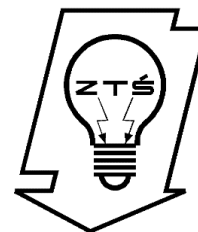


Ćw. 6. Badanie korekcji głowic fotometrycznych

Opracował: dr hab. inż. Sławomir Zalewski



ZAKŁAD TECHNIKI
ŚWIETLNEJ

1. Wprowadzenie teoretyczne

1.1. Budowa głowic fotometrycznych

Podstawowym i niezbędnym elementem każdego obiektywnego, fotometrycznego układu pomiarowego jest głowica fotometryczna w postaci odpowiednio skorygowanego przetwornika fotoelektrycznego. Przetwarza ona wielkość fotometryczną taką jak natężenie oświetlenia lub naświetlenie na powierzchni głowicy na mierzalny sygnał elektryczny, którym jest natężenie prądu elektrycznego lub ładunek elektryczny. Sygnał ten można zmierzyć stosując odpowiednie elektryczne przyrządy pomiarowe. Dokładność wykonywanych pomiarów fotometrycznych w znaczącej mierze zależy od jakości użytej głowicy fotometrycznej. Dobór głowicy o odpowiedniej klasie [1] pozwala na osiągnięcie wymaganego poziomu jakości wykonywanych pomiarów.

W głowicach fotometrycznych współcześnie stosuje się dwa rodzaje przetworników fotoelektrycznych: krzemowe ogniwa fotowoltaiczne i krzemowe fotodiody. Oba przetworniki wykonane są w postaci półprzewodnikowego złącza typu p-n uzupełnionego o elementy korekcji przestrzennej (kątovej), korekcji widmowej (barwnej), stabilizacji termicznej oraz wstępnego przetwarzania sygnału. Różnice pomiędzy nimi polegają na różnych gabarytach elementu, innym sposobie pracy w układzie elektrycznym i innej wielkości elektrycznej, na którą przetwarzana jest energia promieniowania świetlnego padającego na powierzchnię przetwornika.

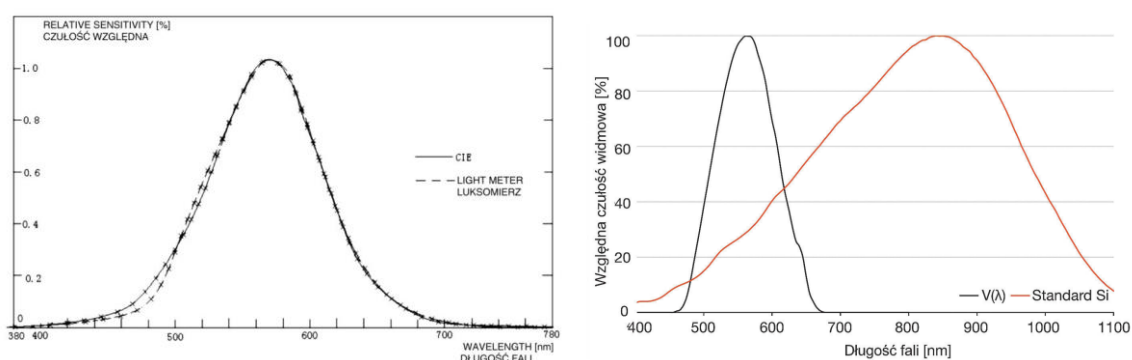
Zasada pracy obu rodzajów krzemowych przetworników fotoelektrycznych jest bardzo podobna. Fotony wnikające w strukturę donorowo domieszkowanego krzemu są pochłaniane przez atomy półprzewodnika a ich energia jest zamieniana na pracę wyjścia elektronu z poziomu podstawowego do pasma przewodnictwa. W ten sposób powstaje para kation („dziura”) – wolny elektron. W naturalnym (fotoogniwo) bądź wymuszonym (fotodioda) polu elektrycznym występującym w obszarze złącza ładunki dodatni i ujemny dyfundują w przeciwnych kierunkach. Ładunek ten można zmierzyć gromadząc go w kondensatorze (fotodioda) lub przepuszczając jako prąd przez nano/piko – amperomierz (fotoogniwo).

