

Krzysztof WANDACHOWICZ

OBLICZANIE ROZKŁADÓW CYRKADIALNYCH WIELKOŚCI PROMIENISTYCH WE WNĘTRZACH

STRESZCZENIE *Odkryte i opisane dziesięć lat temu receptory znajdujące się na siatkówce oka odpowiadają za regulację rytmu okołodobowego człowieka. Po opublikowaniu danych dotyczących czułości widmowej tych receptorów, możliwe było zdefiniowanie odpowiadających im tzw. wielkości cyrkadialnych. W artykule przedstawiono definicje cyrkadialnych wielkości promienistych. Wykonano obliczenia rozkładów natężenia cyrkadialnego w przykładowym wnętrzu i porównano otrzymane wyniki z wartościami natężenia oświetlenia.*

Słowa kluczowe: *cykl cyrkadialny, cyrkadialne wielkości promienne, obliczanie rozkładów natężenia oświetlenia*

1. WSTĘP

Siatkówka oka zawiera dwa rodzaje receptorów odpowiedzialnych za widzenie (czopki i pręciki). Receptory te połączone są z ośrodkami wzrokowymi w mózgu za pośrednictwem komórek zwojowych (ang. RGCs – *retinal ganglion cells*). Okazuje się, że około 1 procent [8] tych komórek, występujących na siatkówce, jest światłoczułych (ipRGCs). Komórki te zawierają światłoczuły pigment zwany melanopsyną i są połączone z ulokowanym w podwzgórzu (część podkorowa mózgowia) ośrodkiem odpowiedzialnym za regulację rytmu okołodobowego.

dr inż. Krzysztof WANDACHOWICZ

e-mail: Krzysztof.Wandachowicz@put.poznan.pl

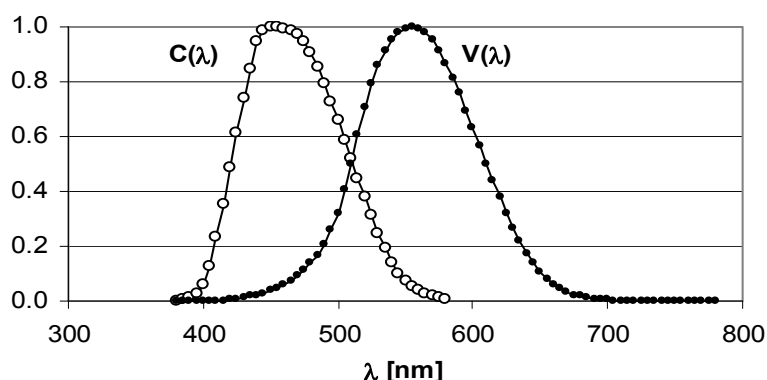
Zakład Techniki Świetlnej i Elektrotermii, Instytut Elektrotechniki
i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 256, 2012

Cykl okołodobowy nazywany cyklem cyrkadialnym (od łacińskiego *circa* – około, *dies* – dzień) jest najstarszym z rytmów wrodzonych i wytworzył wiele stałych mechanizmów fizjologicznych (np. senność ogarniająca nas wieczorem). Na rytm okołodobowy wpływa przede wszystkim światło, które pełni rolę synchronizatora cyklu dzień-noc i faz aktywności i spoczynku (czuwanie-sen). Pobudzenie receptorów ipRGCs wpływa na tłumienie wytwarzania melatoniny. Poziom hormonu melatoniny zmienia się w ciągu dnia i zmiany te są powiązane z cyklem okołodobowym. Przy mniejszej ilości światła, z jaką mamy do czynienia np. w okresie zimowym, może nastąpić zaburzenie cyklu okołodobowego (wzrost poziomu melatoniny), jak również może wystąpić stan obniżenia nastroju nazywany depresją sezonową.

Ostatnie badania wskazują, że światłoczułe komórki zwojowe (ipRGCs) są odpowiedzialne nie tylko za regulację rytmu okołodobowego. Wpływają one również na procesy adaptacji do jasności i ciemności oraz procesy poznawcze, naukę i pamięć [8].

