

## Analiza dokładności pomiaru, względnego rozkładu egzytancji widmowej źródeł światła, dokonanego przy użyciu spektrometri kompaktowego

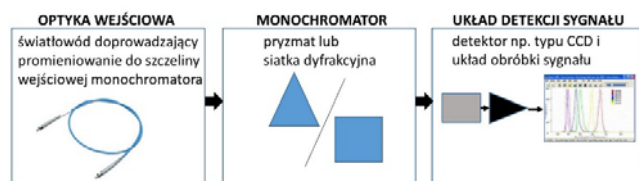
**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę wpływu właściwości spektralnych toru optycznego spektrometri (tj. układu siatki dyfrakcyjnej, detektor CCD) na dokładność pomiarów rozkładów egzytancji widmowych współczesnych źródeł światła. Analizie zostały poddane układy elektro-optyczne spektrometri zbudowane z różnych kombinacji siatek dyfrakcyjnych i detektorów.

**Summary.** The paper presents an analysis of the impact of spectral properties of spectrometric electro-optical bench (ie. diffraction grating, CCD detector) on the measurement accuracy of spectral power distribution of light sources. Analysis were performed for electro-optical spectrometric systems which were built on different combinations of diffraction gratings and detectors. (**Analysis of the impact of spectrometric bench on the measurement accuracy of the spectral power distribution of light sources**)

**Słowa kluczowe:** spektrometr, detektor, siatka dyfrakcyjna, źródło światła  
**Keywords:** spectrometer, detector, diffracting grating, light source

### Wstęp

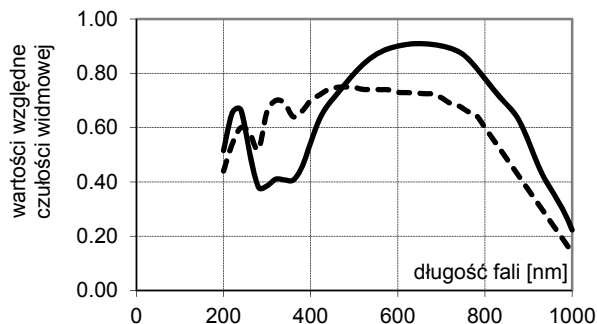
Przyrząd, którym mierzy się rozkład egzytancji widmowej źródeł światła nazywany jest spektrometrem. Zasadniczo składa się on z trzech elementów (rys. 1): optyki wejściowej, monochromatora oraz z detektora z układem zbierającym i przetwarzającym dane. W zależności od wymagań pomiarowych zarówno optyka wejściowa, monochromator i detektor mogą mieć różne konfiguracje i parametry.



Rys. 1. Budowa spektrometri

Współcześnie coraz popularniejszymi, ze względu na niewielkie rozmiary oraz masę, czas pomiaru i cenę przyrządu, stają się kompaktowe spektrometry wielokanałowe, zbudowane z użyciem detektorów typu CCD lub linijek diodowych. Mierzone promieniowanie świetlne, do układu optycznego monochromatora, jest wprowadzone, przy użyciu światłowodu, poprzez szczelinę wejściową. Od rozmiaru tej szczeliny (np. 10  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ ) zależy wartość rozdzielczości optycznej oraz współczynnika przepuszczania danego spektrometri. Następnie w układzie monochromatora (siatki dyfrakcyjnej), mierzone promieniowanie jest rozdzielane na sygnały o określonej długości fali. tj. zostaje zmonochromatyzowane i w kolejnym etapie, pada na ściśle określony piksel matrycy pomiarowej CCD. Dzięki temu, możliwe jest zmierzenie rozkładu widmowego promieniowania w czasie jednej ekspozycji. Sygnały elektryczne z fotodetektora, są w kolejnym etapie digitalizowane przez przetwornik A/C i obrabiane przy użyciu komputera. W efekcie, na ekranie komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie, otrzymujemy informację o rozkładzie widmowym (np. egzytancji lub mocy promienistej) mierzonego promieniowania optycznego.