Warunkiem koniecznym do przeprowadzenia prawidłowego i wiarygodnego pomiaru fotometrycznego jest reagowanie głowicy na promieniowanie zgodnie z wrażliwością oka ludzkiego przystosowanego do jasności oraz proporcjonalnie do powierzchniowej gęstości strumienia świetlnego. W celu uzyskania tej zgodności stosuje się korekcję widmową oraz kątową. Niedopasowanie korekcji powoduje niepewność pomiarową sumarycznie wyrażoną w uchybie miernika.

1.2. Korekcja widmowa

Głowica fotometryczna musi reagować na polichromatyczne promieniowanie elektromagnetyczne adekwatnie do oka ludzkiego przystosowanego do jasności więc musi mieć rozkład widmowy czułości proporcjonalny do rozkładu widmowego czułości oka. Aby to uzyskać stosuje się korekcję widmową przetwornika (rys. 1a). Ze względu na wykonanie ogniwi i fotodiod z tego samego materiału charakteryzują się podobnymi naturalnymi rozkładami widmowymi czułości, więc korekcja widmowa w obu przypadkach wykonywana jest w podobny sposób. Zamiennie używa się także nazwy „korekcja barwna”.

W przeszłości stosowano różnego typu przetworniki o różnych charakterystykach czułości widmowej. Wraz ze zmianą preferowanego rodzaju stosowanych w danym okresie przetworników zmieniała się technologia stosowanej korekcji. Obecnie stosowane są praktycznie wyłącznie przetworniki krzemowe, których naturalna charakterystyka czułości widmowej znacząco odbiega od oczekiwanej (rys. 1b). Dodatkowo, bardzo poszerzyła się gama źródeł światła o bardzo zróżnicowanych rozkładach widmowych emitowanego promieniowania co wyklucza stosowanie przetworników o gorszym dopasowaniu widmowym wywzorcowanych określonymi rozkładami widmowymi promieniowania jak było robione we wcześniejszych konstrukcjach głowic i wymaga odpowiednio wysokiej jakości odtworzenia właściwości kolorymetrycznych oka poprzez fizyczne zastosowanie filtrów korekcyjnych. Realizuje się ją poprzez nałożenie na odbiornik promieniowania filtru barwnego o odpowiednio dobranej charakterystyce widmowego rozkładu współczynnika przepuszczania. W zależności od przeznaczenia korygowanej głowicy i wymaganej dokładności stosuje się różne rodzaje filtrów: jednowarstwowe, wielowarstwowe (szeregowo), mozaikowe (szeregowo-równoległe). Wszystkie one działają na zasadzie pochłaniania z różną intensywnością promieniowania o różnych długościach fal. Brak dobrego dopasowania czułości głowicy fotometrycznej do czułości widmowej oka ludzkiego powodowałby bardzo poważne błędy pomiarowe przy zmianie rodzaju i typu mierzonego źródła światła.



Rys. 1. Porównanie charakterystyk czułości widmowej: a) oka ludzkiego przystosowanego do jasności i skorygowanego ogniwa, b) oka ludzkiego przystosowanego do jasności i naturalnej ogniwa (fotodiody) krzemowego.

Filtr korekcji widmowej nakładany jest bezpośrednio na przetwornik fotoelektryczny. Składa się on z co najmniej jednej warstwy filtrującej o odpowiednio dobranej charakterystyce przepuszczania promieniowania. Często stosuje się filtry mozaikowe, w których oczekiwany

rozkład widmowy współczynnika przepuszczania uzyskuje się jako wypadkową rozkładów widmowych filtrów składowych.