W roku 2001 opublikowano dane [2, 3] opisujące czułość widmową światłoczułych komórek zwojowych (ipRGCs). Na ich podstawie przyjęto krzywą względną widmowej skuteczności cyrkadialnej $C(\lambda)$ [1] (rys. 1). Maksymalna czułość widmowa krzywej $C(\lambda)$ przesunięta jest, w stosunku do krzywej $V(\lambda)$, w kierunku krótkofalowej części widma. W związku z tym promieniowanie z większym udziałem niebieskiej części widma (promieniowanie o wyższej temperaturze barwowej) będzie bardziej skuteczne w pobudzaniu światłoczułych komórek zwojowych (ipRGCs) i regulowaniu rytmu okołodobowego.



Rys. 1. Krzywe względnej widmowej skuteczności świetlnej $V(\lambda)$ i względnej widmowej skuteczności cyrkadialnej $C(\lambda)$

Po odkryciu receptorów odpowiedzialnych za kształtowanie rytmu okołodobowego powstało wiele produktów i towarzyszących im publikacji firm produkujących sprzęt oświetleniowy, które próbują zachęcić szczególnie pracodawców do instalacji systemów oświetleniowych, pomagających regulować cykl okołodobowy pracowników. Systemy te mają za zadanie pobudzić aktywność

pracowników w określonych godzinach pracy. Cel ten ma być osiągnięty poprzez ekspozycje na światło o chłodniejszej barwie, co prowadzi do spadku poziomu melatoniny. Okazuje się jednak, że te działania mogą przynieść niekorzystne skutki. Badania wskazują [9], że tłumienie melatoniny za pomocą ekspozycji na sztuczne światło w nocy (np. w przypadku pracowników pracujących na trzecią zmianę) może prowadzić do zwiększenia ryzyka zachorowalności na raka piersi. Obecnie trwają badania zmierzające do ustalenia wymaganych dawek promieniowania ocenionego według skuteczności cyrkadialnej, które będą wywoływały pożądany skutek w kształtowaniu cyklu okołodobowego.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie definicji cyrkadialnych wielkości promienistych oraz sposobu obliczania rozkładów cyrkadialnego natężenia oświetlenia i cyrkadialnego natężenia napromienienia we wnętrzach z uwzględnieniem wielokrotnych odbić.

2. CYRKADIALNE WIELKOŚCI PROMIENISTE

Strumień świetlny Φ definiowany jest zależnością (1), w której zastosowano wielkość K_m jako największą wartość widmowej skuteczności świetlnej równą 683 [lm W^{-1}], a $\Phi_{e\lambda}$ jest rozkładem widmowym strumienia energetycznego [W m^{-1}].

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d(\lambda) \quad [\text{lm}] \quad (1)$$

Strumień cyrkadialny Φ_c definiowany może być zależnością (2):

$$\Phi_c = K \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} C(\lambda) d(\lambda) \quad [\text{W}_{\text{ef}}] \quad (2)$$

gdzie:

- K – stała, której wartość przyjmuje się równą 1;
- W_{ef} – jednostka strumienia cyrkadialnego, waty efektywne oznaczające rozkład mocy promienistej ocenionej za pomocą względnej widmowej skuteczności cyrkadialnej $C(\lambda)$.

Związek pomiędzy strumieniem cyrkadialnym a strumieniem świetlnym może być wyrażony za pomocą zależności (3). W ten sam sposób można przedstawić związek pomiędzy innymi wielkościami fotometrycznymi i cyrkadialnymi.

$$\frac{\Phi_c}{\Phi} = \frac{K \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} C(\lambda) d(\lambda)}{K_m \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d(\lambda)} \quad (3)$$

Współczynnik oddziaływania cyrkadialnego a_{cv} [1] (4) podaje stosunek pomiędzy wielkościami cyrkadialnymi (tutaj pomiędzy strumieniami) i fotometrycznymi.

$$a_{cv} = \frac{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} C(\lambda) d(\lambda)}{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d(\lambda)} \quad (4)$$