Rodzaj zastosowanego detektora decyduje o przedziale widmowym, w którym może pracować dany spektrometr [2]. Przykładowe charakterystyki rozkładu czułości widmowej detektorów typu CCD, firmy Hamamatsu, stosowanych w spektrometrii tj. matrycy typu S10200-02 i typu S1040-1006 przedstawiono na rysunku 2 [1]. Widmowy przedział pracy spektrometri zależy także od rodzaju zastosowanej w jego konstrukcji siatki dyfrakcyjnej (jej efektywności dyfrakcyjnej). Od rodzaju siatki dyfrakcyjnej zależy także krok pomiarowy oraz czułość i progowa wartość sygnału mierzonego danym spektrometrem [3]. Czułość przyrządu ma zasadniczy wpływ, na jakość wykonywanych nim pomiarów. W spektrometriach, w których detektorem jest matryca CCD, jakość pomiaru zależy w dużej mierze od znalezienia optymalnej wartości czasu ekspozycji (czasu całkowania  $IT$ ) mierzonego sygnału. Większy czas całkowania przyrządu oznacza relatywnie większą wartość mierzonego sygnału i jest jednym ze sposobów zwiększania stosunku sygnału do szumu. Jednak w przypadku mierzenia źródeł o ciągłym charakterze rozkładu widmowego, nie można poprzez zwiększenie czasu ekspozycji, zwiększać wartości mierzonego sygnału w obszarach długości fali, w których spektrometr charakteryzuje się niewielką wartością czułości widmowej, ponieważ spowodowałoby to nasycenie detektora CCD w obszarach długości fali, przy których ten przyrząd pomiarowy ma wysoką czułość.



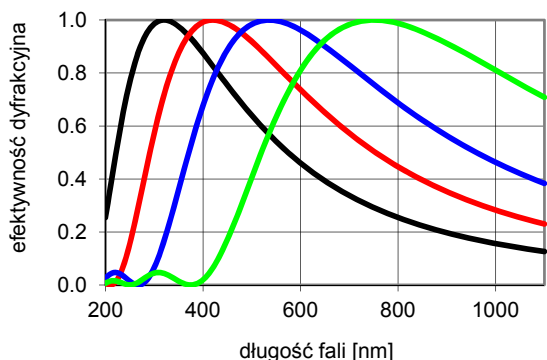
Rys. 2. Charakterystyki czułości widmowej matrycy CCD Hamamatsu typu S10200-02 (linia ciągła) i S1040-1006 (linia przerywana) [1]

W spektrometriach najczęściej stosowane są siatki typu *blaze*, ponieważ ich efektywność dyfrakcyjna  $\eta(\lambda)$  może wynosić nawet 100% [4]. Zależność efektywności dyfrakcyjnej, od długości fali, dla siatek dyfrakcyjnych typu *blaze* opisana jest równaniem [5, 6]:

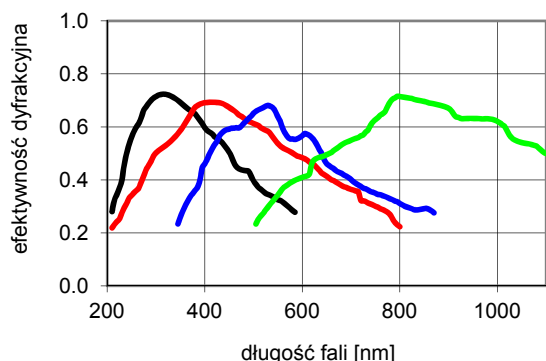
$$(1) \quad \eta(\lambda) = \text{sinc}^2\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda}\right)$$

gdzie:  $\lambda_0$  oznacza długość fali, przy której wydajność dyfrakcyjna siatki jest równa 100%, a  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ .

Przykładowe funkcje efektywności dyfrakcyjnej siatki *blaze* (dla  $\lambda_0$  równego 320 nm, 420 nm, 550 nm i 750 nm) pokazano na rysunku 3, a przykładowe charakterystyki efektywności dyfrakcyjnej tego typu siatek dostępnych komercyjnie [7] przedstawiono na rysunku 4.



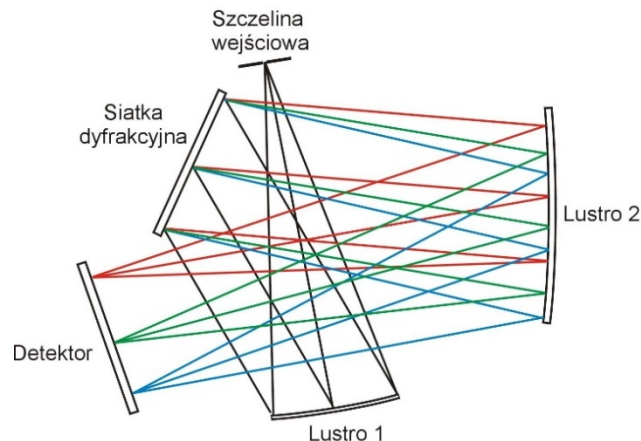
Rys. 3. Zależność efektywności dyfrakcyjnej siatek typu *blaze* od długości fali (wartości teoretyczne)