Uchyb głowicy fotometrycznej wynikający z niedopasowania widmowego oznacza się symbolem f_1' . Wyznaczany jest jako

$$f_1' = \frac{\int_{380}^{760} |V_G(\lambda) - V_\lambda(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{760} V_\lambda(\lambda) d\lambda} 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$V_G(\lambda)$ – czułość widmowa badanej głowicy,

$V_\lambda(\lambda)$ – czułość widmowa oka ludzkiego przystosowanego do jasności,

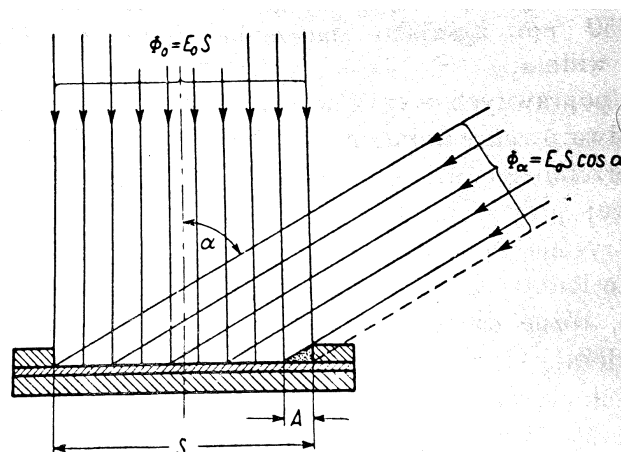
λ – bieżąca długość fali z zakresu widzialnego 380 – 760 nm [2].

1.3. Korekcja przestrzenna

W większości układów pomiarowych, w szczególności tam, gdzie promieniowanie może padać na odbiornik z różnych kierunków wymagane jest by głowica fotometryczna reagowała na powierzchniową gęstość strumienia świetlnego padającego na płaszczyznę pomiarową (natężenie oświetlenia), czyli by czułość kątowna była zgodna z prawem Lamberta. Uzyskuje się ją poprzez zastosowanie korekcji kątowej głowicy zwanej także korekcją przestrzenną.

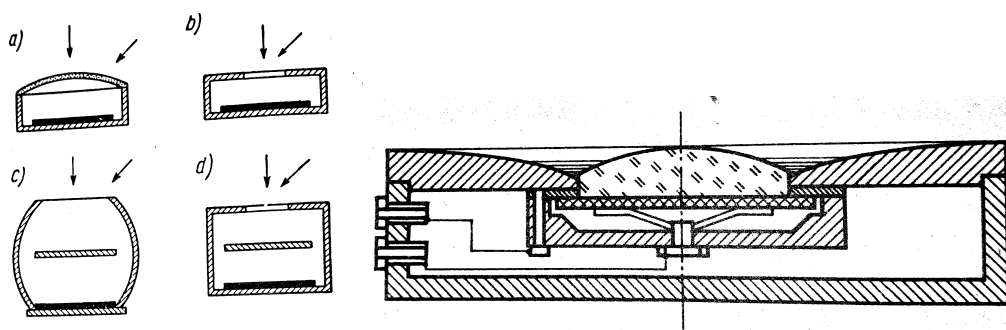
Korekcja ta polega na dopasowaniu charakterystyki kątowej czułości odbiornika fotoelektrycznego do funkcji kosinus we wszystkich płaszczyznach prostopadłych do powierzchni odbiornika. Korekcję przestrzenną czasem nazywa się korekcją kątowną bądź korekcją kosinusoidalną.

Naturalna charakterystyka czułości kątowej odbiornika znacząco odbiega od charakterystyki oczekiwanej. Głównymi przyczynami tej różnicy są elementy konstrukcyjne odbiornika takie jak wystające elementy mocujące, elementy obudowy przesłaniające powierzchnię odbiornika w pewnych kierunkach, a także filtr korekcji barwnej, którego pozorna grubość zmienia się wraz ze zmianą kąta padania światła na jego powierzchnię. Zaslania nie jest szczególnie widoczne przy oświetlaniu przetwornika z kierunków dalekich od normalnego.



Rys. 2. Budowa przetwornika fotoelektrycznego z uwzględnieniem elementów zaslaniających bieg światła [3].