Pomiędzy wielkościami cyrkadialnymi promienistymi X_{ec} (strumień cyrkadialny będzie wtedy wyrażony w watach efektywnych [W_{ef}]), a wielkościami fotometrycznymi X_v zachodzi związek (5).

$$X_{ec} = \frac{a_{cv}}{K_m} X_v \quad (5)$$

TABELA 1

Wartości współczynnika oddziaływania cyrkadialnego a_{cv} dla różnych źródeł promieniowania

Źródło promieniowania	Wartość współczynnika oddziaływania cyrkadialnego a_{cv}
Słońce	0,83
Zachmurzone niebo	1,73
Bezchmurny nieboskłon	1,02
Księżyc	0,62
Żarówka	0,40
Lampa sodowa	0,21
Świetlówka w barwie:	
- ciepłej	0,36
- neutralnej białej	0,60
- dziennej	1,18
- Biolux	1,00 – 1,15
LED, barwa niebieska	6,90
LED, barwa biała	1,0 – 2,0

W tabeli 1 podano wartości współczynnika oddziaływania cyrkadialnego a_{cv} dla różnych źródeł promieniowania charakteryzujących się odmiennymi rozkładami widmowych [1].

Źródła z większym udziałem niebieskiej części widma (zachmurzone niebo, świetlówki o chłodnej barwie) mają większe wartości współczynnika a_{cv} i są bardziej skuteczne w pobudzaniu światłoczułych komórek zwojowych (ipRGCs).

Stosując analogię do definicji współczynnika odbicia strumienia świetlnego ρ można wprowadzić zależność opisującą współczynnik odbicia strumienia cyrkadialnego ρ_c (6).

$$\rho_c = \frac{\Phi_{c\rho}}{\Phi_c} = \frac{K \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} \rho_{\lambda} C(\lambda) d(\lambda)}{K \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} C(\lambda) d(\lambda)} \quad (6)$$

gdzie: $\Phi_{c\rho}$ – strumień cyrkadialny odbity.

Znany jest również inny sposób wyznaczania efektywnych wielkości energetycznych. Strumień cyrkadialny Φ_{cv} definiowany może być [1] zależnością (7), w której zastosowano wielkość K_m jako największą wartość widmowej skuteczności świetlnej równą 683 [lm W^{-1}], a $\Phi_{e\lambda}$ jest rozkładem widmowym strumienia energetycznego [W m^{-1}].

$$\Phi_{cv} = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} C(\lambda) d(\lambda) \quad [\text{lm}_c] \quad (7)$$

Zazwyczaj przy definiowaniu strumienia efektywnego danego promieniowania stosuje się stałą K równą 1 [1, 4]. Wtedy wartość strumienia wyrażona jest w watach efektywnych [W_{ef}] [4]. Jednostką strumienia cyrkadialnego jest strumień świetlny cyrkadialny [lm_c]. Stała K_m i przymiotnik świetlny związany był do tej pory z układem wielkości fotometrycznych. Wprowadzenie tych pojęć do opisu wielkości cyrkadialnych może być tłumaczone potrzebą uchwycenia ich względnych zmian w stosunku do wielkości fotometrycznych (świetlnych). Przyjmując ten tok rozumowania, można wprowadzić kolejne wielkości, takie jak np. cyrkadialne natężenie oświetlenia E_{cv} (jako stosunek strumienia cyrkadialnego Φ_{cv} do pola powierzchni S), którego jednostką będą efektywne luksy (lx_c).

3. OBLICZANIE ROZKŁADÓW CYRKADIALNEGO NATĘŻENIA OŚWIETLENIA

Obliczanie rozkładów cyrkadialnego natężenia oświetlenia we wnętrzach wiąże się z koniecznością uwzględnienia wielokrotnych odbić strumienia pomiędzy powierzchniami tworzącymi wnętrze. W przypadku występowania materiałów selektywnych, których własności fotometryczne są funkcją długości fali, należy przeprowadzić obliczenia z uwzględnieniem wielkości widmowych w zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego, tzn. rozkładów widmowych strumieni lamp i widmowych współczynników odbicia. Po każdym elementarnym odbiciu promieniowania od materiału selektywnego zmienia się rozkład widmowy tego promieniowania. Jeżeli rozpatrujemy wielokrotne odbicia zachodzące pomiędzy materiałami selektywnymi, to zmiana rozkładu widmowego promieniowania powoduje również zmianę całkowitego współczynnika odbicia (6) tych materiałów.

