

Andrzej PAWLAK  
Agnieszka WOLSKA

## PRAKTYCZNE ASPEKTY NIEDOPASOWANIA ZAKRESÓW SPEKTRALNYCH SOND POMIAROWYCH DO OBOWIĄZUJĄCYCH KRYTERIÓW OCENY ZAGROŻENIA NIELASEROWYM PROMIENIOWANIEM OPTYCZNYM

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono przykłady niedopasowania widmowej metody radiometrycznej stosowanej do wyznaczania poziomów ekspozycji na stanowiskach pracy zgodnie z obowiązującymi kryteriami oceny zagrożenia promieniowaniem optycznym w środowisku pracy. Na przykładzie badań porównawczych wykonanych spektroradiometrem OL 750 oraz radiometrem ILT 1400 z zestawem sond pomiarowych dedykowanych wybranym zagrożeniom promieniowaniem optycznym, przeanalizowano potencjalne różnice wskazań wynikające z niedopasowania widmowego stosowanych sond pomiarowych. Wykazano, że niedopasowanie widmowe sond pomiarowych przy wyznaczaniu poziomu ekspozycji dla zagrożenia fotochemicznego oczu i skóry promieniowaniem UV oraz termicznego siatkówki oka promieniowaniem VIS + IR-A w nieznacznym stopniu wpływa na wynik pomiaru. Natomiast w przypadku wyznaczania poziomu ekspozycji na promieniowanie UV-A stwierdzono niedoszacowanie wyników pomiaru wynoszące ok. 30%, które należałoby uwzględnić przy wyznaczaniu poziomu ekspozycji oczu na promieniowanie UV-A.*

**Słowa kluczowe:** *promieniowanie optyczne, pomiary radiometryczne, pomiary spektroradiometryczne, niedopasowanie spektralne sond pomiarowych*

---

**mgr inż. Andrzej PAWLAK, dr hab. inż. Agnieszka WOLSKA**  
email: [anpaw; agwol]@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Zakład Techniki Bezpieczeństwa  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 268, 2015

## 1. WSTĘP

Promieniowanie optyczne występuje jako naturalny składnik promieniowania słonecznego oraz wytwarzane jest w sposób sztuczny przez człowieka jako czynnik pożądany lub uboczny. Sztuczne promienniki wykorzystywane są w różnych procesach technologicznych, gałęziach przemysłu, czy pracach badawczych. Natomiast w niektórych przypadkach promieniowanie optyczne stanowi produkt uboczny działalności zawodowej człowieka (np. przemysł hutniczy, spawanie elektryczne, cięcie plazmowe itp.). Jednak w obu tych przypadkach może ono stanowić zagrożenie dla oczu i skóry pracowników, jeśli nadmierna jego ilość pada na ekspozowane tkanki pracownika. Ten fakt uwzględniła Dyrektywa 2006/25/WE [1] oraz rozporządzenia ją wdrażające [2, 3], z których wynika konieczność oceny narażenia pracowników na promieniowanie optyczne. Natomiast w celu określenia stopnia zagrożenia pracowników tym promieniowaniem, niezbędne jest wykonanie odpowiednich pomiarów, których ogólne zasady przedstawione są odpowiednio w normach: PN-T-06589:2002 [4] oraz PN-T-05687:2002 [5]. Natomiast szczegółowe informacje odnośnie metod pomiaru i oceny ekspozycji pracowników na promieniowanie optyczne zamieszczono w normach PN-EN 14255-1:2010 [6] oraz PN-EN 14255-2:2010 [7].

Na podstawie analizy norm [5 i 6] dotyczących pomiarów promieniowania nadfioletowego oraz norm [4 i 7] dotyczących pomiarów promieniowania widzialnego i podczerwonego, a także zestawionych w rozporządzeniu [3] wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE), można stwierdzić, że w celu wykonywania pomiarów wszystkich sprecyzowanych parametrów promieniowania optycznego, należy posiadać szerokopasmowy radiometr wyposażony w zestaw ośmiu sond pomiarowych odpowiednio dobranych do zakresu promieniowania oraz rozpatrywanego narażenia [9]. Przykładem takiego radiometru jest szerokopasmowy miernik, od niedawna bezpośrednio dostępny na naszym rynku – ILT 1400 produkcji International Light – USA (rys. 1). Z bogatej oferty sond pomiarowych firmy International Light można wybrać niezbędne do wykonania kompleksowej oceny narażenia na promieniowanie optyczne sondy pomiarowe, jednak niektóre z nich mają pewne mankamenty.

Najbardziej zauważalne są one przy pomiarach dotyczących fotochemicznego zagrożenia soczewki oka w zakresie UV-A (315÷400 nm) ze względu na rozbieżności



Rys. 1. Widok miernika ILT 1400 z przykładowymi sondami pomiarowymi

przebiegu charakterystyk sondy pomiarowej (rys. 7), która zgodnie z wymaganiami rozporządzenia [3] powinna być nieselektywna. Jeszcze w dwu innych przypadkach mogą wystąpić pewne rozbieżności związane z niedopasowaniem widmowym sond pomiarowych przy wyznaczeniu poziomu ekspozycji dla zagrożenia fotochemicznego oczu i skóry promieniowaniem UV (180÷400 nm) oraz termicznego siatkówki oka promieniowaniem VIS + IR-A (380÷1 400 nm).

W związku z tym, celem artykułu jest przedstawienie wpływu niedopasowania widmowego wybranych sond pomiarowych na wyniki pomiaru poziomów ekspozycji na nielaserowe promieniowanie optyczne wykonywanych z wykorzystaniem radiometru ILT 1400. Niedopasowanie to zostało określone na podstawie analizy wyników pomiarów promieniowania optycznego emitowanego przez wzorcową lampę halogenową wykonanych metodą spektrometryczną i radiometryczną. Na tej podstawie określono procentowe różnice wskazań pomiaru radiometrycznego w przypadku ocenianych zagrożeń fotochemicznych oczu i skóry promieniowaniem UV i zagrożenia termicznego siatkówki oka promieniowaniem VIS + IR-A.

## 2. METODA BADANIA

---

Badania wykonano w laboratorium pracowni Promieniowani Optycznego CIOP-PIB w warunkach ciemni fotometrycznej. Do badań użyto wzorcowej lampy halogenowej OL 200 IR i systemu spektrometrycznego OL 750 (rys. 2, 3 i 4) firmy Optronic Laboratories oraz radiometru szerokopasmowego ILT 1400 produkcji International Light (rys. 1). Widmo wzorcowej lampy halogenowej OL 200 IR w zakresie nadfioletu przedstawiono na rysunku 15.