W zależności od wymaganych parametrów głowicy stosuje się różne konstrukcje filtrów korekcji przestrzennej. Są to z reguły struktury przestrzenne pozwalające na homogenizację oświetlenia powierzchni przetwornika wraz z filtrem korekcji barwnej. Ich działanie polega na zebraniu promieniowania z odpowiedniej części przestrzeni (najczęściej półprzestrzeni) z odpowiednią czułością i rozproszeniu go na dyfuzyjnych powierzchniach przepuszczających i odbijających opisanych lambertowską charakterystyką oddziaływania. Filtr korekcji przestrzennej zwykle składa się z kombinacji filtrów mlecznych oraz komory mieszającej położonej bezpośrednio nad skorygowanym widmowo odbiornikiem promieniowania. W wyjątkowych przypadkach, gdy oczekiwana jest mała wysokość głowicy fotometrycznej pomija się komorę mieszającą a nawet stosuje się korekcję wykorzystującą elementy o kierunkowym charakterze oddziaływania na padające na głowicę światło [4]. Niedopasowanie korekcji przestrzennej głowicy określa się za pomocą błędu f_2 [2].



Rys. 3. Budowa przykładowych filtrów korekcji przestrzennej[3, 5].

Jakość korekcji przestrzennej opisuje się funkcją

$$\Delta(\theta, \varphi) = \frac{i_G(\theta, \varphi)}{i_G(\theta_0 = 0, \varphi) \cos \theta} \quad (2)$$

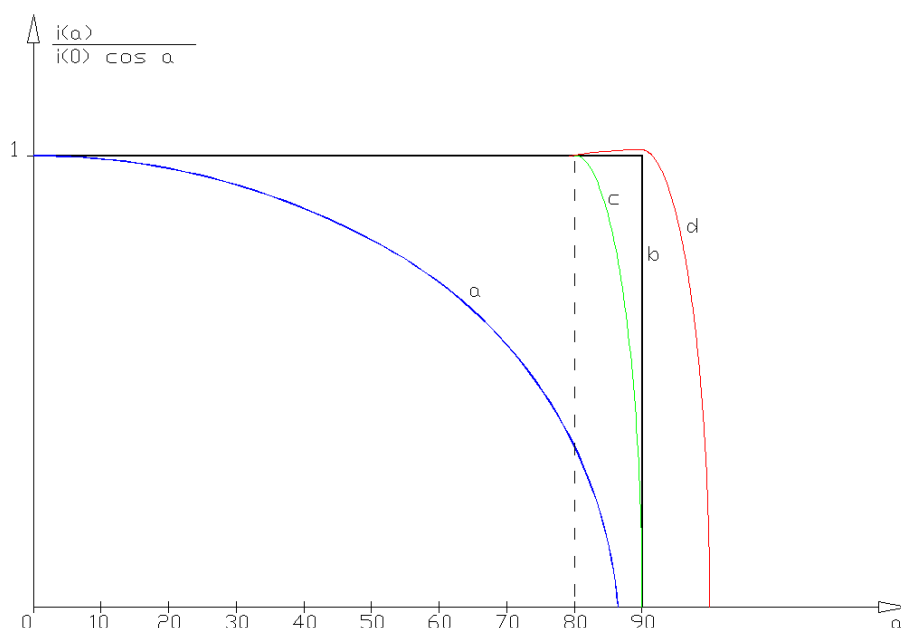
gdzie:

θ – kąt zenitalny,

φ – kąt azymutalny.

Z funkcji tej wylicza się błąd głowicy f_2

$$f_2 = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^3 \int_0^{80 \frac{\pi}{180}} \Delta(\theta, j \frac{\pi}{2}) d\theta \quad (3)$$



Rys. 4. Charakterystyki kątowe: a) naturalna, b) idealna, c) oczekiwana, d) niedopuszczalna.

1.4. Klasa miernika

Przy wyznaczaniu klasy miernika bierze się pod uwagę dwie wartości cząstkowych uchybów miernika wynikających z niedopasowania widmowego f_1' oraz niedopasowania przestrzennego f_2 .