Wykonano przykładowe obliczenia za pomocą metody śledzenia promienia odwrotnego [5], wykorzystując program *rtrace*, który wchodzi w skład pakietu Radiance [5] i realizuje proces śledzenia poprzez wyznaczanie punktów przecięć promieni z powierzchniami w przestrzeni. Zakres widzialny promieniowania elektromagnetycznego podzielono na dziewięć przedziałów $\Delta\lambda$, dla których obliczono (jako średnie arytmetyczne) wartości względnej widmowej skuteczności świetlnej $V(\Delta\lambda)$ oraz względnej widmowej skuteczności cyrkadialnej $C(\Delta\lambda)$ (tabela 2).

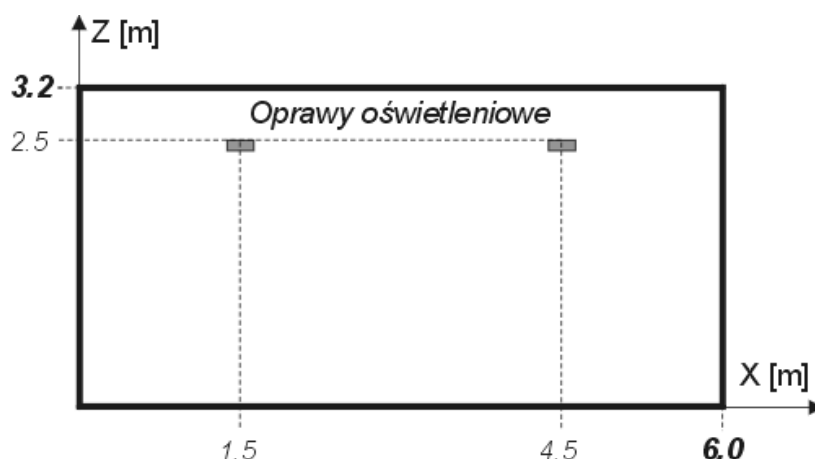
TABELA 2

Przyjęte na potrzeby wykonania obliczeń granice przedziałów w zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego

Lp	$\Delta\lambda$ [nm]	Nazwa przedziału	$V(\Delta\lambda)$	$C(\Delta\lambda)$
1	380-415	B3	0,000441	0,076750
2	415-455	B2	0,019150	0,793000
3	455-495	B1	0,124505	0,916500
4	495-535	G3	0,599500	0,450500
5	535-575	G2	0,973988	0,068000
6	575-625	G1	0,628400	0,001400
7	625-675	R3	0,128000	0,000000
8	675-725	R2	0,006490	0,000000
9	725-780	R1	0,000166	0,000000

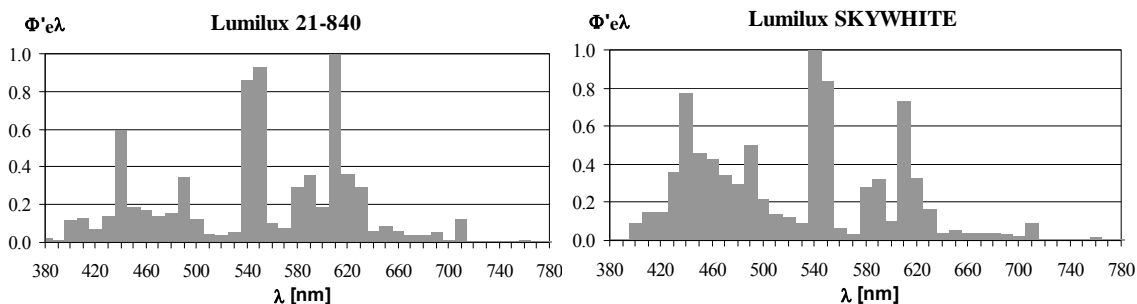
Realizacja obliczeń wymagała stworzenia kilku grup programów, których zadaniem było: przygotowanie danych do obliczeń, uruchomienie obliczeń oraz przedstawienie wyników.