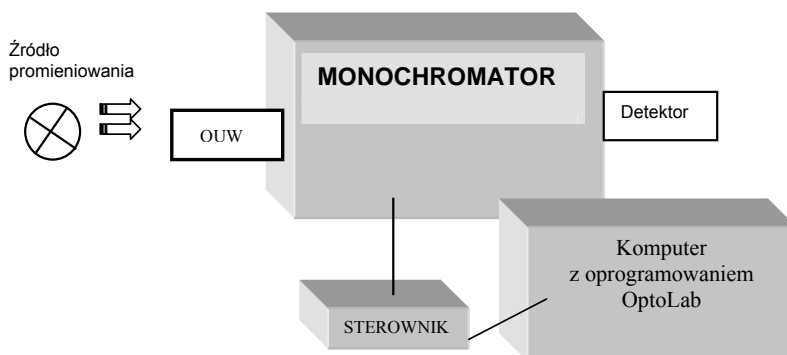
### 2.1. Metoda spektrometryczna

---

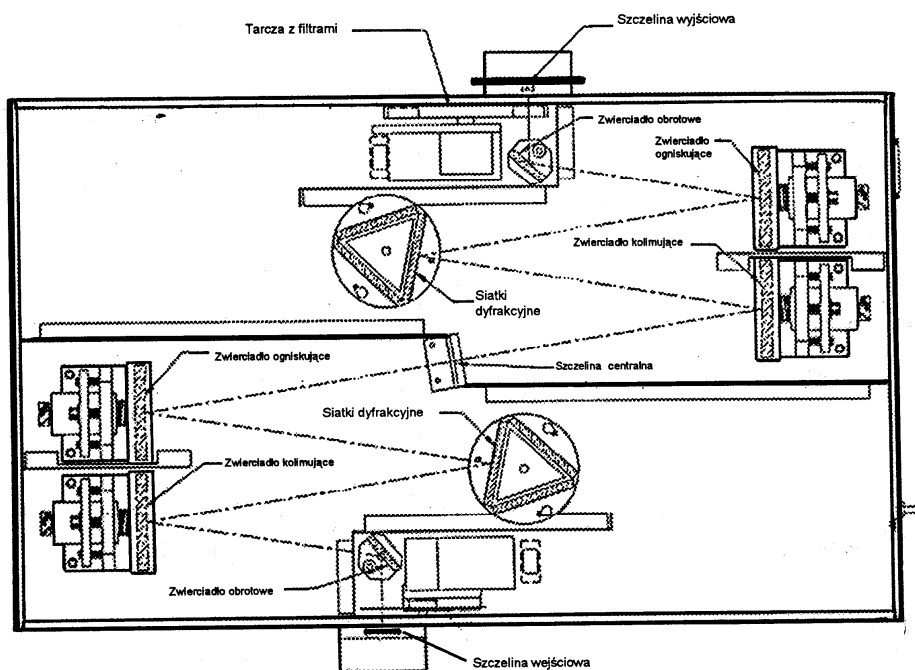
Pomiary rozkładu widmowego promieniowania optycznego wykonano z wykorzystaniem systemu spektrometrycznego OL 750 firmy Optronic Laboratories (rys. 2) wyposażonego w podwójny monochromator OL 750-M-D (rys. 3), sterownik OL750-C, detektor krzemowy OL 750 HSD-300 Silicon i detektor PbS OL 750-HSD-340 oraz optycznego układu wejściowego – kuli całkującej. Zakres pomiarowy detektora OL 750 HSD-300 wynosi 200÷1 100 nm, natomiast detektora OL 750-HSD-340 – 1 000÷3 000 nm. Mierzone promieniowanie było rozszczepiane przez układ trzech siatek dyfrakcyjnych umieszczonych w monochromatorze [10]:

- 1 200 linii/mm – w zakresie UV, który umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości spektralnej maksymalnie 0,25 nm oraz zapewnia bardzo niski poziom promieniowania rozproszonego ( $10^{-8}$ );
- 600 linii/mm i 300 linii/mm w zakresie VIS i IR.

W przypadku pomiaru rozkładu widmowego natężenia napromienienia układem wejściowym zastosowanym w systemie była kula całkująca OL455 Integrating Sphere o średnicy 152,4 mm oraz średnicy źrenicy wejściowej (przysłony aperturowej) 31,74 mm [10] (rys. 4) umożliwiająca równomierny rozkład strumienia promieniowania na wejściu monochromatora (ze względu na dobrą korekcję kosinusową dla całego kąтового pola widzenia). Sterowanie pracą systemu spektrometrycznego odbywało się za pomocą kontrolera OL 750-C oraz programu komputerowego OptoLab, zgodnie z instrukcją obsługi [10].



Rys. 2. Schemat blokowy systemu spektrometrycznego (OUW – optyczny układ wejściowy – kula całkująca lub teleskop)



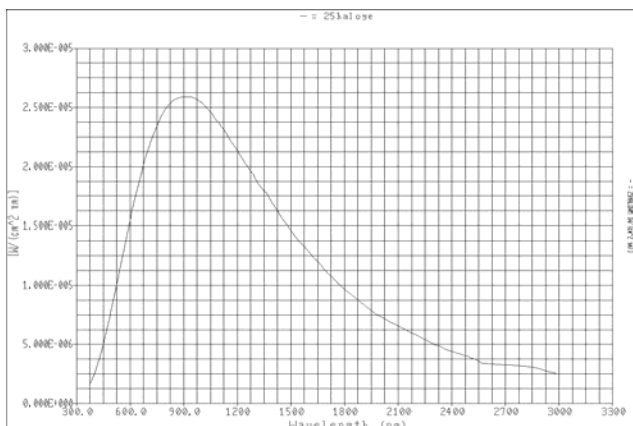
Rys. 3. Schemat podwójnego monochromatora OL 750-M-D stosowanego w badaniach [10]



Do wzorcowania systemu spektrometrycznego OL 750 wykorzystano wzorcową lampę halogenową OL 200 IR o zakresie emisji 200÷4 500 nm), której zmierzoną charakterystykę widmową przedstawiono na rysunku 5.