Tabela 1. Dopuszczalne wartości błędów niedopasowania f_1' i f_2 dla mierników różnych klas [1]

	Maksymalny dopuszczalny błąd dla klasy			
	Klasa „L”	Klasa „A”	Klasa „B”	Klasa „C”
Błąd niedopasowania widmowego f_1'	1,5%	3%	6%	9%
Błąd niedopasowania przestrzennego f_2	– *)	1,5%	3%	6%

*) Mierniki klasy „L” są miernikami laboratoryjnymi służącymi do kierunkowego pomiaru światłości i z powodu pracy głowicy wyłącznie w kierunkach zbliżonych do osiowego nie zachodzi potrzeba ustalania dopuszczalnego błędu niedopasowania przestrzennego, który ma istotny wpływ na jakość pomiaru przy padaniu światła na powierzchnię czynną głowicy pod dużymi kątami.

2. Cel i opis ćwiczenia

2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową, działaniem i właściwościami głowic fotometrycznych wyposażonych w korekcję widmową oraz przestrzenną. W ramach wykonania ćwiczenia sprawdza się poprawność korekcji przykładowych głowic fotometrycznych. Badaniu podlegają dwie charakterystyki: korekcji widmowej i korekcji przestrzennej.

2.2. Badanie korekcji widmowej

Badania korekcji widmowej głowicy fotometrycznej dokonuje się przy użyciu monochromatora. Pierwszym etapem jest przygotowanie przyrządu pomiarowego do pracy poprzez wyznaczenie krzywych wzorcowania i dyspersji monochromatora [6].

Wzorcowanie monochromatora polega na ustaleniu zależności pomiędzy ustawieniem kątowym pryzmatu (wyrażonym w działkach bębna monochromatora) a długością fali padającą na szczelinę wyjściową monochromatora, wyznaczeniu krzywej dyspersji oraz określeniu rozdzielczości monochromatora czyli zależności pomiędzy szerokością szczeliny wejściowej a zakresem widmowym przez nią przechodzącym dla każdej długości fali.

W tym celu potrzebne jest źródło lub grupa źródeł promieniująca światło o znanych i łatwo identyfikowalnych długościach fali. Musi to być zatem źródło o widmie nieciągłym, lub grupa źródeł o świetle monochromatycznym. Układ pomiarowy (Rys. 5) składa się ze źródła światła (1) zasilanego poprzez układ zasilania (UZ), kondensora (2), monochromatora (3) oraz odbiornika promieniowania (OF). Szczelinę wejściową monochromatora oświetla się źródłem poprzez kondensor. Kondensator należy tak ustawić, by uzyskać ostry obraz źródła na płaszczyźnie szczeliny wejściowej. Odległości pomiędzy elementami układu pomiarowego ustala się z zależności:

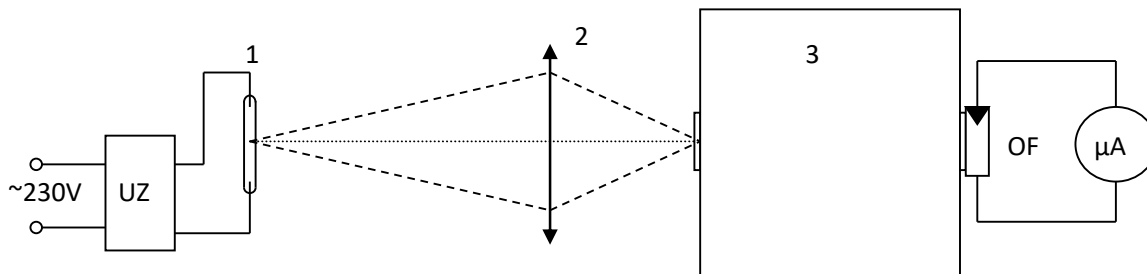
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (4)$$

gdzie:

f – długość ogniskowej kondensora,

a – odległość między źródłem światła a kondensorem,

b – odległość kondensora od monochromatora.