Obliczono rozkłady widmowych strumieni energetycznych $\Phi_{e\lambda}$ na wszystkich powierzchniach w analizowanym wnętrzu. Na ich podstawie oraz korzystając ze wzorów (1, 2, 7) i definicji natężenia oświetlenia i natężenia napromienienia, obliczono na powierzchni podłogi rozkłady natężenia oświetlenia E [lx] oraz cyrkadialnego natężenia oświetlenia E_{cv} [lx_c] i cyrkadialnego natężenia napromienienia E_c [W_{ef} m⁻²]. Obliczenia wykonano dla układu prostokątnego pomieszczenia o następujących wymiarach: długość: 6 m, szerokość: 4 m, wysokość: 3,2 m (rys. 2).



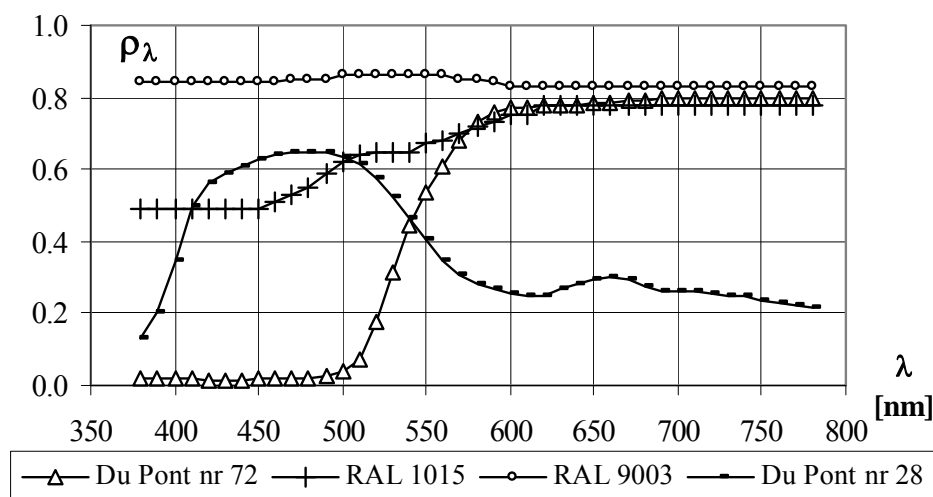
Rys. 2. Model pomieszczenia, dla którego wykonano obliczenia

Na wysokości $h = 2,5$ m rozmieszczono równomiernie dwie oprawy oświetleniowe ze świetłówkami dla pierwszego przykładu – Lumilux 58W/21-840 5200 lm oraz dla drugiego przykładu – Lumilux Skywhite 58W 4900 lm (w obliczeniach uwzględniono rozkład widmowy świetłówek, rysunek 3). Współczynnik oddziaływania cyrkadialnego a_{cv} dla świetłówki Lumilux 58W/21-840 ma wartość 0,55, a dla świetłówki Lumilux Skywhite 58W ma wartość 0,99.



Rys. 3. Rozkład widmowy świetłówki Lumilux 21-840 oraz Lumilux Skywhite

Uwzględniono dwa warianty, w których raz oprawy świecą w górę (oświetlenie pośrednie), a raz w dół (oświetlenie bezpośrednie). Obliczenia wykonano dla czterech selektywnych materiałów pokrywających wszystkie powierzchnie wnętrza (rys. 4). Przyjęto, że materiały charakteryzują się odbiciem idealnie rozproszonym.