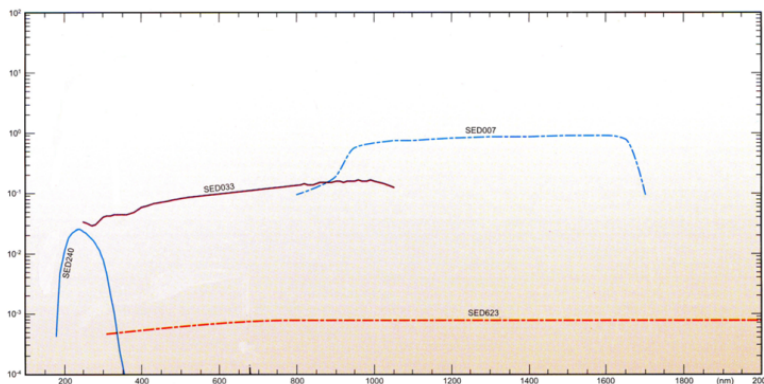
Rys. 4. Układ wejściowy z kulą całkującą

**Rys. 5. Charakterystyka widmowa promieniowania optycznego emitowanego przez wzorcową lampę halogenową typu OL 200 IR**



## 2.2. Metoda radiometryczna

Pomiary wykonano za pomocą radiometru szerokopasmowego ILT 1400 produkcji International Light (rys. 1) z wykorzystaniem wybranych sond pomiarowych, których zakresy pomiarowe przedstawione na rysunku 6 nie w każdym przypadku odpowiadają wymaganiom widmowym zawartym w rozporządzeniu [3]. Poniżej przedstawiono charakterystyki wytypowanych do badań sond pomiarowych.



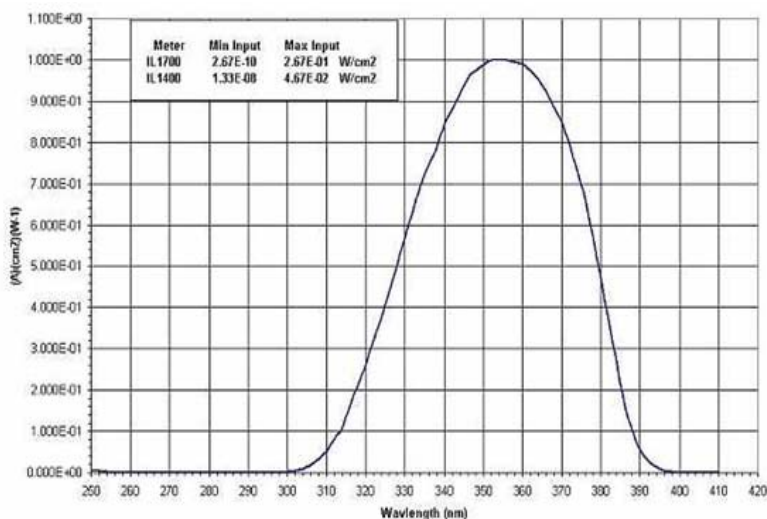
**Rys. 6. Charakterystyki widmowe sond przeznaczonych do radiometru ILT 1400 [11]**

### **Pomiar całkowitego natężenia napromienienia ( $E_{eUV-A}$ ) w zakresie promieniowania nadfioletowego UV-A**

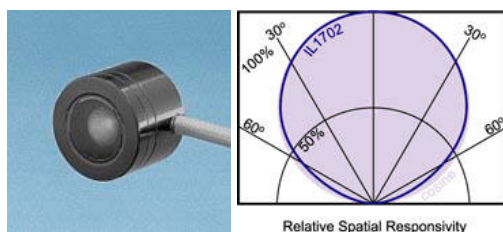
Na rysunku 7 przedstawiono zakres widmowy sondy SEL 033/UVA/W. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy:  $2,67e^{-10}$  do  $2,67e^{-1}$  W/cm<sup>2</sup>;
- zakres widmowy: 315÷390 nm (UV-A);
- dopasowanie kosinusowe (rys. 8).

Ze względu na swoje parametry jest ona przewidziana przez producenta jako najbardziej odpowiednia do wyznaczania zagrożenia fotochemicznego soczewki oka w zakresie UV-A, chociaż jej charakterystyka widmowa nie jest płaska (pozioma).



Rys. 7. Zakres widmowy sondy SEL 033/UVA/W [11]



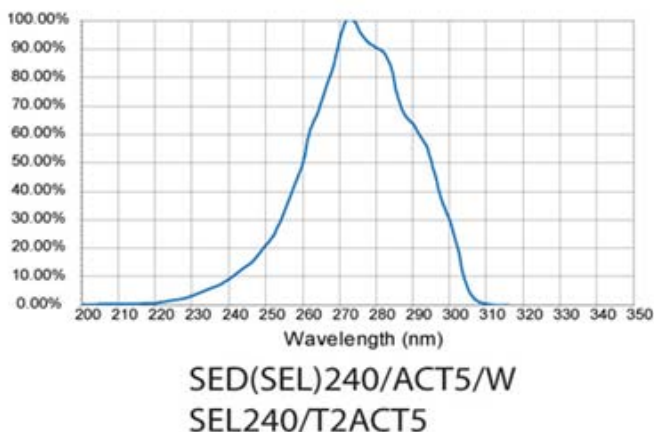
Rys. 8. Widok sondy SEL 033/UVA/W oraz jej cosinusowa korekcja przestrzenna [11]

### Pomiar skutecznego natężenia napromienienia ( $E_S$ ) w zakresie promieniowania nadfioletowego

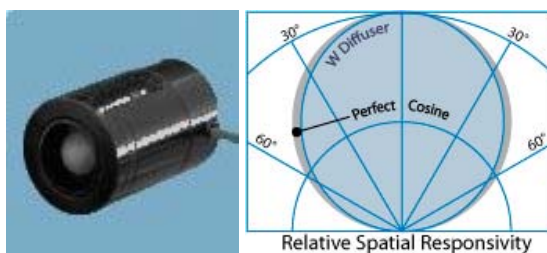
Na rysunku 9 przedstawiono zakres widmowy sondy SEL 240/ACT5/W. Według danych producenta sonda ta ma:

- zakres pomiarowy:  $5,00e^{-9}$  do  $2,50e^{-3}$  W/cm<sup>2</sup>;
- zakres widmowy: 235÷307 nm (UV-B i UV-C);
- korekcję  $S(\lambda)$ ;
- dopasowanie kosinusowe (rys. 11).

Ze względu na swoje parametry, sonda ta jest odpowiednią do wyznaczania zagrożenia fotochemicznego oka (rogówka, spojówka i soczewka) oraz skóry promieniowaniem nadfioletowym, pomimo że nie obejmuje pełnego zakresu widmowego wymaganego w rozporządzeniu [3] – od 180 do 400 nm.