Rys. 4. Charakterystyki efektywności dyfrakcyjnej komercyjnie dostępnych siatek typu *blaze* [7]

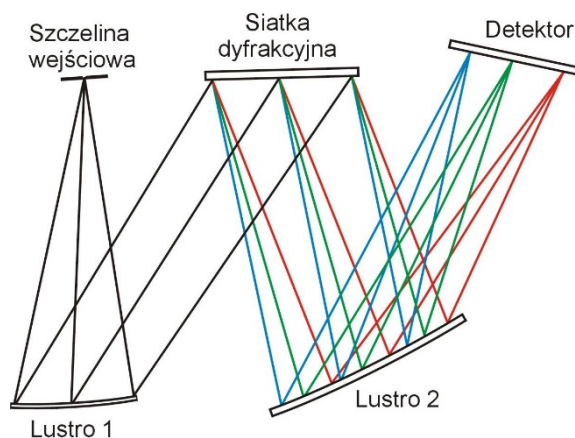
Istnieje wiele możliwości konfigurowania toru optycznego spektrometri. Najczęściej stosowanymi są układy: skrzyżowany Czerny-Turner (rys. 5), rozłożony Czerny-Turner (rys. 6) oraz wklęsło-holograficzny (rys. 7). Układ typu skrzyżowany Czerny-Turner składa się z dwu zwierciadeł wklęsłych i jednej siatki dyfrakcyjnej (rys. 5). Ogniskowa zwierciadła nr 1 jest tak dobrana, aby światło ze szczeliny wejściowej padało, w postaci skolimowanej wiązki, na siatkę dyfrakcyjną. Po rozłożeniu promieniowania na poszczególne długości fali jest to promieniowanie przekierowywane przy użyciu zwierciadła nr 2 na płaszczyznę pomiarową detektora np. typu CCD. Układ optyczny tego typu, pomimo niewątpliwych zalet takich jak np. dobra korekcja comy, charakteryzuje się dużymi aberracjami, i w związku z tym rozciąga on geometryczny obraz szczeliny wejściowej. W związku z tym, tego typu układ optyczny, jest używany w spektrometriach o niewielkich wymaganiach co do rozdzielczości widmowej.

Ponadto tego typu układ optyczny charakteryzuje się wysokim poziomem niepożądanego, w czasie pomiarów, światła rozproszonego.

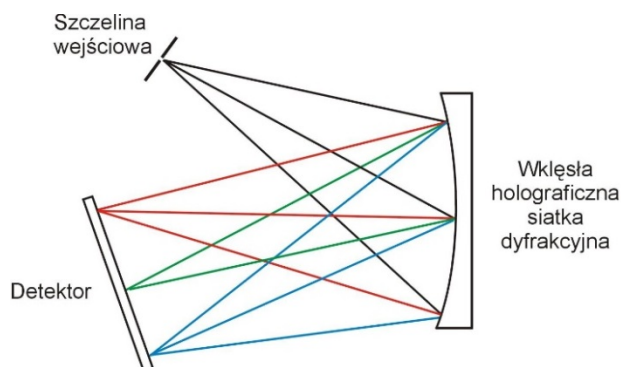


Rys. 5. Schemat układu typu skrzyżowany Czerny-Turner

Prostą i efektywną metodą minimalizacji tego problemu jest „rozłożenie” tego układu optycznego (rys. 6). Dzięki temu można ustawić wewnątrz blokady optyczne, dzięki którym poziom światła rozproszonego wewnątrz przyrządu, będzie znacznie zmniejszony. Zagadnienie to jest szczególnie istotnym, przy pomiarach rozkładów widmowych w zakresie UV, gdzie wartość sygnału pochodząca od promieniowania rozproszonego, staje się porównywalna z mierzonym sygnałem optycznym. Z tego powodu, układ spektrometri typu rozłożony Czerny-Turner, jest idealnym rozwiązaniem w aplikacjach z zakresu UV.



