurements for different fluorescent lamps and LEDs show the big differences of this parameter. Besides big discrepancies of results depending on the action spectrum used for calculations were found. (Spectral distribution of artificial light and melatonin suppression efficiency).

Słowa kluczowe: skuteczność hamowania wydzielania melatoniny, rozkład widmowy światła, źródła ledowe, świetlówki

Keywords: melatonin suppression efficiency, spectral light distribution, LEDs, fluorescent lamps

Wstęp

Znormalizowane wymagania oświetleniowe dotyczące projektowania oświetlenia we wnętrzach wynikają z uwzględnienia trzech podstawowych potrzeb człowieka: zapewnienia bezpieczeństwa, zapewnienia warunków do wykonywania zadań wzrokowych i pomoc w kreowaniu właściwego otoczenia świetlnego [1]. Aktualny stan wiedzy o znaczącym wpływie światła o określonym rozkładzie widmowym na procesy fizjologiczne w organizmie człowieka jak np. cykl snu i czuwania, czy poziom czujności, powoduje że oświetlenie można wykorzystywać do spełniania funkcji pozawzrokowych [2–6]. Ma to szczególne znaczenie w przypadku projektowania oświetlenia skutecznego biologicznie do zastosowań terapeutycznych (regulacja chronobiologicznych zaburzeń snu, zaburzeń cyklu okołodobowego, terapia depresji sezonowej) jak i do oświetlenia miejsc pracy zmianowej (podniesienie poziomu czujności, sprawności psychomotorycznej). Złuszczta ta druga grupa zastosowań jest przedmiotem wielu badań, gdyż poziom czujności i sprawności psychomotorycznej człowieka ulega obniżeniu w okresie wczesno-popołudniowym oraz znacznemu obniżeniu w okresie nocnym [6]. Podniesienie czujności jest ważne szczególnie na stanowiskach pracy zmianowej oraz na stanowiskach, gdzie istotne jest utrzymywanie wysokiej sprawności psychomotorycznej. W celu podniesienia czujności pracowników stosuje się ekspozycję na światło o określonym rozkładzie widmowym, które powoduje skuteczne hamowanie wydzielania melatoniny w określonym czasie. Sprzyja to ograniczeniu potencjalnych wypadków przy pracy, spowodowanych spadkiem sprawności psychomotorycznej oraz pomaga zwiększyć wydajność pracy.

W badaniach wpływu ekspozycji światłem o różnym rozkładzie widmowym na hamowanie wydzielania melatoniny nie wystarcza określenie parametrów fotometrycznych jak: natężenie oświetlenia, luminancja czy temperatura barwowa i wskaźnik oddawania barw, gdyż wyznacza się je przy uwzględnieniu krzywej skuteczności świetlnej dla widzenia fotonowego. Stosowanie tego systemu pomiarów zakłada, że w tych reakcjach organizmu na światło pośredniczy 3-czopkowy system widzenia, a nie nowo odkryty receptor ipRGC (ang. *Intrinsically*

photosensitive Retinal Ganglion Cells) [7], który jest odpowiedzialny za pozawzrokową odpowiedź organizmu na światło i uczestniczy w procesie hamowania wydzielania melatoniny. Z tego względu parametry te nie są odpowiednie do określenia charakterystyki światła stymulującego trakt siatkówkowo-podwzgórzowy (RTH) u ludzi [4, 8]. Potrzebne jest zmierzenie i określenie również parametrów charakteryzujących skuteczność hamowania wydzielania melatoniny przez światło. Jednym z takich parametrów jest natężenie napromienienia skuteczne w hamowaniu wydzielania melatoniny.