Rys. 4. Widmowe współczynniki odbicia próbek farb z katalogu firmy Du Pont oraz próbek barwnych z atlasu barw RAL

Wartości całkowitych współczynników odbicia strumienia świetlnego ρ i strumienia cyrkadialnego ρ_c , obliczone dla rozkładu widmowego świetlówki Lumilux 58W/21-840 oraz Lumilux Skywhite 58W, przedstawiono w tabeli 2. Obliczono rozkłady natężenia oświetlenia E oraz cyrkadialnego natężenia oświetlenia E_{cv} [lx_c] i cyrkadialnego efektywnego natężenia E_c [$\text{W}_{\text{ef}} \text{m}^{-2}$] na powierzchni podłogi, na podstawie których wyznaczono wartości średnie. Obliczono również wartości natężenia oświetlenia E_p oraz cyrkadialnego natężenia oświetlenia E_{cv-p} [lx_c] i cyrkadialnego efektywnego natężenia E_{c-p} [$\text{W}_{\text{ef}} \text{m}^{-2}$] na płaszczyźnie pionowej dla obserwatora umieszczonego w środku pomieszczenia dla kierunku obserwacji wzdłuż pomieszczenia (tabela 3).

Znaczne różnice pomiędzy wartościami natężenia oświetlenia E oraz cyrkadialnego natężenia oświetlenia E_{cv} dotyczą przypadku oświetlenia pośredniego, gdzie uwidacznia się wpływ charakterystyk zastosowanych materiałów. Duża selektywność charakterystyk (szczególnie dla materiałów Du Pont 72 i Du Pont 28) przy danym rozkładzie widmowym lampy powoduje uzyskanie znacznych różnic w wartościach współczynników odbicia. Różnice uzyskane dla oświetlenia bezpośredniego wynikają głównie z różnic pomiędzy strumieniami świetlówki: świetlnym i cyrkadialnym. Przedstawione wyniki pokazują, że przy projektowaniu systemów oświetlenia mających wywoływać określone skutki cyrkadialne, należy brać pod uwagę nie tylko właściwości zastosowanych

lamp, ale również właściwości materiałów pokrywających powierzchnie we wnętrzach. Jednocześnie badania pokazują, że dla skutecznego tłumienia melatoniny niezbędne jest uzyskanie natężenia oświetlenia na powierzchni oka o wartości co najmniej 1000 luksów [10]. Wtedy po około 20 minutach obserwuje się zmniejszenie poziomu melatoniny o 25%. Jeżeli poziom natężenia oświetlenia wynosi około 200 luksów, to niezależnie od czasu ekspozycji, poziom melatoniny nigdy nie zmniejszy się o więcej niż 25%. Obserwując uzyskane wyniki można zauważyć, że obliczone poziomy natężenia oświetlenia nie zapewniają skutecznego tłumienia melatoniny.

TABELA 3

Obliczone wartości współczynników odbicia oraz natężenia oświetlenia i cyrkadialnego natężenia oświetlenia

Pierwsza wartość dla Lumilux21840 / druga wartość dla Lumilux Skywhite		Du Pont 72 barwa pomarańczowa	RAL 1015 barwa beżowa	RAL 9003 barwa biała	Du Pont 28 barwa szaroniebieska
ρ		0,57 / 0,51	0,69 / 0,68	0,85 / 0,85	0,38 / 0,41
ρ_c		0,07 / 0,05	0,54 / 0,53	0,84 / 0,85	0,60 / 0,61
Oświetlenie pośrednie	E [lx]	214 / 178	259 / 234	490 / 464	75 / 81
	E_{cv} [lx _c]	8 / 9	71 / 119	239 / 406	88 / 154
	E_c [W _{ef} m ⁻²]	0,006 / 0,013	0,057 / 0,172	0,192 / 0,588	0,071 / 0,223
	E_p [lx]	200 / 166	243 / 219	475 / 451	64 / 70
	E_{cv-p} [lx _c]	7 / 8	64 / 107	232 / 394	81 / 141
	E_{c-p} [W _{ef} m ⁻²]	0,006 / 0,012	0,052 / 0,155	0,187 / 0,571	0,065 / 0,204
Oświetlenie bezpośrednie	E [lx]	469 / 419	514 / 475	780 / 741	326 / 317
	E_{cv} [lx _c]	139 / 233	194 / 328	384 / 651	212 / 364
	E_c [W _{ef} m ⁻²]	0,112 / 0,338	0,156 / 0,475	0,309 / 0,944	0,171 / 0,528
	E_p [lx]	485 / 432	535 / 494	809 / 769	329 / 322
	E_{cv-p} [lx _c]	133 / 221	201 / 339	398 / 675	220 / 378
	E_{c-p} [W _{ef} m ⁻²]	0,107 / 0,320	0,162 / 0,491	0,320 / 0,978	0,177 / 0,548

