

## METODY POMIARU WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCYCH PROMIENIOWANIE OPTYCZNE CZYNNIE CYRKADIALNIE

Piotr JAKUBOWSKI<sup>1</sup>, Irena FRYC<sup>2</sup>

1. Członek Polskiego Komitetu Oświateniowego SEP  
tel.: +857469407 e-mail: piotr.7akubowski@gmail.com
2. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Światłowej  
tel.: +857469407 e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki badań dotyczących opracowania konstrukcji układu pomiarowego służącego do wyznaczania parametrów energetycznych promieniowania optycznego w zakresie czynnym cyrkadialnie tj. w zakresie pobudzania receptorów ip-RGC w ludzkim oku. W związku z tym, że obecnie nie istnieją komercyjnie dostępne przyrządy pomiarowe dedykowane do charakteryzowania tych wielkości, wskazane zostały metody pomiarowe użyteczne w tego rodzaju metrologii promieniowania optycznego. Przedstawiono również wyniki badań własnych dotyczących wyznaczania wartości błędu względnego współczynnika przepuszczania zestawu filtrów korekcyjnej barwnej zapewniających dopasowanie czułości detektora krzemowego do krzywej skuteczności widmowej melanopsyny. Ponadto przedstawiono wyniki pomiarów wpływu kąta padania promieniowania na detektor.

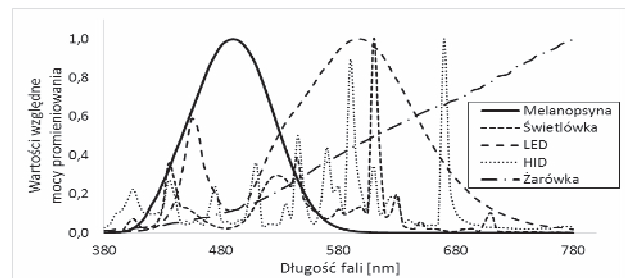
**Słowa kluczowe:** światło, promieniowanie czynne cyrkadialnie, miernictwo promieniowania optycznego.

### 1. WSTĘP

Widzenie spowodowane jest oddziaływaniem światła na czopki i pręciki rozmieszczone na siatkówce oka. Jednakże nie wszystkie długości fal są odbierane przez narząd wzroku w sposób jednakowy. Funkcja skuteczności widmowej widzenia fotonowego  $V(\lambda)$ , stała się punktem odniesienia dla fotometrii. W oparciu o wielkości fotometryczne zdefiniowane zostały wymogi normatywne dotyczące oświetlenia [1]. W zależności od aplikacji może być to natężenie oświetlenia, luminancja, równomierność oraz współczynnik olśnienia. Ponadto światło z zakresu widmowego od około 400 nm do 600 nm nie tylko umożliwia widzenie, ale oddziałuje również na odkryte w 2001 roku w ludzkim oku światłoczułe komórki zwojowe ip-RGC [2, 3]. W komórkach ip-RGC znajduje się światłoczuły barwnik melanopsyna, której krzywa skuteczności widmowej została przedstawiona na rysunku 1. Pobudzenie tych komórek nie powoduje efektu widzenia, ale odpowiada za regulację fizjologicznych procesów okołodobowych człowieka. Udokumentowane zostały przykłady negatywnych efektów zdrowotnych w sytuacjach zaburzenia tych procesów [4].

Ogólnoswiatowe trendy dotyczące racjonalnego korzystania z zasobów naturalnych oraz wymagania dotyczące ograniczania zużycia energii elektrycznej powodują, że jednym z kluczowych parametrów