Rys. 9. Zakres widmowy sondy SEL 240/ACT5/W [11]



Rys. 10. Widok sondy SEL 240/ACT5/W oraz jej cosinusowa korekcja przestrzenna [11]

### Pomiar skutecznej luminancji energetycznej w zakresie promieniowania widzialnego oraz podczerwonego (zakres IR-A)

W ofercie firmy International Light nie występuje sonda pomiarowa przeznaczona do bezpośrednich pomiarów skutecznej luminancji energetycznej z korekcją  $R(\lambda)$  w zakresie widmowym 380÷1400 nm w celu wyznaczenia zagrożenia termicznego siatkówki oka. Wyznaczenie tej wartości jest możliwe dzięki zapisowi zawartemu w normie [7] (p. 7.4.3): „w celu pokrycia całego zakresu może być użyte więcej niż jedno urządzenie pomiarowe”. W związku z tym skuteczną luminancję energetyczną w zakresie 380÷1400 nm będzie można wyznaczyć poprzez zsumowanie wyników pomiarów z dwóch sond przewidzianych do oceny:

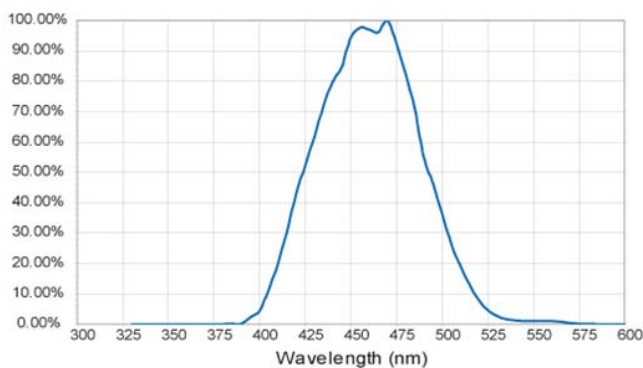
- skutecznego natężenia napromienienia promieniowania widzialnego (zakres światła niebieskiego) – sonda SEL 033/TBLU/SCS395/TD, po przemożeniu wyników przez 10 w celu zmiany jej korekcji z  $B(\lambda)$  na  $R(\lambda)$ ;
- skutecznego natężenia napromienienia promieniowania podczerwonego w zakresie IR-A – sonda SEL 007/W.

Następnie należy dokonać przeliczenia wartości skutecznego natężenia napromienienia źródła na skuteczną luminancję energetyczną zgodnie z zapisem normy [4] (p. 2.5.5) z wykorzystaniem metody opisanej w [8, 9].

Na rysunku 11 przedstawiono zakres widmowy sondy SEL 033/TBLU/-/SCS395/TD. Według danych producenta sonda ta ma:

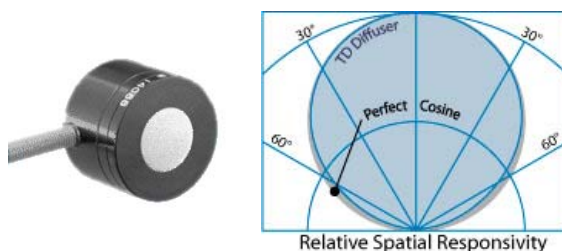
- zakres pomiarowy:  $7,41e^{-10}$  do  $7,41e^{-1}$  W/cm<sup>2</sup>;
- zakres widmowy: 305÷700 nm;
- korekcję  $B(\lambda)$ ;
- dopasowanie kosinusowe (rys. 12).

Ze względu na swoje parametry, sonda ta jest przewidziana przez producenta do wyznaczania skutecznego natężenia napromienienia zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka światłem niebieskim.



### SED(SEL)033/TBLU/SCS395/TD

Rys. 11. Zakres widmowy sondy SEL 033/TBLU/SCS395/TD [11]



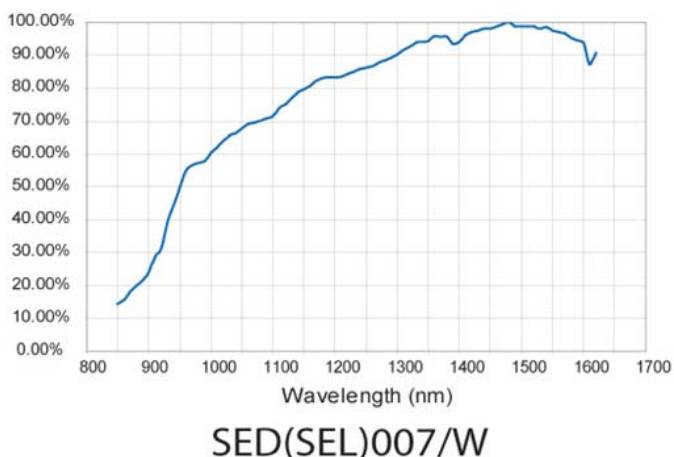
Rys. 12. Widok sondy SEL 033/TBLU/SCS395/TD oraz jej cosinusowa korekcja przestrzenna [11]

Na rysunku 13 przedstawiono zakres widmowy sondy SED 007/W. Według danych producenta sonda ta ma:

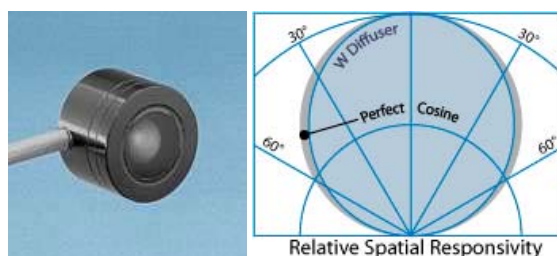
- zakres pomiarowy:  $3,57e^{-9}$  do  $1,25e^{-2}$  W/cm<sup>2</sup>;
- zakres widmowy: 770÷1 400 nm;
- korekcję  $R(\lambda)$ ;
- dopasowanie kosinusowe.

Parametry techniczne tej sondy są najbardziej zbliżone do oceny zagrożenia termicznego siatkówki oka.





Rys. 13. Zakres widmowy sondy SED 007/W [11]



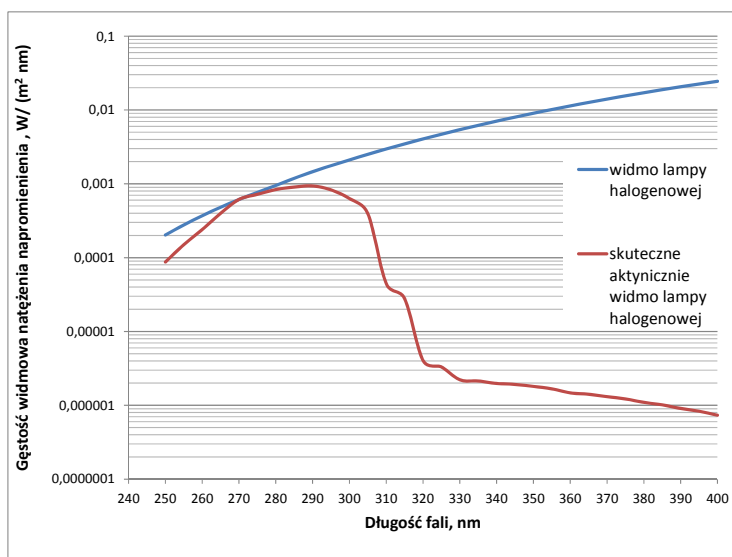
Rys. 14. Widok sondy SED 007/W oraz jej cosinusowa korekcja przestrzenna [11]