Aktualnie wiele badań poświęconych jest poszukiwaniom takiego rozkładu widmowego światła, które może być zastosowane w praktyce zarówno terapeutycznej jak i do oświetlenia miejsc pracy, zwłaszcza zmianowej. Dowiedziono, że światło z zakresu 425 nm – 560 nm jest efektywne w hamowaniu wydzielania melatoniny, a zwłaszcza światło niebieskie o długości fali ok. 470 nm [8, 9]. Pomimo wielu badań ukierunkowanych na określanie skuteczności hamowania wydzielania melatoniny przez światło monochromatyczne o różnej długości fali z ww. zakresu, nadal nie ma znormalizowanej krzywej skuteczności, która byłaby ogólnie akceptowana i opublikowana przez CIE. W publikacjach stosowane są różne krzywe skuteczności opracowywane na podstawie danych uzyskanych w badaniach Brainarda lub badaniach Thapana albo z obu tych badań łącznie [6]. Dostępne dane skuteczności widmowej hamowania wydzielania melatoniny podawane są tylko dla zakresu długości fal 425 nm – 560 nm, czyli nie uwzględniają m.in. barwy czerwonej, która – jak stwierdzono w ostatnich latach – również powoduje hamowanie wydzielania melatoniny [10–14]. Wartość skutecznego natężenia napromienienia obliczana jest z uwzględnieniem krzywej skuteczności hamowania wydzielania melatoniny $M(\lambda)$, która wyznaczana jest według dostępnych danych literaturowych oraz różnych modeli ich interpolacji. W ten sposób wyznaczone krzywe skuteczności różnią się, a tym samym wyznaczone zgodnie z nimi wartości natężenia napromienienia dla tego samego rozkładu widmowego światła [6, 15].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny wyznaczanego przy zastosowaniu

trzech różnych krzywych skuteczności $M(\lambda)$, dla różnych rozkładów widmowych światła emitowanego przez źródła ledowe i świetlówki.

Warunki oświetleniowe modelowane w badaniach

Badania wykonano w pomieszczeniu laboratoryjnym o wymiarach 7m x 4,5 m, w którym zainstalowane były oprawy oświetlenia ogólnego ze świetlówkami oraz 3 oprawy oświetlenia zlokalizowanego. Oświetlenie ogólne w badanym pomieszczeniu było realizowane przez 6 opraw świetłówkowych z aluminiowym polerowanym rastrem parabolicznym typu „dark light”, które przeznaczone są do oświetlania stanowisk komputerowych. Wyznaczona z pomiarów spektrometrycznych temperatura barwowa wynosiła 4000 K, a wskaźnik oddawania barw $R_a = 85$. Dodatkowo zainstalowano 3 oprawy oświetlenia zlokalizowanego (rys. 1), które były usytuowane na zwieszakach i były osobno załączane:

- oprawa RMA – z rastrem z matowego aluminium z profilowanymi lamelami na świetłówki TL5 2x54W (2,46 m powyżej podłogi); trzy rodzaje świetlówek: 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K (na rysunku 1 – pierwsza z prawej),
- oprawa KLAM – z kloszem akrylowym z mikrosoczewek na świetłówki TL5 2x54W; trzy rodzaje świetlówek: 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K (na rysunku 1 – środkowa),
- oprawa RGBW – specjalnie opracowana do badań, składająca się z czterech sekcji, każda z ledami o innej barwie: B – niebieskie 450 nm (42x2W), G – zielone 525 nm (42 x 2W), R – czerwone 630 nm (42x2 W), W – białe 4000 K, $R_a = 85$; każda sekcja ledów o określonej barwie posiada radiator pełniący funkcję obudowy, zasilacz i szybę ochronną (na rysunku 1 – pierwsza z lewej). Do zasilania oprawy użyte zostały zasilacze, które umożliwiają zasilanie diod LED stabilizowanym prądem stałym w zakresie od 350 mA do 700 mA, co umożliwia regulację w zakresie od 50% do 100% strumienia świetlnego znamionowego.



Rys. 1 Widok opraw oświetlenia zlokalizowanego, które wykorzystano w badaniach

Badania wykonano wykorzystując następujące rodzaje oświetlenia:

- oświetlenie ogólne,
- oświetlenie zlokalizowane (załączona wyłącznie wybrana oprawa oświetlenia zlokalizowanego)

Ściany i sufit pomieszczenia były białe o współczynniku odbicia 0,8, natomiast jedną ze ścian stanowiła roleta zasłaniająca okna o współczynniku odbicia 0,5.