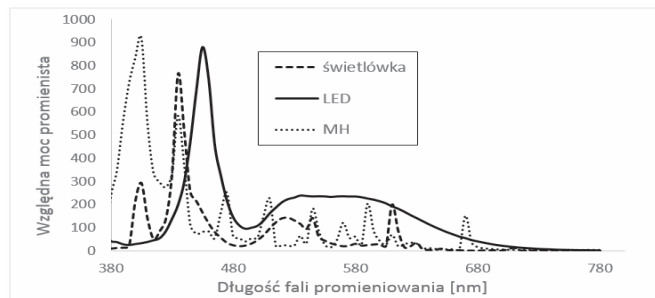
decydującym o stosowaniu źródła światła jest skuteczność świetlna. Wielkość ta informuje o tym, jaki strumień świetlny emituje dana lampa z dostarczonego wata energii elektrycznej (lm/W). Energooszczędne źródła światła znajdują szerokie zastosowanie w oświetleniu szkół, szpitali, przestrzeni biurowych, ulic, powierzchni handlowych, magazynowych, produkcyjnych jak również w domach. Pomimo, że bardzo często charakteryzują się one tą samą lub podobną wartością temperatury barwowej najbliższej, strumienia świetlnego lub/i wskaźnika oddawania barw, to ich rozkład widmowy mocy promieniowania jest różny (rys. 1). W przypadku lamp wyładowczych oraz LED istotna część mocy jest emitowana w obrębie fal odpowiadających za pobudzanie receptorów ip-RGC i jest ona kilkukrotnie wyższa niż w przypadku źródeł żarówek (rys. 2).



Rys. 1. Względny rozkład mocy promieniowania różnych źródeł światła w stosunku do rekomendowanej przez CIE krzywej skuteczności widmowej melanopsyny [8]

Współcześnie nie jesteśmy w stanie uniknąć ekspozycji na promieniowanie optyczne sztucznych źródeł światła z zakresu czynnego cyrkadialnie. Spotykamy je we wszystkich obszarach ludzkiej egzystencji. W związku z tym pomiar jedynie fotometrycznych parametrów oświetleniowych jest niewystarczający do pełnej oceny instalacji oświetleniowych. Jednakże nie istnieją dostępne handlowo przyrządy przeznaczone do pomiaru parametrów charakteryzujących promieniowanie optyczne odpowiedzialne za pobudzenie receptorów ip-RGC tj. w zakresie czynnym cyrkadialnie ani też nie ma opracowanych metod i zaleceń pomiarowych dotyczących metrologii tych wielkości. Należy zatem opracować zalecenia dotyczące metod przeprowadzania tego rodzaju pomiarów oraz miernik umożliwiający pomiary wielkości

charakteryzujących promieniowanie optyczne czynne cyrkadialnie.



Rys. 2. Iloraz wartości mocy promieniowania różnych źródeł światła do wartości emitowanych przez źródło żarowe

## 2. PROMIENIOWANIE CZYNNE CYRKADIALNIE

Określanie wpływu promieniowania czynnego cyrkadialnie na organizm człowieka jest zagadnieniem trudnym i bardzo złożonym, ale literatura tego tematu jest bardzo bogata. Promieniowanie czynne cyrkadialnie wpływa na aktywność kory mózgowej, łagodzi efekty depresji w okresach jesienno-zimowych, reguluje długość i jakość snu, wspomaga leczenie choroby Alzheimera, podnosi wydajność pracowników nocnych zmian oraz wspomaga rozwój wcześniaków. Proces pobudzania światłoczułych receptorów ip-RGC jest skomplikowany i w odniesieniu do ludzi może prowadzić zarówno do efektów pozytywnych jak i negatywnych. Efekty wywołane tym promieniowaniem zależą od wielu czynników: natężenia napromienienia, rozkładu przestrzennego, pory doby oraz czasu trwania bodźca jak również od wieku osoby poddanej jego działaniu oraz cech osobniczych [4]. Pomimo, iż poziomy omawianego promieniowania nie są ujęte w żadnych wymogach normatywnych, to są prowadzone prace zmierzające w tym kierunku. W Niemczech to zagadnienie techniki świetlnej, jest umiejscowione w dokumentach: DIN SPEC 5031-100 oraz DIN SPEC 67600:2013. Powstały tam też grupy robocze, których działalność polega na pracach zmierzających do umieszczenia w europejskich normach zapisów dotyczących projektowania i eksploatacji instalacji oświetleniowych z uwzględnieniem wymagań odnośnie wartości charakteryzujących promieniowanie czynne cyrkadialnie. Na potrzebę metrologii promieniowania czynnego cyrkadialnie zwraca uwagę Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE w opracowanym w 2016 roku dokumencie „Research Strategy”. Wyznaczanie wielkości czynnych cyrkadialnie jest również rekomendowane w dokumencie CIE TN003-2015 [5], w którym zaleca się badanie emitowanego przez źródła światła promieniowania elektromagnetycznego w zakresie ok. (400÷600) nm z uwzględnieniem skuteczności widmowej melanopsyny. Ponadto, światowe wiodące ośrodki naukowe zajmujące się techniką świetlną (między innymi Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute, USA, Helsinki University of Technology Centre for Metrology oraz Accreditation Metrology Research Institute) również zajmują się tym zagadnieniem. Badanie w instalacjach oświetleniowych parametrów promieniowania czynnego cyrkadialnie jest też obiektem zainteresowań stowarzyszenia Human Centric Lighting Society oraz światowych producentów sprzętu oświetleniowego (np. Philips, Osram). W literaturze tematu przyjęły się już pewne wielkości metrologii cyrkadialnej, które odnoszą moc promieniowania emitowanego przez