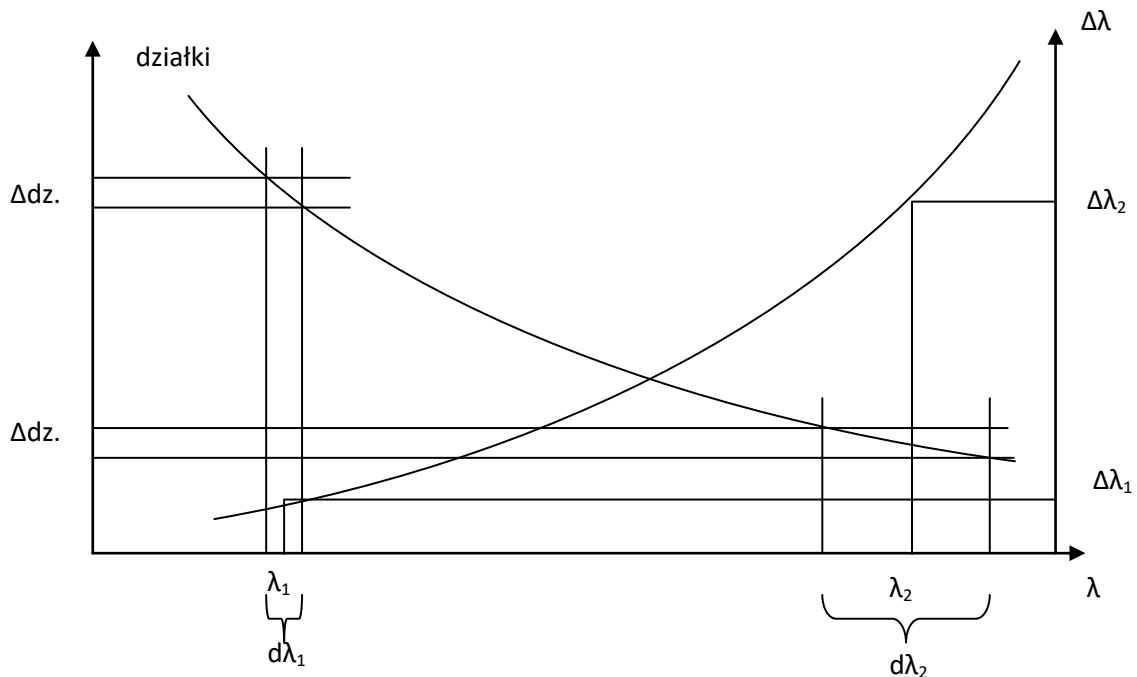
Rys. 5. Układ do wyznaczenia rozkładu czułości widmowej głowicy fotometrycznej.

Wzorcowania dokonuje się poprzez odnalezienie takiego położenia pryzmatu, że dany prążek widma pada na szczelinę wyjściową. Wiemy, że tak jest, gdy wskazanie odbiornika umieszczonego za szczeliną wyjściową osiąga lokalne maksimum. Po kolei należy odnaleźć poszczególne prążki widma, notując położenie pryzmatu wyrażone w działkach bębna. Konieczne będzie zanotowanie także „końców” prążka, czyli takich położenia pryzmatu, przy których wskazanie odbiornika zaczyna narastać od poziomu tła (za taką granicę można przyjąć 10% wartości lokalnego maksimum). W przypadku braku niskoprężnych lamp wyładowczych posiadających widmo prążkowe można użyć do wzorcowania żarówki z filtrami interferencyjnymi. W takim przypadku należy zanotować rzeczywiste, a nie nominalne, długości fali, do której dany filtr jest dopasowany.

Krzywą wzorcowania i krzywą dyspersji (Rys. 6.) wykreśla się na jednym wykresie. Krzywa wzorcowania jest odwróconym wykresem zależności długości fali padającej na szczelinę wyjściową monochromatora od położenia kąowego pryzmatu wyrażonego w działkach

bębna. Krzywa dyspersji wyraża zdolność rozdzielczości monochromatora w funkcji długości fali. Matematycznie jest odwrotnością pochodnej krzywej wzorcowania.

Wyznaczenie obu krzywych rozpoczyna się od odłożenia na osi poziomej wartości długości fal poszczególnych prążków. Następnie z lewej strony wykresu umieszcza się oś, na której odkładane są wartości podziałki bębna dla poszczególnych długości fali. Na wykresie zaznacza się punktem położenie maksimum wskazania, a pionowymi odcinkami cały zakres „łapania” prążka. Na podstawie tych punktów wykreśla się krzywą wzorcowania stosując jedną ze znanych metod aproksymacji.