Aparatura pomiarowa

W celu określenia parametrów fotometrycznych oraz parametrów charakteryzujących oddziaływanie fotobiologiczne (hamowanie wydzielania melatoniny) przy

ekspozycji oczu na światło docierające do oczu przy emisji poszczególnych źródeł światła lub układów źródeł światła wykonano pomiary spektrometryczne w zakresie 300 nm – 780 nm. Zastosowano przenośny spektrometr GL Spectis 5.0 Touch (produkcji GL Optic). Detektor tego spektrometru wykonany jest w technologii liniiki CCD i umożliwiała szybki pomiar natężenia napromienienia w zakresie 200nm - 1050 nm przy rozdzielczości optycznej 2,5 nm i czasie całkowania od 5 ms do 100 s.

Warunki pomiaru

Podczas normalnej pracy do oczu człowieka dociera zarówno światło bezpośrednie jak i odbite od elementów wnętrza i wyposażenia. Z tego względu badania wykonano w pomieszczeniu biurowym (z wyeliminowanym dostępem światła dziennego), tak aby zamodelować rzeczywiste warunki potencjalnej ekspozycji. Do badań przyjęta była standardowa wysokość oczu w pozycji siedzącej wynosząca w przybliżeniu 1,2 m nad podłogą, na której umieszczony był detektor spektrometru (pionowa płaszczyzna pomiaru). Usytuowanie punktu pomiaru odpowiadało położeniu oczu obserwatora przy poziomej linii obserwacji.

Wynikowy przebieg rozkładu widmowego był uzyskiwany z uśrednienia dziesięciu pomiarów. Przed wykonaniem pomiarów źródło świeciło przez co najmniej 30 minut.

Wyniki pomiarów rozkładów widmowych natężenia napromienienia

Do celów porównawczych wyznaczanego natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny wybrano trzy krzywe skuteczności hamowania wydzielania melatoniny opisane we wcześniejszych publikacjach [6, 15]:

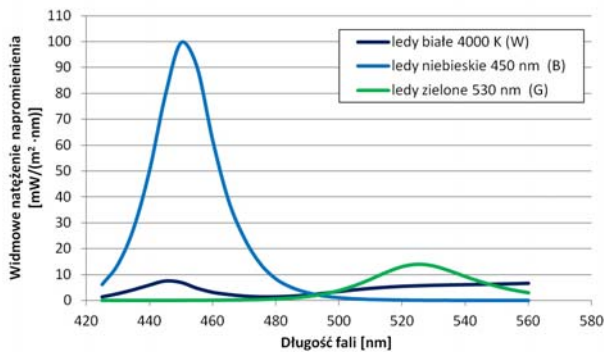
- $M_B(\lambda)$ – opracowana na podstawie interpolacji danych Brainarda [8],
- $M_T(\lambda)$ – opracowana na podstawie interpolacji danych Thapana [9]
- $M_A(\lambda)$ – opracowana przez Aube [16] na podstawie interpolacji danych Brainarda i Thapana.

Wykresy wyznaczonych z pomiarów rozkładów widmowych natężenia napromienienia światła padającego na rogówkę oka przy załączonych wybranych do badań opraw i źródłach światła przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

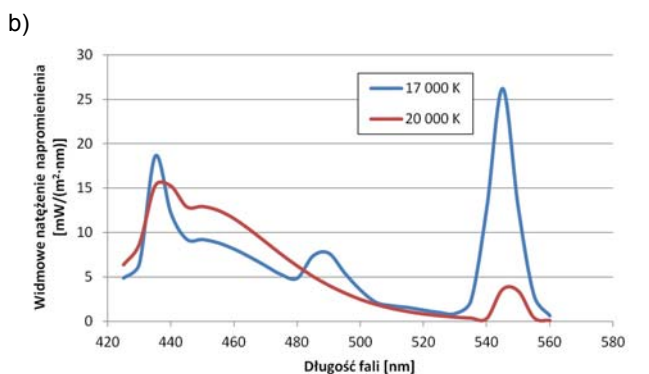
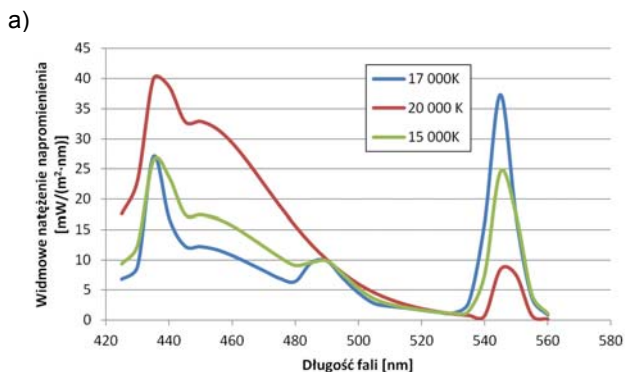
Na wykresach przedstawionych na rysunku 3 można zauważyć, że przy długości fali ok. 450 nm występuje maksimum w widmie promieniowania diod białych i niebieskich. Wartość widmowego natężenia napromienienia przy tej długości fali dla diod niebieskich wynosi ok. 100 mW/m² a dla białych – ok. 7,5 mW/m². Maksimum dla ledów białych przy tej długości fali wynika z faktu, że diody białe powstają na bazie diod niebieskich na które nakłada się luminofor. Światło niebieskie jest częściowo przez luminofor przepuszczane, stąd w widmie pojawia się pik przy barwie niebieskiej.