źródło w zakresie widzialnym do mocy emitowanej w zakresie skuteczności widmowej receptorów ip-RGC z uwzględnieniem krzywej  $V(\lambda)$ . W innym sposobie oceny za punkt odniesienia przyjmuje się rozkład widmowy promieniowania dziennego D65 [6]. Najnowsze zalecenia CIE stanowią jednak, że wynik pomiaru powinien być jak najbliższy wielkości mierzonej, zatem nie powinien uwzględniać dodatkowych czynników, takich jak na przykład odpowiedź organizmu w postaci ilości wydzielonej melatoniny. Międzynarodowa Organizacja Oświetleniowa CIE zaleca pomiar mocy emitowanej przez dane źródło światła z uwzględnieniem znormalizowanej krzywej skuteczności widmowej melanopsyny. Wyniki pomiaru powinny być wyrażane w jednostkach radiometrycznych z zaznaczeniem, że dotyczą melanopsyny (ang.: melanopic flux, melanopic irradiance)

## 3. METODY POMIARU PROMIENIOWANIA CZYNNEGO CYRKADIALNIE

Pomimo dużej wagi problemu i szerokiego zainteresowania różnych środowisk, nie powstały do tej pory komercyjnie dostępne przyrządy do pomiaru promieniowania czynnego cyrkadialnie. Stworzone zostały eksperymentalne dozymetry [7], ale ich twórcy zwracają uwagę na podstawowe wady, którymi są między innymi: niedoskonałości dopasowania widmowego fotodetektora oraz problemy z odpowiednim skorygowaniem przestrzennym głowicy pomiarowej. W związku z tym należy prowadzić dalsze prace badawcze w tym kierunku z uwzględnieniem wiedzy dotyczącej pomiarów klasycznych wielkości świetlnych.

### 3.1. Spektroradiometr z monochromatorem

Dane dotyczące rozkładu widmowego źródeł światła oraz funkcja skuteczności widmowej melanopsyny umożliwiają precyzyjnie wyznaczanie wielkości cyrkadialnych. Rozkład widmowy mocy promieniowania wyznaczony z użyciem spektroradiometru laboratoryjnego umożliwia uzyskanie wyników o największej dokładności (układ z podwójnym monochromatorem zapewnia bardzo niski poziom światła rozproszonego). Pomimo niewątpliwych zalet, nie jest to jednak przyrząd optymalny w przypadku pomiarów promieniowania czynnego cyrkadialnie. Urządzenie to jest stacjonarne i odznacza się długim lub bardzo długim czasem pomiaru. Badania promieniowania czynnego cyrkadialnie powinny mieć charakter środowiskowy, czyli należałoby je prowadzić w oświetlanych przestrzeniach, gdzie natężenie napromienienia w danym punkcie jest wynikiem nałożenia się strumieni padających z różnych źródeł i z różnych kierunków. Ponadto spektroradiometr laboratoryjny odznacza się bardzo wysokim kosztem zakupu i jest skomplikowany w obsłudze (wymaga wykwalifikowanego personelu), co dodatkowo ogranicza możliwości jego stosowania w tego typu pomiarach.