Rys. 6. Wykresy krzywych: wzorcowania monochromatora i dyspersji [4].

Krzywą dyspersji wykreśla się na podstawie wyznaczonej uprzednio krzywej wzorcowania. Należy wybrać pewną, stałą długość przedziału Δdz w dziedzinie położenia bębna monochromatora. Długość ta musi być na tyle duża, by jak najdokładniej ustalić przyrosty długości fali $\Delta \lambda$ dla tego przedziału, a jednocześnie na tyle mała by nieliniowość krzywej wewnątrz przedziału była pomijalna. Dla każdej długości fali należy wyznaczyć długość przedziału $d\lambda$ odpowiadającą na krzywej wzorcowania przedziałowi Δdz . Na tej podstawie wykreśla się w funkcji długości fali krzywą, będącą długością $\Delta \lambda$ przypadającą na jedną działkę bębna.

Dysponując krzywą dyspersji monochromatora można przystąpić do badania rozkładu czułości widmowej głowicy fotometrycznej. Układ pomiarowy złożony ze wzorcowego źródła światła w postaci żarówki (1), emitującego promieniowanie odpowiadające ciału czarnemu w temperaturze 2856 K, kolimatora (2), wywzorcowanego monochromatora (3) oraz badanej głowicy fotometrycznej (4) należy zestawić według rysunku 5. Po wyjustowaniu układu wykonuje się pomiary rozkładu widmowego promieniowania posiadanego źródła wzorcowego w zakresie fal widzialnych ze stałym krokiem zmiany długości fali. Prąd głowicy dla wybranej, bieżącej długości fali λ wynosi

$$i(\lambda) = \Phi_A(\lambda) V_G(\lambda) \Delta_\lambda(\lambda) \quad (5)$$

gdzie:

$i(\lambda)$ – prąd głowicy,

$\Phi_A(\lambda)$ – rozkład widmowy promieniowania ciała czarnego w temperaturze 2856 K (iluminant A) dany tabelą 2,

$\Delta_\lambda(\lambda)$ – dyspersja monochromatora dla długości fali równej λ .

$V_G(\lambda)$ – czułość widmowa głowicy dla danej długości fali λ .

Z powyższego równania wylicza się wartości $V_G(\lambda)$ w całym zakresie widzialnym promieniowania (380 – 760 nm).

Błąd f_I wylicza się podstawiając uzyskany rozkład czułości $V_G(\lambda)$ do wzoru (1).

Tabela 2. Rozkład widmowy promieniowania iluminantu A w zakresie widzialnym

Dł. fali	Egzytancja	Dł. fali	Egzytancja	Dł. fali	Egzytancja	Dł. fali	Egzytancja
380	9,80	480	48,24	580	114,44	680	185,43
385	10,90	485	51,04	585	118,08	685	188,70
390	12,09	490	53,91	590	121,73	690	191,93
395	13,36	495	56,85	595	125,39	695	195,11
400	14,71	500	59,86	600	129,04	700	198,26
405	16,15	505	62,93	605	132,70	705	201,35
410	17,68	510	66,06	610	136,34	710	204,40
415	19,29	515	69,25	615	139,99	715	207,41
420	21,00	520	72,50	620	143,62	720	210,36
425	22,79	525	75,19	625	147,23	725	213,26
430	24,67	530	79,13	630	150,83	730	216,11
435	26,64	535	82,52	635	154,42	735	218,91
440	28,70	540	85,95	640	157,98	740	221,66
445	30,85	545	89,41	645	161,51	745	224,35
450	33,09	550	92,91	650	165,02	750	226,99
455	35,41	555	96,44	655	168,51	755	229,58
460	37,81	560	100,00	660	171,96	760	232,11
465	40,30	565	103,58	665	175,38	765	234,58
470	42,87	570	107,18	670	178,76	770	237,00
475	45,52	575	110,80	675	182,11	775	239,36
						780	241,67

2.3. Badanie korekcji przestrzennej

Badania korekcji przestrzennej głowicy dokonuje się na stanowisku pomiarowym złożonym z goniometru, ławy fotometrycznej i umieszczonego na niej quasi-punktowego, wzorcowego źródła światła przedstawionego na rysunku 7. Głowicę fotometryczną umieszcza się na goniometrze a źródło wzorcowe na powiązanej z nim ławie fotometrycznej tak, by głowicę móc oświetlić z dowolnie wybranego kierunku. Należy zadbać by został zachowany warunek granicznej odległości fotometrowania (pomiar w polu dalekim).