4. WNIOSKI

W oświetleniu wewnątrz należy spodziewać się dużych różnic pomiędzy wartościami natężenia oświetlenia i cyrkadialnego natężenia oświetlenia w związku z różnicami, jakie mogą dotyczyć strumieni i współczynników odbicia

(fotometrycznych i cyrkadialnych). W prezentowanych przykładach zazwyczaj następował spadek wartości wielkości cyrkadialnych w stosunku do wielkości fotometrycznych. Obliczenia wykonywane z udziałem wielokrotnych odbić dla materiałów selektywnych muszą być wykonywane z wykorzystaniem wielkości widmowych, a nie całkowitych [6]. Jednocześnie należy zauważyć, że w typowych wnętrzach uzyskiwane zazwyczaj poziomy natężenia oświetlenia (w tym cyrkadialnego natężenia oświetlenia) nie umożliwiają skutecznego tłumienia poziomu melatoniny.

LITERATURA

1. Gall D.: Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums. Teil 2: Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung.
2. Brainard G.C. i inni: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *Journal of Neuroscience*, 21 (2001) 16, s. 6405-6412.
3. Thapan K.: An action Spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology* 535 (2001) 1, s. 261-267
4. Kędziora W.: Skuteczność fotobiologiczna promieniowania temperaturowego. IV Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice, Poznań/Kiekrz, 12-14 kwietnia 1999, s. 465-467.
5. Wandachowicz K.: Wyznaczanie rozkładu luminancji we wnętrzach z uwzględnieniem kierunkowo-rozproszonych charakterystyk odbiciowych materiałów. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, 2000.
6. Wandachowicz K., Hauser J.: Obliczanie rozkładu natężenia oświetlenia dla materiałów selektywnych z uwzględnieniem wielokrotnych odbić. VI Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice, Poznań/Kiekrz, 23-25 kwietnia 2001.
7. Wandachowicz K.: Calculation of the circadian illuminance. Konferencja oświetleniowa krajów Grupy Wyszehradzkiej Lumen V4. Balatonfüred 27-29.09.2006.
8. Lok C.: Vision science: Seeing without seeing, *Nature* 469/2011 (7330): 284-5.
9. Blask D., Brainard G., Dauchy R., Hanifin J., Davidson L., Krause J., Lynch D., Sauer L., Jasser S.: Melatonin suppression by ocular light exposure during darkness: Impact on cancer growth and implications for cancer risk in humans. *Proceedings of the CIE Symposium '04, Light and Health: non-visual effects*, 30.09-2.10.2004, Austria.
10. Rea M.S.: Light-much more than vision. *Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium: Palo Alto, CA: The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute*, 1-15, 2002.

CALCULATION OF THE DISTRIBUTION OF CIRCADIAN QUANTITIES

Krzysztof WANDACHOWICZ

ABSTRACT *New circadian photoreceptors are able to regulate natural body clock. Using spectral circadian efficiency function it is possible to define circadian quantities. Calculation of circadian illuminance distribution using interreflections can be done using spectral values of reflectance and spectral distribution of radiation.*

Keywords: *circadian cycle, illuminance distribution calculation*

Dr inż. Krzysztof WANDACHOWICZ – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, specjalność: Technika Świetlna. Od 2002 r. adiunkt Zakładu Techniki Świetlnej i Elektrotermii Politechniki Poznańskiej. W kręgu zainteresowań zawodowych znajdują się zagadnienia dotyczące zastosowania metod optymalizacji w technice świetlnej, budowy i badania sprzętu oświetleniowego oraz obliczania rozkładów wielkości promienistych z zastosowaniem metody śledzenia promienia. Wyniki prac badawczych publikowane i prezentowane są na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz w czasopiśmie naukowych.