Natomiast na wykresach widmowych promieniowania emitowanego przez oprawę rastrową ze świetlówkami o bardzo wysokich temperaturach barwowych (rys. 3.a) wyraźnie widać, że kształty przebiegów rozkładów widmowych natężenia napromienienia od świetlówek 15 000K, 17 000 K i 20 000 K są o podobnym przebiegu. Dwa największe piki występują przy tych samych długościach fal tj. ok. 435 nm i 545 nm. Jednak charakter emisji świetlówek o temperaturze barwowej 20 000 K nieco odbiega od dwóch pozostałych. Wyraźnie widać, że źródło to emituje znacznie więcej światła w całym obszarze niebieskim do 490 nm, a maksimum emisji występuje przy

435 nm i wynosi ok. 40 mW/m^2 . Z tego względu postrzegana barwa światła emitowanego przez świetlówkę 20 000 K jest niebieska. Pozostałe dwie świetlówki emitują światło postrzegane jako chłodne białe. Najmniejszą emisją w obszarze niebieskim charakteryzuje się świetlówka 17 000 K. Jednocześnie emituje ona najwięcej światła w zakresie powyżej 530 nm z maksimum emisji przy barwie zielonej o długości fali ok 545 nm (ok. 37 mW/m^2). Widmo tej świetlówki opracowane zostało do celów stymulacji witalności człowieka i poprawy jego samopoczucia. Emitowane przez nią światło określono jako światło białe wzbogacone światłem niebieskim i zalecane jest do stosowania w pomieszczeniach, gdzie występuje niewystarczający dostęp światła dziennego.



Rys. 2. Rozkłady widmowe w zakresie 425 – 560 nm dla oprawy RGBW przy zaświeconych diodach: białych (W), zielonych (G), niebieskich (B)



Rys. 3. Rozkłady widmowe w zakresie 425 – 560 nm dla oprawy a) RMA ze świetlówkami: 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K, b) KLAM ze świetlówkami: 17 000 K i 20 000 K

Na rysunku 3.b przedstawiono wykresy widmowe dla oprawy z kloszem KLAM i zainstalowanymi świetlówkami 17 000 K i 20 000 K. Zastosowanie klosza akrylowego z mikrosoczewek spowodowało znaczne zmniejszenie widmowego natężenia napromienienia w zakresie

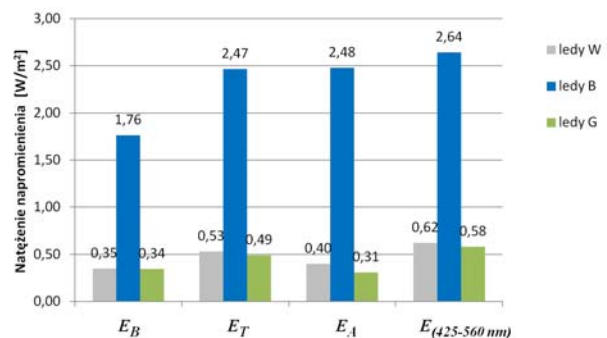
niebieskim. Wartość maksymalnego natężenia napromienienia dla świetlówek 20 000 K występująca przy długości fali 435 nm zmalała ok. 2,5 krotnie. W efekcie krzywa rozkładu widmowego natężenia napromienienia dla świetlówek 20 000 K jest w dużym zakresie długości fal poniżej krzywej rozkładu widmowego dla świetlówek 17 000 K (rys. 3.b) w odróżnieniu od sytuacji gdy świetlówki te były zainstalowane w oprawie rastrowej (rys. 3.a).