Rys. 6. Schemat układu typu rozłożony Czerny-Turner



Rys. 7. Schemat układu typu wklęsło-holograficzny

Innym typowym układem, stosowanym w torze optycznym spektrometri, jest konstrukcja na bazie wklęsło-holograficznego elementu dyfrakcyjnego (rys. 7).

Tego typu siatka dyfrakcyjna, spełnia w tego rodzaju układzie optycznym podwójną rolę. Rozdziela ona promieniowanie na poszczególne składowe widma i jednocześnie służy jako zwierciadło ogniskujące promieniowanie. Dzięki temu liczba elementów optycznych w układzie spektrometrii zostaje zredukowana i zwiększa się współczynnik przepuszczalności przyrządu. Ponadto umożliwiona jest zarazem korekcja aberracji optycznych zachodzących w układzie typu Czerny-Turner.

Bez względu na zastosowaną konstrukcję monochromatora, w płaszczyźnie obrazowej układu optycznego umieszczany jest fotodetektor (najczęściej typu CCD). Sygnał elektryczny z tej matrycy jest obrabiany przez układ elektroniczny spektrometrii. Tego rodzaju typ przetwarzania i obróbki mierzonego promieniowania optycznego, stanowi źródło błędów pomiarowych spektrometrii. Oszacowaniu wartości systematycznego błędów pomiarowych spektrometrii jest poświęcona poniższa sekcja tej pracy.

### Oszacowanie wartości systematycznego błędów pomiarowych spektrometrii

W celu oszacowania wartości systematycznego błędów pomiarowych, przeprowadzona zostanie analiza matematyczna tego zagadnienia. W dalszych rozważaniach przyjęto następujące oznaczenia:

- $s(\lambda)$  - czułość detektora przy długości fali  $\lambda$ ,
- $\eta(\lambda)$  - efektywność dyfrakcyjna siatki przy długości fali  $\lambda$ ,
- $I(\lambda)$  - egzytancja monochromatyczna mierzonego źródła,
- $N$  - liczba możliwych stanów logicznych przy na wyjściu przetwornika A/C (w przypadku 16-bitowego (idealnego) przetwornika  $N = 65536$ ).

Na wyjściu przetwornika A/C spektrometrii typu Czerny-Turner (przy pominięciu strat na odbicie światła od zwierciadeł układu) wartość sygnału dla danego  $\lambda$  jest proporcjonalna do wyrażenia (2).

$$(2) \quad U(\lambda) = s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)$$

Na wyjściu przetwornika A/C uzyskamy, przy określonym  $\lambda$ , wartość opisaną zależnością (3). (zakładając, że przy pewnej długości fali  $\lambda$ , na wyjściu przetwornika A/C uzyskamy  $(N-1)$  stanów logicznych, ponadto układ ten pracuje liniowo oraz a detektor nie jest nasycony).

$$(3) \quad n(\lambda) = (N - 1) \frac{s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)}{\max_{\lambda} [s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)]}$$

Wartość maksymalnego błędów pomiarowych można oszacować metodą różniczki zupełnej [8]. W przypadku, gdy znana jest dokładna wartość iloczynu  $S(\lambda) = s(\lambda)\eta(\lambda)$ , wartość  $n(\lambda)$  jest co najmniej obciążona niepewnością pomiarową  $\Delta n = 1$ . W rzeczywistości, uwzględniając szumy detektora ten parametr może być znacznie większy. Czyli względny błąd pomiaru będzie równy:

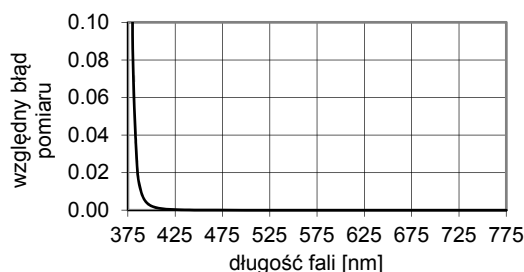
$$(4) \quad \frac{\Delta n(\lambda)}{n(\lambda)} = \frac{\max_{\lambda} [s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)]}{(N - 1)s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)} \Delta n$$

Z analizy równania (4) wynika, że wartość względnego błędów pomiaru będzie szczególnie duża, dla tych długości fali, dla których wartość iloczynu  $s(\lambda)\eta(\lambda)I(\lambda)$  jest mała. Dzieje się tak, dla tych długości fali, dla których czułość spektrometrii (proporcjonalna do iloczynu  $s(\lambda)\eta(\lambda)$ ) jest niewielka lub gdy egzytancja badanego źródła ma małą wartość. Ponadto równanie (4) jest słuszne jedynie w przypadku spektrometrii idealnie skalibrowanego.