### 3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiaru gęstości widmowej natężenia napromienienia wzorcowej lampy halogenowej OL 200 IR w zakresie 200÷3 000 nm z wykorzystaniem spektrometriem wykonano trzykrotnie. Do analizy przyjęto uśredniony rozkład widmowy w tym zakresie. Na podstawie pomiarów spektrometrycznych wartości poszczególnych parametrów określających poziom ekspozycji dla danego rodzaju zagrożenia oczu lub skóry wyznaczano w przedziałach widmowych zgodnie z obowiązującymi kryteriami [1, 3] oraz w przedziałach odpowiadających zakresom pomiarowym poszczególnych sond współpracujących z radiometrem ILT 1400. Do wyznaczania skutecznych wartości natężenia napromienienia zastosowano widmowe współczynniki ważenia odpowiednich krzywych skuteczności widmowej zdefiniowane w [3, 4, 5]. Uzyskane w ten sposób wartości parametrów promieniowania optycznego, określające poziom ekspozycji, porównywano z wartościami tych samych parametrów uzyskanych w wyniku pomiarów radiometrycznych.

### 3.1. Skuteczne natężenie napromienienia promieniowaniem nadfioletowym

Na rysunku 15 przedstawiono wykres gęstości widmowej natężenia napromienienia promieniowania emitowanego przez wzorcową lampę halogenową OL 200 IR w zakresie nadfioletu oraz wykres gęstości widmowej skutecznego natężenia napromienienia tej lampy po skorygowaniu do skuteczności aktywności  $S(\lambda)$  (tzw. skutecznie aktywnie widmo lampy halogenowej).



**Rys. 15.** Gęstości widmowe wzorcowej lampy halogenowej OL 200 IR w zakresie nadfioletu (nieskorygowanej) i skorygowanej do skuteczności aktywności  $S(\lambda)$

Zgodnie z informacją producenta, zakres pomiarowy sondy SEL 240/ACT5/W wynosi 235÷307 nm i nie pokrywa pełnego zakresu wymaganego przez rozporządzenie [3], tj. od 180 nm do 235 nm oraz od 307 nm do 400 nm. W niniejszych badaniach, na podstawie pomiarów spektrometrycznych, sprawdzono, jak na wynik pomiaru skutecznego natężenia napromienienia wpływa:

- zmniejszony zakres widmowy ww. sondy w zakresie UV-A (tj. do 307 nm) oraz
- niedopasowanie widmowe sondy SEL 240/ACT5/W do krzywej aktywności  $S(\lambda)$ .

Wyniki pomiarów skutecznego natężenia napromienienia promieniowaniem UV wykonanych radiometrem ILT 1400 oraz spektrometrem OL 750 przedstawiono w tabeli 1. Różnica wskazań skutecznych natężeń napromienienia uzyskanych obiema metodami pomiaru wynosiła 2% i wyznaczono ją ze wzoru (1):

$$RW_{\%} = \frac{E_{s\_rad\_235-307nm} - E_{s\_spectro\_235-400nm}}{E_{s\_spectro\_235-307nm}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$E_{s\_rad\_235-307nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone radiometrem w zakresie 235÷307 nm;

$E_{s\_spectro\_235-400nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone spektrometriem w zakresie 235÷400 nm.

**TABELA 1**

Wyniki pomiarów skutecznego natężenia napromienienia promieniowaniem UV wykonanych radiometrem ILT 1400 oraz spektrometriem OL 750 wraz z wyznaczonymi różnicami wskazań

Widmowy zakres pomiaru	Skuteczne natężenie napromienienia, W/m <sup>2</sup>		Różnica wskazań %	Uwagi
	Radiometr ILT 1400, sonda SEL 240/ACT5/W	Spektrometriem OL 750		
ILT 1400: 235÷307 nm OL 750: 235÷400 nm	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-2}$	<b>2,04</b>	Przeszacowanie pomiaru radiometrem wynikające z różnych zakresów pomiarowych i niedopasowania widmowego sondy do $S(\lambda)$
235÷307 nm	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	3,24	Przeszacowanie pomiaru radiometrem wynikające z niedopasowania widmowego sondy do $S(\lambda)$
307÷400 nm	–	$4,14 \cdot 10^{-4}$	-1,2	Niedoszacowanie pomiaru radiometrem wynikające ze zmniejszonego zakresu widmowego w obszarze UV-A

Uzyskana powyżej różnica wskazań wynika zarówno z różnych zakresów widmowych pomiaru, jak i z niedopasowania widmowego sondy do krzywej aktywności  $S(\lambda)$  i wskazuje na przeszacowanie pomiarów wykonywanych radiometrem. W celu określenia różnic pomiaru wynikających z niedopasowania widmowego porównano wyniki pomiaru obydwojema metodami dla zakresu 235÷307 nm, a wynikającą z porównania różnicę wskazań wyznaczono ze wzoru (2):

$$RW_{\%}^{S(\lambda)} = \frac{E_{s\_rad\_235-307nm} - E_{s\_spectro\_235-307nm}}{E_{s\_rad\_235-307nm}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$E_{s\_rad\_235-307nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone radiometrem w zakresie 235 ÷ 307 nm;

$E_{s\_spectro\_235-307nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone spektrometriem w zakresie 235 ÷ 307 nm.

Aby określić procentowy udział niedoszacowania pomiaru radiometrycznego, wyznaczono z pomiarów spektrometrycznych wartość skutecznego natężenia na-

promienienia w zakresie 235÷400 nm (odpowiadającym zakresowi widmowemu lampy halogenowej) oraz w zakresie 307÷400 nm. Wartość procentowej różnicy wskazań określono ze wzoru (3):

$$RW_{\%}^{307-400} = \frac{E_{s\_spectro\_307-400nm}}{E_{s\_spectro\_235-400nm}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- $E_{s\_spectro\_307-400nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone spektromi-  
radiometrem w zakresie 307÷400 nm;  
 $E_{s\_spectro\_235-400nm}$  – skuteczne natężenie napromienienia wyznaczone spektromi-  
radiometrem w zakresie 235÷400 nm.