Na podstawie zmierzonych rozkładów widmowych wyznaczono wartości: natężenia oświetlenia (E), natężenia napromienienia promieniowania z zakresu 425 nm – 560 nm: całkowitego nieselektywnego ($E_{(425-560)}$) i skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny wg trzech różnych krzywych skuteczności: E_B , E_T , E_A , gdzie indeksy przyjęto od pierwszej litery nazwiska badacza, analogicznie jak dla krzywych skuteczności $M(\lambda)$ [6, 15]. Obliczenia wykonano dla oprawy ledowej RGBW (dla ledów białych, zielonych i niebieskich), oprawy RMA (ze świetlówkami 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K) oraz oprawy KLAM (ze świetlówkami 17 000 K i 20 000 K).

Zestawione natężenia oświetlenia przy rogówce oka (w płaszczyźnie pionowej przedstawiono w tabeli 1. Natężenia napromienienia dla rozpatrywanych opraw przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4 i 5.

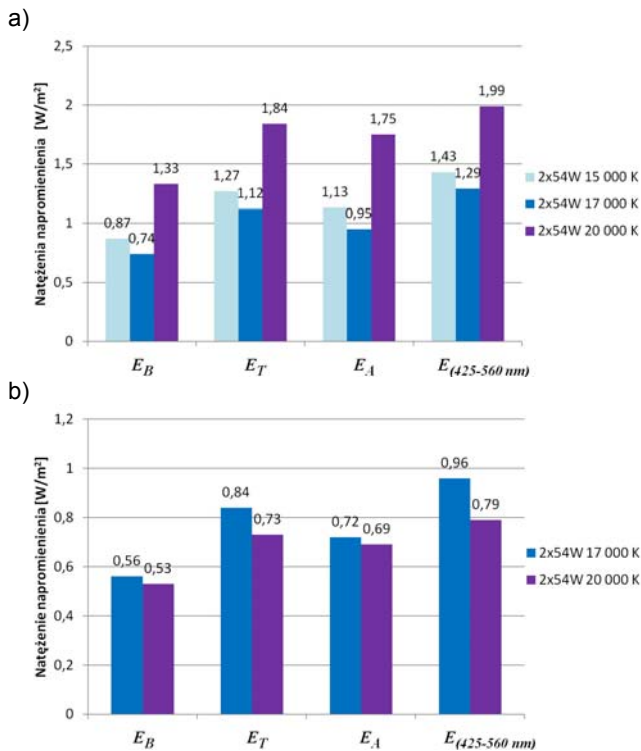
Tabela 1. Natężenie oświetlenia E [lx] przy oku obserwatora

Rodzaj oprawy	Świetlówki 2 x 54 W		
	15 000 K	17 000K	20 000 K
RMA	369 lx	455 lx	192 lx
KLAM	-	339 lx	81 lx
RGBW	Ledy W	Ledy G	Ledy B
	455 lx	317 lx	93 lx



Rys. 4. Natężenie napromienienia promieniowania z zakresu 425 – 560 nm przy rogówce oka pochodzące od promieniowania diod: W, B i G oprawy RGBW

Na podstawie analizy wykresów na rysunku 4 można stwierdzić, że skuteczność hamowania wydzielania melatoniny badanych diod zielonych i białych jest porównywalna pomimo, że widmo emisji diod zielonych zawiera znikomy udział światła niebieskiego. Tylko nieznacznie większe wartości natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny występują dla diod białych (maksymalna różnica występuje dla E_A i wynosi $0,09 \text{ W/m}^2$). Jednocześnie można stwierdzić, że wszystkie wyznaczone wartości natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny diod niebieskich we wszystkich przypadkach przekraczały minimalną wartość graniczną i były ok. 2,7 razy wyższe niż dla diod białych i zielonych. Wartość maksymalna wynosiła $E_A = 2,48 \text{ W/m}^2$.