Rys. 7. Układ do wyznaczenia rozkładu przestrzennego czułości głowicy fotometrycznej.

Należy wykonać odczyt wskazania miernika fotoprądu dołączonego do głowicy fotometrycznej dla różnych kierunków oświetlenia głowicy, a następnie dla każdego z nich obliczyć odchylenie od wartości oczekiwanej używając wzoru (2).

3. Spowzdzanie

W sprawozdaniu należy przedstawić wyniki wykonanych pomiarów wraz z przykładowymi obliczeniami, obliczone rozkłady czułości widmowej i przestrzennej badanych głowicy fotometrycznych, obliczone z nich uchyby f_1' i f_2 oraz ustaloną na ich podstawie klasę miernika. Uzyskane rozkłady czułości oraz rozkłady uchybu należy przedstawić w postaci stosownych wykresów.

4. Pytania weryfikacyjne

- Co to jest korekcja widmowa głowicy fotometrycznej?

Przykładowa odpowiedź:

Korekcja widmowa głowicy fotometrycznej to dopasowanie charakterystyki widmowej jej czułości do rozkładu widmowego czułości oka ludzkiego przystosowanego do jasności.

Realizowana jest za pomocą odpowiednio dobranego filtra barwnego. Pozwala na zmierzenie strumienia świetlnego zgodnie z odczuciami ilościowymi człowieka.

- Co to jest korekcja przestrzenna głowicy fotometrycznej?

Przykładowa odpowiedź:

Korekcja przestrzenna głowicy fotometrycznej jest to dostosowanie charakterystyki kątowej czułości odbiornika fotoelektrycznego proporcjonalnie do funkcji kosinus kąta padania światła na powierzchnię światłoczułą odbiornika. Dzięki tej korekcji głowica mierzy gęstość strumienia świetlnego padającego na płaszczyznę, w której leży powierzchnia światłoczuła odbiornika.

- Co określa parametr f_1' ?

Przykładowa odpowiedź:

Parametr f_1' jest uchybem odbiornika fotoelektrycznego wynikającym z nieidealnego dopasowania charakterystyki widmowej czułości odbiornika fotoelektrycznego do rozkładu widmowego czułości oka ludzkiego przystosowanego do jasności. Liczbowo odpowiada

powierzchni różnic pomiędzy obszarem znajdującym się pod krzywą rozkładu widmowego czułości oka ludzkiego przystosowanego do jasności i obszarem pod krzywą rozkładu widmowego nieidealnie skorygowanego odbiornika fotoelektrycznego wyrażonej jako procent powierzchni pod krzywą rozkładu widmowego czułości oka ludzkiego przystosowanego do jasności.

- Co określa parametr f_2 ?

Przykładowa odpowiedź:

Parametr f_2 jest uchybem odbiornika fotoelektrycznego wynikającym z nieidealnego dopasowania charakterystyki kątowej odbiornika fotoelektrycznego do funkcji kosinus. Liczbowo odpowiada średniej z całek z ilorazów czułości odbiornika i funkcji kosinus w zakresie kątów od 0 do 80 stopni w czterech wzajemnie prostopadłych półpłaszczyznach.

5. Literatura

- [1] Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J., Analiza wybranych właściwości różnych typów luksomierzy, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 268, 2015
- [2] ISO/CIE 19476:2014 Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters
- [3] Oleszyński T.: Miernictwo techniki świetlnej. PWN, Warszawa 1957,
- [4] Fryc I., Korekcja widmowa i przestrzenna fotometrów, Rozprawy Naukowe PB, Białystok 2000
- [5] Helbig E.: Wstęp do fotometrii, WNT. Warszawa 1975
- [6] Czyżewski D., Zalewski S. Laboratorium fotometrii i kolorimetrii, OWPW 2007