W tabeli 1 wartość procentowej różnicy wskazań ze względu na zmniejszony zakres widmowy radiometru w obszarze UV-A ma znak minus, gdyż przyjęto, że różnica wskazań określana jest w odniesieniu do radiometru, którym w zakresie 307÷400 nm nie można wykonać pomiarów. W związku z tym wartość skutecznego natężenia napromienienia w zakresie 235÷400 nm uzyskana z pomiarów spektromi-  
metrycznych powoduje niedoszacowanie wyników pomiarów uzyskanych z wykorzysta-  
aniem radiometru.

Na podstawie analizy wyników pomiarów skutecznego natężenia napromie-  
nienia w zakresie 235÷400 nm wykonanych dwiema metodami, można zauważyć, że:

- udział skutecznego natężenia napromienienia z zakresu 307÷400 nm w całym mierzonym przedziale UV wynosi tylko 1,2%, w związku z czym, przy pomiarze źródła, nawet o bardzo znaczącym udziale promieniowania z zakresu UV-A, błąd pomiaru będzie pomijalnie mały; natomiast w przypadku źródeł o mniejszym udziale promieniowania w pasmie UV-A niż lampa halogenowa, niedoszacowanie wskazań radiometru będzie znacznie mniejsze niż 1,2%;
- niedopasowanie widmowe sondy SEL 240/ACT5/W do krzywej aktywności  $S(\lambda)$  powoduje przeszacowanie wyników pomiarów radiometrycznych o 3,24%;
- sumaryczna różnica wskazań radiometru względem spektromi-  
metrycznego przy pomiarze lampy halogenowej, ze względu na ww. przyczyny, wynosi 2%.

### 3.2. Natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A

Na rysunku 1 przedstawiającym wykres gęstości widmowej wzorcowej lampy halogenowej OL 200 IR wyraźnie widać znaczący udział promieniowania UV-A w widmie tej lampy. Na podstawie pomiarów spektromi-  
metrycznych sprawdzono, w jaki sposób na wynik pomiaru natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A wpływa:

- brak nieselektywnej charakterystyki widmowej sondy SEL 033/UVA/W;
- zmniejszony zakres widmowy ww. sondy w zakresie powyżej 390 nm.

Wyniki pomiarów radiometrem ILT 1400 oraz spektromi-  
metrycznymi przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Wyniki pomiarów natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A wykonanych radiometrem ILT 1400 oraz spektroradiometrem OL 750 wraz z wyznaczonymi różnicami wskazań

Widmowy zakres pomiaru	Skuteczne natężenie napromienienia, W/m <sup>2</sup>		Różnica wskazań %	Uwagi
	Radiometr ILT 1400, sonda SEL 033/UVA/W	Spektroradiometr OL 750		
ILT 1400: 315÷390 nm OL 750: 315÷400 nm	$6,275 \cdot 10^{-1}$	$8,91 \cdot 10^{-1}$	<b>-29,6</b>	Niedoszacowanie pomiaru radiometrem wynikające z różnych zakresów pomiarowych i charakterystyki widmowej sondy
315÷390 nm	$6,275 \cdot 10^{-1}$	$7,81 \cdot 10^{-1}$	-19,6	Niedoszacowanie pomiaru radiometrem wynikające z charakterystyki widmowej sondy
390÷400 nm	–	$1,1 \cdot 10^{-1}$	-12,3	Niedoszacowanie pomiaru radiometrem wynikające ze zmniejszonego zakresu widmowego w obszarze UV-A

Zgodnie z informacją producenta, zakres pomiarowy sondy SEL 033/UVA/W wynosi 315÷390 nm i nie pokrywa zakresu od 390 do 400 nm wymaganego w rozporządzeniu [3]. Różnica wskazań natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A uzyskanych obydwojma metodami pomiaru wynosiła 29,6% i wyznaczono ze wzoru (4):

$$RW_{\%} = \frac{E_{UVA\_rad\_315-390nm} - E_{UVA\_spectro\_315-400nm}}{E_{UVA\_spectro\_315-400nm}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

- $E_{UVA\_rad\_315-390nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone radiometrem w zakresie 315-390 nm;  
 $E_{UVA\_spectro\_315-400nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone spektroradiometrem w zakresie 315÷400 nm.

Uzyskana powyżej różnica wskazań wynika przede wszystkim z charakterystyki widmowej sondy, która na obu krańcach zakresu UV-A nie jest „płaska” (w związku z czym zaniża wynik pomiaru) oraz różnych zakresów widmowych pomiaru. Z tych powodów wynik pomiaru uzyskany z radiometru jest niedoszacowany. W celu określenia różnic pomiaru wynikających z niedopasowania widmowego sondy (SEL 033/UVA/W) porównano wyniki pomiaru obiema metodami dla zakresu widmowego 315÷390 nm, a wynikającą z porównań różnicę wskazań wyznaczono ze wzoru (5):

$$RW_{\%}^{SEL033} = \frac{E_{UVA\_rad\_315-390nm} - E_{UVA\_spectro\_315-390nm}}{E_{UVA\_spectro\_315-390nm}} \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie:

$E_{UVA\_rad\_315-390nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone radiometrem w zakresie 315÷390 nm;

$E_{UVA\_spectro\_315-390nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone spektrometriem w zakresie 315÷390 nm.

W celu określenia procentowego udziału niedoszacowania pomiaru radiometrycznego, wyznaczono z pomiarów spektrometrycznych wartość natężenia napromienienia w zakresie 315÷400 nm oraz w zakresie 390÷400 nm. Wartość procentowej różnicy wskazań określono ze wzoru (6):

$$RW_{\%}^{390-400} = \frac{E_{UVA\_spectro\_390-400nm}}{E_{UVA\_spectro\_315-400nm}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

$E_{UVA\_spectro\_390-400nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone spektrometriem w zakresie 390÷400 nm;

$E_{UVA\_spectro\_315-400nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem UV-A wyznaczone spektrometriem w zakresie 315÷400 nm.

W tabeli 2 wartość procentowej różnicy wskazań ze względu na zmniejszony zakres widmowy radiometru w obszarze UV-A ma znak minus, gdyż przyjęto, że różnica wskazań określana jest w odniesieniu do radiometru, którym w zakresie 390÷400 nm nie można wykonać pomiarów, a zatem wartość natężenia napromienienia w tym zakresie uzyskana z pomiarów spektrometrycznych jest niedoszacowaniem radiometru.