Rys. 5. Natężenie napromienienia promieniowania z zakresu 425 – 560 nm przy rogówce oka dla opraw: a) RMA ze świetłówkami: 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K, b) KLAM ze świetłówkami: 17 000 K i 20 000 K

Zestawienie wartości natężenia napromienienia promieniowania skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny dla oprawy rastrowej RMA ze świetłówkami 15 000 K, 17 000 K i 20 000 K (rys. 5.a) wskazuje, że ich skuteczność hamowania wydzielania melatoniny jest dość wysoka. We wszystkich przypadkach przekracza wartość $0,6\text{ W/m}^2$. Maksymalna wartość występowała dla świetłówki 20 000 K i wynosiła $E_T = 1,84\text{ W/m}^2$. Natomiast jeśli przyjrzeć się wykresom na rysunku 5.b (oprawa z kloszem akrylowym z mikrosoczewkami) to można zauważyć, że wszystkie zmierzone wartości natężenia napromienienia są znacznie mniejsze. Wynika to ze strat strumienia świetlnego w kloszu. Straty te są różne dla obu rodzajów świetłówek. Dla świetłówek 17 000 K różnica zmierzonych wartości skutecznych w hamowaniu wydzielania melatoniny jest rzędu 25% natomiast dla świetłówek 20 000 K jest znacznie większa i wynosi ok. 60%, w stosunku do wartości dla oprawy RMA. Tak duże tłumienie klosza dla świetłówek 20 000 K przyczyniło się do tego, że wartości natężenia napromienienia (całkowite i skuteczne) dla oprawy KLAM są wyższe ze świetłówkami 17 000 K niż ze świetłówkami 20 000 K. Maksymalna wartość występowała dla świetłówki 17 000 K i wynosiła $E_T = 0,84\text{ W/m}^2$. Wynika to z charakterystyki widmowej tłumienia klosza z mikrosoczewek, który znacznie bardziej tłumí promieniowanie z zakresu niebieskiego niż zielonego co potwierdzają wykresy rozkładów widmowych przedstawione na wykresach na rysunkach 3.a i 3.b. W efekcie dla obu rodzajów świetłówek w oprawie z kloszem KLAM natężenie napromienienia promieniowania skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny $E_B < 0,6\text{ W/m}^2$. Natomiast parametr ten wyznaczany wg dwóch pozostałych krzywych skuteczności E_A i E_T przekracza wartość $0,6\text{ W/m}^2$. W tym przypadku można stwierdzić istotny wpływ zastosowanej krzywej skuteczności na spełnienie warunku granicznego skutecznego hamowania wydzielania melatoniny.

Aby odnieść otrzymane wyniki badań do typowego oświetlenia biurowego wyznaczono natężenie napromienienia promieniowania skuteczne w hamowaniu wydzielania melatoniny przy oświetleniu ogólnym. Natężenie to było znacznie poniżej minimalnej wartości granicznej ($0,6\text{ W/m}^2$) i wynosiło odpowiednio: $E_B = 0,19\text{ W/m}^2$, $E_T = 0,31\text{ W/m}^2$ i $E_A = 0,24\text{ W/m}^2$. Uzyskane wartości są mniejsze od tych, jakie występowały dla zielonych ledów (od 22% do 44%) i białych ledów (od 40% do 46%). Największe procentowe różnice stwierdzono przy porównaniu wartości natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny wyznaczonych wg krzywej Brainarda (E_B).

Różnice natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny w zależności od przyjętej krzywej skuteczności

Porównując wartości natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny wyznaczone wg trzech różnych krzywych skuteczności można zauważyć dość istotne różnice. Największe wartości występują przy przyjęciu krzywej skuteczności wg Thapana, a najmniejsze – przy wykorzystaniu krzywej Brainarda (za wyjątkiem diod zielonych).