### 3.2. Spektroradiometr kompaktowy

Alternatywną metodą jest użycie spektroradiometru kompaktowego. W obecnych czasach urządzenia te zdobywają coraz większą popularność, gdyż umożliwiają analizę rozkładu widmowego promieniowania, co do niedawna było możliwe jedynie w warunkach laboratoryjnych. W stosunku do możliwości – przyrządy te odznaczają się niewygórowanym kosztem, mają krótki czas

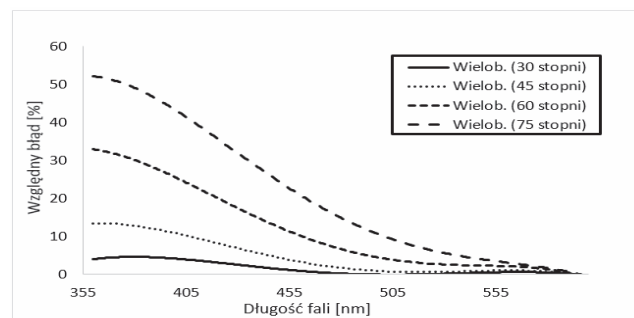
pomiaru i niewielkie rozmiary, dzięki czemu nadają się do pomiarów środowiskowych. Często posiadają interfejs przyjazny użytkownikowi, umożliwiającą obsługę przez niezbyt wykwalifikowany personel. Podobnie jak w przyrządach laboratoryjnych – funkcje skuteczności widmowych są realizowane matematycznie, więc problem błędu niedopasowania widmowego w zasadzie nie istnieje. Poważną wadą takich konstrukcji jest jednak wysoki poziom światła rozproszonego rzędu od  $10^{-4}$  do nawet  $10^{-3}$  wartości względnej sygnału wejściowego dla danej długości fali. Pomimo, że wartości te wydają się być niewielkie, to światło rozproszone nakłada się na sygnał mierzony w szerokim paśmie, co prowadzi do kumulowania się błędów [8]. Obecność światła rozproszonego jest związana z konstrukcją tego rodzaju przyrządów, dlatego ograniczenie jego ilości jest bardzo trudne. Przeważnie używa się matematycznych algorytmów kompensacyjnych. Oszacowanie błędów i całkowita jego kompensacja nie jest jednak możliwa, gdyż błąd ten zależy od rozkładu widmowego mierzonego sygnału.

### 3.3. Przyrząd ze skorygowanym detektorem szerokopasmowym

Urządzenia tego typu odznaczają się krótkim czasem pomiaru, intuicyjną obsługą i są mobilne. Na rynku dostępne są przyrządy o wysokiej klasie dokładności, które znajdują zastosowanie w pomiarach laboratoryjnych zaś wyniki ich pomiarów stanowią podstawę do oceny czy dana instalacja oświetleniowa spełnia odpowiednie regulacje prawne (urządzenia certyfikowane z ważnym świadectwem wzorcowania). W przypadku tych urządzeń nie występuje problem światła rozproszonego, ale kluczowe znaczenie dla wyniku pomiaru odgrywa jakość dopasowania widmowego i przestrzennego głowicy pomiarowej [9, 10]. Parametry te decydują o klasie przyrządu, a co za tym idzie – determinują jego cenę, która może przyjmować wartości w bardzo szerokim zakresie.

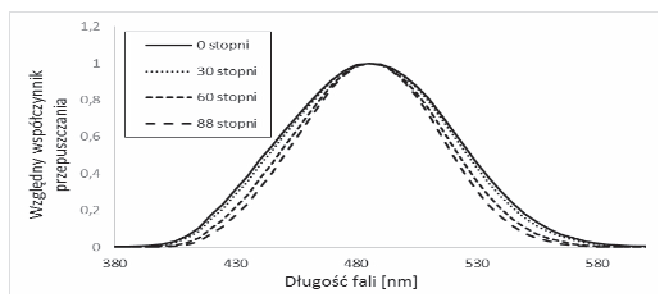
Dobór właściwego detektora stanowi podstawę jakichkolwiek dalszych rozważań na temat stosowania tej metody przy pomiarze promieniowania czynnego cyrkadialnie. Element ten powinien odznaczać się wysoką czułością w mierzonym zakresie, a ponadto powinien zachowywać swoje parametry elektro–optyczne przez długi czas, co pozwoli na wydłużenie okresu pomiędzy procesami wzorcowania.