Na podstawie analizy wyników pomiarów natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A wykonanych dwiema metodami, można zauważyć, że:

- przy pomiarze źródła o znaczącym udziale promieniowania z zakresu UV-A udział natężenia napromienienia z zakresu 390÷400 nm w całym mierzonym przedziale UV wynosi 12,3%; w przypadku źródeł o mniejszym udziale promieniowania w pasmie powyżej 390 nm niż lampa halogenowa, niedoszacowanie wskazań radiometru będzie mniejsze niż 12,3%;
- brak płaskiej charakterystyki widmowej sondy SEL 033/UVA/W powoduje niedoszacowanie wyników pomiarów radiometrycznych o 19,6%;
- sumaryczna różnica wskazań radiometru względem spektrometriu ze względu na ww. przyczyny przy pomiarze lampy halogenowej wynosi około 30%.

### 3.3. Skuteczne natężenie napromienienia promieniowaniem VIS + IR-A

Pomiar skutecznego natężenia napromienienia promieniowaniem widzialnym i podczerwonym z zakresu 380÷1400 nm ( $E_R$ ) metodą radiometryczną wymaga zastosowania dwóch sond pomiarowych: SEL 033/TBLU/SCS 395/TD oraz SEL 007/W oraz sumowaniu wyników pomiarów z dwóch podzakresów: 300÷700 nm i 770÷1400 nm. Sonda SEL 033/TBLU/SCS 395/TD służy do pomiaru zagrożenia fotochemicznego siatkówki oka i skorygowana jest do krzywej skuteczności  $B(\lambda)$ . Uwzględniając fakt, że

w zakresie widmowym 380÷500 nm przebieg krzywej skuteczności  $B(\lambda)$  jest zgodny z  $R(\lambda)$  z tym, że wartości współczynników ważenia krzywej skuteczności  $R(\lambda)$  są dziesięciokrotnie większe, do wyznaczenia wartości skutecznego natężenia napromienienia w zakresie 380÷700 nm ( $E_{RVIS}$ ) przyjmuje się dziesięciokrotną wartość  $E_B$ . Takie rozwiązanie, pomimo że jest obciążone pewnym błędem, musi być stosowane przy wykonywaniu pomiarów w tym zakresie, ponieważ producent nie ma w swojej ofercie innej sondy, która by pozwalała na pomiar zagrożenia oczu promieniowaniem widzialnym i podczerwonym. Zgodnie z deklaracją producenta sonda SEL 007/W mierzy w zakresie 770÷1400 nm, choć jej charakterystyka widmowa wskazuje, że sonda obejmuje zakres 850÷1600 nm (rys. 12) i nie jest ona „idealnie” dopasowana do krzywej  $R(\lambda)$ . Ponadto pomiarami radiometrycznymi nie jest objęty zakres 700÷770 nm.

Na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą spektrometrii sprawdzono, jak na wynik pomiaru skutecznego natężenia napromienienia promieniowaniem widzialnym i podczerwonym z zakresu 380÷1400 nm ( $E_R$ ) wpływa:

- niedopasowanie widmowe sondy SEL 033/TBLU/SCS395/TD do krzywej zagrożenia termicznego siatkówki oka  $R(\lambda)$ ;
- zmniejszony zakres widmowy ww. sondy w zakresie VIS (tj. powyżej 700÷770 nm);
- zwiększony zakres widmowy ww. sondy w zakresie UV-A (tj. 300÷380 nm);
- niedopasowanie widmowe sondy SEL 007/W do krzywej zagrożenia termicznego siatkówki oka  $R(\lambda)$  i zakres widmowy pomiaru.

Wyniki pomiarów radiometrem ILT 1400 oraz spektrometrii przedstawiono w tabeli 3.

**TABELA 3**

Wyniki pomiarów natężenia napromienienia promieniowaniem VIS i IR-A wykonanych radiometrem ILT 1400 oraz spektrometrią OL 750 wraz z wyznaczonymi różnicami wskazań

Widmowy zakres pomiaru	Skuteczne natężenie napromienienia, W/m <sup>2</sup>		Spektrometrią OL 750	Różnica wskazań %	Uwagi
	Radiometr ILT 1400				
	sonda SEL 033/-/TBLU/-/SCS395/TD	sonda SEL 007/W			
ILT 1400: 305÷700 nm + 770÷1400 nm	41,3	78,2	119,6	-0,08	Niedoszacowanie pomiaru radiometrem
OL 750: 380÷1400 nm	Suma: 41,3 + 78,2 = 119,5				

Zgodnie z informacją producenta, zakres pomiarowy sondy SEL 033/TBLU/SCS395/TD wynosi 305÷700 nm i nie obejmuje wymaganego przez rozporządzenie [3] zakresu od 700 do 780 nm, natomiast rozszerzona jest o niepożądany zakres 305÷380 nm. Różnica wskazań natężenia napromienienia promieniowaniem VIS + IR-A uzyskanych obydwoma metodami pomiaru wyniosła 0,08% i wyznaczono ją zgodnie ze wzorem (7):

$$RW_{\%} = \frac{E_{VIS\_rad\_305-700nm} + E_{IRA\_rad\_770-1400nm} - E_{VIS+IRA\_spectro\_380-1400nm}}{E_{VIS+IRA\_spectro\_380-1400nm}} \cdot 100\% \quad (7)$$

gdzie:

- $E_{VIS\_rad\_305-700nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem VIS wyznaczone radiometrem w zakresie 305÷700 nm;
- $E_{VIS\_rad\_770-1400nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem IR-A wyznaczone radiometrem w zakresie 770÷1400 nm;
- $E_{VIS+IRA\_spectro\_380-1400nm}$  – natężenie napromienienia promieniowaniem VIS + IR-A wyznaczone spektrometrem w zakresie 380÷1400 nm.

Uzyskana różnica wskazań wynika zarówno z różnych zakresów widmowych pomiaru, jak i z charakterystyk widmowych sond; wskazuje na nieznaczne niedoszacowanie wyniku pomiaru uzyskanego z radiometru, pomimo ww. niedopasowań widmowych.