W przypadku diod niebieskich występuje nieznaczna różnica wartości między E_A a E_T (ok. 4%), natomiast znaczna różnica między E_A a E_B i E_T a E_B (ok. 29% w obu przypadkach). Również wartość całkowitego (nieselektywnego) natężenia napromienienia diod niebieskich różniła się tylko o 6% od natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny E_A i E_T . W przypadku diod białych występują następujące różnice wartości: między E_A a E_T ok. 12,5%, między E_A a E_B i E_T a E_B odpowiednio ok. 24% i ok. 34%. Natomiast dla diod zielonych najmniejsza wartość występowała dla E_A . Wyznaczone różnice wynosiły: między E_A a E_T ok. 36%, między E_A a E_B ok. 8% i między E_T a E_B ok. 31%.

Różnice procentowe między zmierzonymi wg omawianych trzech krzywych skuteczności wartościami natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny dla oprawy rastrowej RMA i z kloszem KLAM zawierały się w przedziale od 4% do 34%. Największe rozbieżności wystąpiły między wartościami wyznaczonymi wg krzywych $M_B(\lambda)$ oraz $M_T(\lambda)$ (od 27% do 34%). Natomiast najmniejsze rozbieżności wystąpiły między wartościami wyznaczonymi wg krzywych $M_A(\lambda)$ oraz $M_T(\lambda)$ (od 4% do 15%).

Wnioski

Największe hamowanie wydzielania melatoniny (natężenie napromienienia skuteczne w hamowaniu wydzielania melatoniny powyżej 2 W/m^2 przy wyliczeniach wg krzywych skuteczności $M_A(\lambda)$ i $M_T(\lambda)$) występowało przy ledach niebieskich. Wartości tego parametru z zakresu od 1 W/m^2 do 2 W/m^2 występowały dla oprawy rastrowej RMA w następujących przypadkach: gdy zainstalowane były świetłówki: 20 000 K (przy wyliczeniach wg wszystkich 3 krzywych skuteczności), świetłówki 17 000 K i zastosowano krzywą skuteczności $M_T(\lambda)$, świetłówki 15 000 K i zastosowano krzywe skuteczności $M_T(\lambda)$ i $M_A(\lambda)$. Ogólnie w 59% omawianych przypadków spełnione było kryterium skutecznego hamowania wydzielania melatoniny zgodnie z przyjętą minimalną wartością graniczną wynoszącą $0,6\text{ W/m}^2$. Wśród przypadków niespełnienia tego kryterium ok. 55% stanowiły te, dla których niespełnienie wynikało wyłącznie z przyjętej krzywej skuteczności $M_B(\lambda)$.

Porównanie wyników skuteczności hamowania wydzielania melatoniny dla źródeł światła o różnych rozkładach widmowych jednoznacznie wskazuje, że źródła o dużym udziale światła niebieskiego w zakresie 450 – 470 nm będą najbardziej skuteczne w hamowaniu wydzielania melatoniny.

Podsumowanie

W artykule przeanalizowano rozkłady widmowe oraz wartości natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny stosując do ich wyznaczenia trzy różne krzywe skuteczności. Analiza wyników badań wykazała istotny wpływ zastosowanej krzywej skuteczności oraz rozkładu widmowego źródła na wyznaczaną wartość natężenia napromienienia skutecznego w hamowaniu wydzielania melatoniny. W zależności od wyboru przyjętej do obliczeń krzywej $M(\lambda)$ wyznaczone wartości skutecznego natężenia napromienienia mogą spełniać lub nie przyjęte kryterium biologiczne. Oznacza to, że jednym z podstawowych czynników decydujących o ocenie skuteczności oświetlenia w podniesieniu czujności jest przyjęcie odpowiednich założeń w metodzie obliczeniowej. Brak znormalizowanej krzywej skuteczności może nie tylko utrudniać określanie skutecznych wartości dawek oświetlenia o określonym rozkładzie widmowym dla potrzeb projektowania oświetlenia skutecznego biologicznie ale także podważać wiarygodność metody wyznaczania tych dawek. Dodatkowo należy zwrócić uwagę nie tylko na rozkład widmowy źródła ale również na układ świetlny-opptyczny oprawy, gdyż np. zastosowanie klosza może istotnie zmniejszyć skuteczność oddziaływania biologicznego.