Kluczowym aspektem wpływającym na dokładność wyniku pomiaru jest dopasowanie spektralne do krzywej skuteczności widmowej melanopsyny. Tym niemniej, nawet idealne dopasowanie czułości widmowej detektora dla kąta padania  $0^\circ$  (prostopadle do powierzchni czołowej) nie gwarantuje niskiej wartości błędów pomiaru, ponieważ w przypadku gdy promieniowanie będzie padało pod innym kątem, rośnie wartość strumienia odbitego od jego powierzchni czołowej, a co tym idzie mniejsza ilość promieniowania wnika do jego struktury. Rysunek 3 przedstawia względny błąd pomiaru natężenia napromienienia, obliczony na podstawie pomiarów przeprowadzonych przez autorów. Pomiar wykonany został w ciemni fotometrycznej z użyciem wzmacniacza lock-in w celu wyeliminowania wpływu światła pochodzącego z otoczenia. Jako źródło światła wykorzystano lampę żarową zasilaną ze stabilizowanego źródła prądowego. W celu wyodrębnienia poszczególnych długości fal wykorzystany został monochromator.



Rys. 3. Względny błąd pomiaru natężenia napromienienia w funkcji długości fali przy różnych kątach padania promieniowania na detektor Hamamatsu S1227

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na błąd pomiaru jest większy stopień pochłaniania promieniowania padającego na filtr pod kątem innym niż normalny. Przy większych kątach padania, promieniowanie przebywa dłuższą drogę w filtrze przez co jest tłumione w większym stopniu, niż te padające pod kątem prostym. Dodatkowym źródłem błędów są straty wynikające z odbić Fresnela na granicy ośrodków. Czynniki te prowadzą do zniekształcenia charakterystyki widmowej głowicy. Na rysunku 4 przedstawiony został obliczony przez autorów model matematyczny widmowego współczynnika przepuszczania filtru współpracującego z detektorem krzemowym S1227-BQ (przy założeniu, że zestaw filtr i detektor zapewniają czułość widmową zgodną z krzywą skuteczności widmowej melanopsyny dla kąta padania  $0^\circ$ ). Na rysunku tym pokazano także zniekształcone charakterystyki widmowe takiego układu dla wybranych kątów padania promieniowania na głowicę.

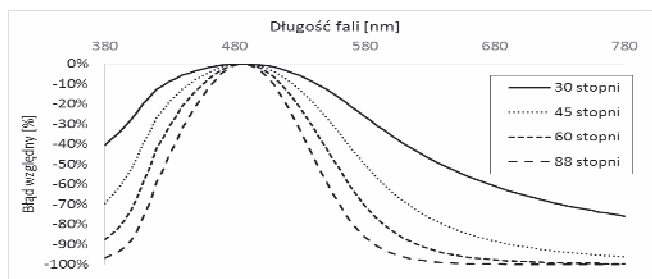


Rys. 4. Względny współczynnik przepuszczania filtrów korekcyjnych widmowej zapewniającej czułość widmową głowicy miernika zgodną z krzywą skuteczności widmowej melanopsyny w zależności od kąta padania promieniowania na zestaw filtrów

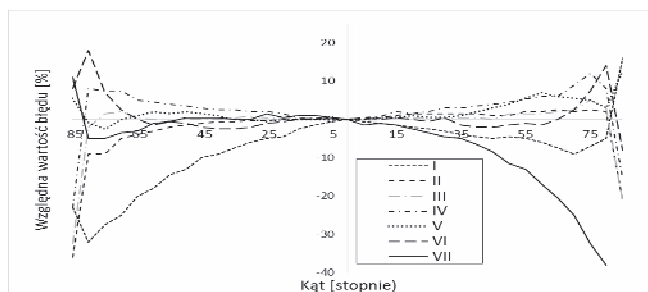
Na rysunku 5 został natomiast zilustrowany błąd względny współczynnika przepuszczania dla poszczególnych długości fal przy różnych kątach padania promieniowania na zestaw filtr i detektor. Oszacowanie wartości tego błędów metodą analogiczną do określania błędów  $f_1$  fotometrów [11] wymaga zmiany źródła odniesienia na inny iluminant (np. D65 [6]). W efekcie oszacowany błąd spowodowany skośnym padaniem promieniowania osiąga wartość ok. 8,93% przy kącie 30 stopni, 10,54% przy kącie 45 stopni, 13,80% przy kącie 60 stopni i nawet 18,87% przy kącie 88 stopni.