## 4. WNIOSKI

Ogólnie można stwierdzić, że w zależności od rozpatrywanego zagrożenia oraz emitowanego widma promieniowania optycznego, niedopasowanie zakresu widmowego sond może wprowadzać pewne niedoszacowanie lub przeszacowanie wyników pomiarów. Jest to szczególnie istotne przy pomiarach natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A źródeł o znacznym udziale zakresu UV-A w widmie promieniowania, kiedy niedoszacowanie wyniku pomiaru wynosi około 30%. Aby odpowiedzieć sobie na pytanie, czy jest to w praktyce istotnie duża różnica wskazań, to jest taka, która może decydować o przekroczeniu wartości maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) przeanalizowano uzyskane wyniki pomiarów na różnych stanowiskach pracy, gdzie źródłami promieniowania były promienniki UV-A stosowane do różnych procesów technologicznych (przemysł elektroniczny, poligraficzny, medyczny). Maksymalna zmierzona radiometrem wartość natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A wyniosła 0,04 W/m<sup>2</sup>. Przyjmując, że niedoszacowanie wyniku pomiaru wynosi 30%, wyznaczono wartość skorygowaną natężenia napromienienia, która wówczas wynosiłaby 0,052 W/m<sup>2</sup>. Aby określić, czy jest to istotnie większa wartość ze względu na zagrożenie oczu promieniowaniem UV-A, wyznaczono dozwolony czas ekspozycji jako iloraz wartości MDE = 10 000 J/m<sup>2</sup> [1, 3] i wartości skorygowanego natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A (zgodnie ze wzorem 5). Wówczas dozwolony czas ekspozycji wynosi 192 307 s, czyli znacznie przekracza 8 godzin. Zatem w tym przypadku niedoszacowanie wyniku pomiaru nie ma istotnego wpływu na ocenę zagrożenia oczu promieniowaniem UV-A. Nie mniej jednak należy o tym niedoszacowaniu pamiętać i uwzględnić je w wynikach pomiarów porównywanych z wartością MDE.

W przypadku oceny zagrożenia fotochemicznego oczu i skóry promieniowaniem UV, różnica wskazań wynosi zaledwie 2%, natomiast w przypadku oceny zagrożenia termicznego siatkówki oka poniżej 0,1%.

W wykonanych badaniach wykorzystano dwie różne metody pomiarowe, które obarczone są charakterystycznymi dla każdej z nich niepewnościami pomiaru. Zgodnie



z zapisami norm [6 i 7] niepewność tych metod nie może przekraczać 30% w przypadku wykonywania pomiarów, których wyniki są porównywane z wartościami granicznymi ekspozycji, co oczywiście było spełnione w obu przypadkach. Natomiast w obliczeniach przyjęto wyniki uzyskane ze spektrometru jako odniesieniowe, gdyż umożliwił on pomiar w dokładnym zakresie długości fal zgodnych z kryteriami oceny zagrożenia zawartymi w rozporządzeniu [3]. Ponadto było możliwe przyjęcie dokładnych współczynników ważenia poszczególnych skuteczności oddziaływania promieniowania optycznego na organizm człowieka.

### **Podziękowania**

*Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowywanego w latach 2011-2013 w zakresie w zakresie służb państwowych ze środków Ministerstwa Pracy i Polityki Społecznej. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

### **LITERATURA**

1. Dyrektywa 2006/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 kwietnia 2006 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym) (dziewiętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16.1 dyrektywy 89/391/EWG), DzUrz UE L 114/38.
2. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne (tekst jednolity Dz. U. z 2013 r. poz. 1619).
3. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 lipca 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 141, poz. 950).
4. PN-T-05687: 2002. Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Metody pomiaru promieniowania widzialnego i podczerwonego na stanowiskach pracy.
5. PN-T-06589: 2002. Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Metody pomiaru promieniowania nadfioletowego na stanowiskach pracy.
6. PN-EN 14255-1: 2010. Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 1: Promieniowanie nadfioletowe emitowane przez źródła sztuczne na stanowisku pracy.
7. PN-EN 14255-2: 2010. Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 2: Promieniowanie widzialne i podczerwone emitowane przez źródła sztuczne na stanowisku pracy.
8. Pawlak A.: Metody badania nielaserowego promieniowania optycznego, Pomiary Automatyka Robotyka PAR, nr 6, s. 83-89, 2013.
9. Pawlak A.: Zasady wykonywania pomiarów promieniowania optycznego na stanowiskach pracy, Prace Instytutu Elektrotechniki, nr 255, s. 67-77, 2012.
10. Operation Manuals no M000158. OL Series 750 Automated Spectroradiometric Measurement System. Optronics Laboratories, Orlando USA, 1997.
11. <http://www.intl-lighttech.com>.

*Rękopis dostarczono dnia 08.05.2014 r.*

PRACTICAL ASPECTS OF MEASURING DETECTORS  
SPECTRAL UNFITTING TO OBLIGATORY CRITERIA  
OF OCCUPATIONAL HAZARD EVALUATION ARISING  
FROM NON-COHERENT OPTICAL RADIATION

Andrzej PAWLAK, Agnieszka WOLSKA

**ABSTRACT** *The article presents examples of spectral unfitting of a radiometric measurement method, which is used for determining of the exposure level on workstations according to obligatory criteria of the occupational hazard evaluation arising from an optical radiation. The comparative measurements were carried out using spectroradiometric and radiometric methods and the potential percentage differences of measurement results were obtained. The spectral unfitting of detectors used for actinic UV measurements and thermal retina hazard form range VIS+IR-A showed small difference of measured exposure levels had small influence on hazard evaluation. However, the spectral unfitting of UV-A irradiance resulted in 30% underestimation of the radiometric method which underestimation should be taken into account during the exposure level determination.*

**Keywords:** *optical radiation, radiometric measurements, spectroradiometer measurements, spectral mismatch of measurement probes*

**Mgr inż. Andrzej PAWLAK** – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, specjalizacja – Technika Światłowa. Obecnie asystent w Pracowni Promieniowania Optycznego CIOP-PIB. Działalność zawodowa to prace badawcze oraz ekspertyzy z zakresu oświetlenia elektrycznego oraz promieniowania optycznego. Jest certyfikowanym specjalistą w zakresie pomiarów parametrów warunków pracy w zakresie oświetlenia elektrycznego i dziennego oraz certyfikowanym wykładowcą bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie oświetlenia pomieszczeń i stanowisk pracy.



**Dr hab. inż. Agnieszka WOLSKA** jest kierownikiem Pracowni Promieniowania Optycznego w CIOP-PIB. Jest doświadczonym ekspertem w zakresie oświetlenia, ergonomii widzenia i promieniowania optycznego. Prowadzi prace badawcze z zakresu wpływu różnych parametrów oświetlenia na psychofizjologię widzenia, a w ostatnich latach zajmuje się problemami oceny i pomiaru olśnienia na stanowiskach pracy. Ponadto prowadzi badania i ekspertyzy związane z ekspozycją zawodową na sztuczne i naturalne promieniowanie optyczne. Jest autorką opracowanych metod i kryteriów oceny ryzyka zawodowego związanego z oświetleniem elektrycznym, naturalnym promieniowaniem UV oraz sztucznym promieniowaniem optycznym, a także poradnika dla pracodawców i osób wykonujących pomiary dotyczącego oceny zagrożenia sztucznym promieniowaniem optycznym. Jest certyfikowanym wykładowcą bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie oświetlenia, ergonomii i promieniowania optycznego.