Oprawa RGBW zastosowana w badaniach została opracowana i wykonana w Zakładzie Przekształtników Mocy w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Autorzy: dr hab. inż. Agnieszka Wolska prof. CIOP-PIB, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB), Zakład Techniki Bezpieczeństwa, Pracownia Promieniowania Optycznego ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: agwol@ciop.pl, dr hab. inż. Dariusz Sawicki prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-661 Warszawa, e-mail: dasa@iem.pw.edu.pl, dr inż. Krzysztof Tomczuk i mgr inż. Piotr Mazurek, Instytut Elektrotechniki, Zakład Przekształtników Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

LITERATURA

[1] Bąk J., *Technika oświetlenia*, PWN, Warszawa, 1981
[2] Brainard G.C., Hanifin J.P., Photons, clocks, and consciousness. *J. Biol. Rhythms*. 20 (2005), n. 4, 314-25. DOI: 10.1177/0748730405278951

[3] Brainard GC, Sliney D, Hanifin JP, Glickman G, Byrne B, Greeson JM, Jasser S, Gerner E, Rollag MD., Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light. *J. Biol. Rhythms*. 23 (2008), n. 5, 379-86. DOI: 10.1177/0748730408323089
[4] Cajochen C., Munch M., Kobińska S., Krauchi K., Steinem R., Oelhafen P., Borgul S., Wirz-Justice A., High sensitivity of human melatonin alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 90 (2005), 1311-1316. DOI: 10.1210/jc.2004-0957
[5] Zużewicz K., Wolska A., Wpływ charakterystyki widmowej światła sztucznego, na aktywność dobową i poziom senności pracowników zmianowych, *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*, 2014, 12 (522), 18-22.
[6] Wolska A. Zużewicz K., Barwa światła a poziom czujności człowieka, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 91 (2015), n. 7, 77-80. DOI:10.15199/48.2015.07.23
[7] Pickard G.E., Sollars P.J., Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells. In: *Nilius B. et al (editors) Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology part 162*. Springer 2012.
[8] Brainard G. C., Hanifin J. P. Greeson J.M., Byrne B., Glickman G., Gerner E., Rollag M.D., Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptors. *J. Neurosci* 21 (2001), 6405-6412
[9] Thapan K., Arendt J., Skene D., An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol.* 535 (2001), 261-267. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t011-1-00261.x
[10] Sahin L, Figueiro M.G., Alerting effects of short-wavelengths (blue) and long – wavelengths (red) lights in the afternoon. *Physiology & Behavior*, 116-117 (2013), 1-7. DOI:10.1016/j.physbeh.2013.03.014
[11] Sahin L, Wood B.M, Plitnick B., Figueiro MG., Daytime light exposure : effects on biomarkers, measure of alertness and performance. *Behavioural Brain Research*, 274 (2014), Nov 1, 176-185. DOI: 10.1016/j.bbr.2014.08.017
[12] Figueiro M.G., Bierman A, Plitnick B, Rea M.S., Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *MC Neuroscience*, 10 (2009). 10:105. DOI: 10.1186/1471-2202-10-105.
[13] Figueiro MG, Rea MS: The effects of red and blue light on circadian variations in cortisol, alpha amylase and melatonin. *Int J.Endocrinol.* 2010 (2010), Article ID 829351, 9 pages. DOI:10.1155/2010/829351.
[14] Hanifin J.P, Stewart K.T., Smith P., Tanner R., Rollag M., Brainard G.C. High-intensity red light suppresses melatonin. *Chronobiol Int.* 23 (2006). (1-2):251-68. DOI:10.1080/07420520500521988
[15] Wolska A, Sawicki D., Skuteczność hamowania wydzielania melatoniny przy różnych rozkładach widmowych światła sztucznego, *Materiały Konferencyjne, XXIV Krajowa Konferencja Oświetleniowa, Technika Świetlna 2015*, Warszawa, 19-20.11.2015; ISSN 1506-6223. ss.258-266.
[16] Aube M., Roby J., Kocifaj M., Evaluating potential spectra impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PLOS ONE*, 8(7) (2013), 1-15. DOI: 10.1371/journal.pone.0067798
[17] Piazena H.F., Franke L., Uebelhack R., Kockott D., Volker S., Light-controlled melatonin suppression considering person's age. *Abstract Booklet of CIE Conference Light Quality &Energy Efficiency* (2010). March 14-17, 2010. Vienna. Austria. OP31.