Bardzo ważną częścią toru optycznego głowicy pomiarowych jest element służący do korekcji kątowej. Jego zadaniem jest dopasowanie wartości odpowiedzi głowicy pomiarowej do funkcji cosinus. Dobór tego elementu powinien uwzględniać właściwości detektora oraz filtrów

korekcji przestrzennej. Obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym tego rodzaju korekcji jest rozpraszacz. Jednakże nie zapewnia on wiernego odwzorowania funkcji cosinus. Rysunek 6 przedstawia błąd niedopasowania przestrzennego względem funkcji cosinus dla siedmiu różnych głowic pomiarowych. W przypadku głowic I, II oraz III błąd przyjmuje wartości dodatnie w szerokim zakresie padania promieniowania. Natomiast w przypadku głowic VI oraz VII błąd ma wartość ujemną lub dodatnią w zależności od kierunku padania promieniowania. Ponadto rozpraszacze odznaczają się wysoką wartością współczynnika pochłaniania, co utrudnia lub uniemożliwia pomiar sygnałów o małych wartościach.



Rys. 5. Błąd względny współczynnika przepuszczania zestawu filtr - detektor w funkcji długości fali promieniowania padającego pod różnymi kątami



Rys. 6. Błąd niedopasowania przestrzennego względem funkcji cosinus, na przykładzie różnych głowic fotometrycznych [14]

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie analizy metod pomiarowych wykazano, iż przyrządy z właściwie skorygowaną głowicą pomiarową z detektorem szerokopasmowym umożliwią ocenę poziomów promieniowania czynnego cyrkadialnie. Skonstruowanie takich urządzeń jest jednak wyzwaniem, gdyż poza doбором odpowiedniego detektora wymagane jest opracowania dedykowanych elementów toru optycznego, które zapewnią

akceptowalnie niskie wartości błędu niedopasowania widmowego i kąтового, zarówno dla światła padającego na głowicę prostopadle jak również pod większymi kątami (tj. opracowanie elementu o kształtowanych powierzchniach załamujących światło zamiast stosowania rozpraszacza).

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 12464-1: 2012. Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
2. Brainard, G. C. i inni: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor, *Journal of Neuroscience* vol. 21, 2001. 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* vol. 535, 2001, s. 261-267.
4. Rea M. S., Figueiro M. G., Bullough J. D.: Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research. *Light Research Technology* Vol. 34(3), 2002, s. 177-190.
5. CIE TN003:2015. Report on the First International Workshop on Circadian and neurophysiological Photometry, 2015.
6. Martin Aube M., Roby J., Kocifaj M.: Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility, *PLOS ONE*, vol. 8, 2013.
7. Bierman A., Terence R., Klein, Rea M. S.: The Daysimeter: a device for measurement optical radiation as a stimulus for the human circadian system, *Measurement Science and Technology*, Volume 16, Issue 11, 2005, s. 2292-2299.
8. Ohno, Y.: Spectral Color Measurement, *Colorimetry: Understanding the CIE System*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA 2007, s. 120 – 121.
9. Fryc I.: Spectral correction of detector used in illuminance measurements. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3820, Bellingham, Washington, 1999, s. 343-348.
10. Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J.: Analizy wybranych właściwości różnych typów luksomierzy, *Prace Instytutu Elektrotechniki zeszyt 268*, Łódź 2015, s. 84 – 99.
11. Publikacja CIE 69-1987 Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters.

### MEASUREMENTS TECHNIQUES OF CIRCADIAN RADIATION PARAMETERS

Modern light sources have very high efficacy, however they can also emit more radiation which might influence on circadian rhythm of human being. According to recommendations of many organizations and scientific institutions - further research on circadian radiation is highly required. As there are no commercially available instruments for this purpose - one of existing method of light measurement should be adopted. The article presents design assumptions and research results for development of a device for circadian active light measurement. Available measurement methods have been presented and errors sources have been discussed (spectral filter, detector and spatial correction element). Newly designed meter should meet additional requirements, such as mobility, easy use and reasonable cost. Thus not every measurement method will be optimal for this purpose. It seems, that meters with broadband detector should fulfill all requirements. Nevertheless, all components of light path in such device should be carefully considered to achieve the highest possible accuracy (i.e. light detector, spectral filter and spatial correction element).

**Keywords:** light, circadian radiation, optical radiation measurements.