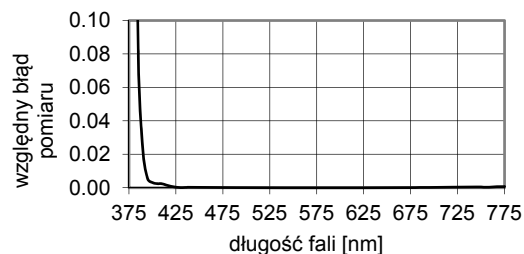
### Dokładność pomiarów spektrometrii

W celu zbadania wpływu, na dokładność pomiarów spektrometrii, charakterystyki czułości widmowej detektora, charakterystyki efektywności dyfrakcyjnej siatki dyfrakcyjnej i rozkładu egzytancji widmowej badanego źródła, wykonano szereg symulacji. Analizę przeprowadzono przyjmując, że w układzie pracuje detektor CCD typu S10200-02 firmy Hamamatsu [1], a efektywność dyfrakcyjna zastosowanej siatki opisana jest równaniem (1) odpowiednio dla  $\lambda_0 = 550$  nm i  $\lambda_0 = 750$  nm. Przyjęcie teoretycznego rozkładu efektywności dyfrakcyjnej, stanowi uproszczenie i jest możliwe dzięki temu, że teoretyczne (rys. 3) i rzeczywiste (rys. 4) wartości efektywności dyfrakcyjnej siatki optymalizowanej dla danego  $\lambda_0$  są bardzo zbliżone.

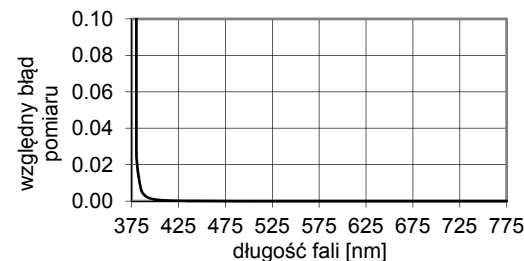
Na rysunkach 8, 9 i 10 przedstawiono (dla siatki, której  $\lambda_0 = 750$  nm) wartość względnego błędów pomiaru egzytancji iluminantu A, świetłówki Cool White i źródła równoenergetycznego, w zależności od długości fali. Rysunki 11, 12 i 13 przedstawiają wartość względnego błędów pomiaru egzytancji iluminantu A, świetłówki Cool White i źródła równoenergetycznego, w przypadku układu pracującego z siatką której  $\lambda_0 = 550$  nm.



Rys. 8. Względny błąd pomiaru egzytancji iluminantu A (siatka o  $\lambda_0 = 750$  nm)

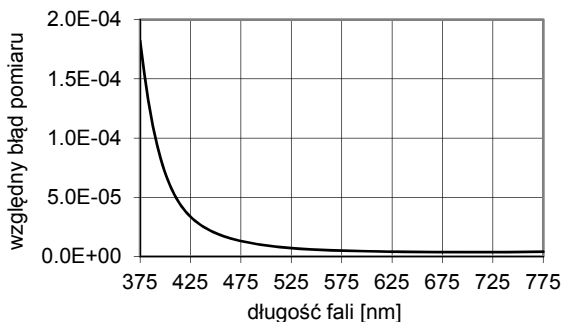


Rys. 9. Względny błąd pomiaru egzytancji świetłówki Cool White (siatka o  $\lambda_0 = 750$  nm)

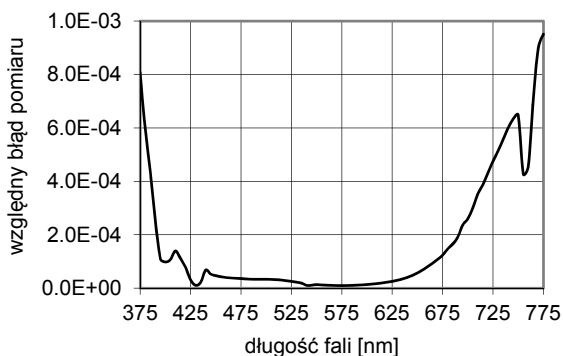


Rys. 10. Względny błąd pomiaru egzytancji źródła równoenergetycznego (siatka o  $\lambda_0 = 750$  nm)

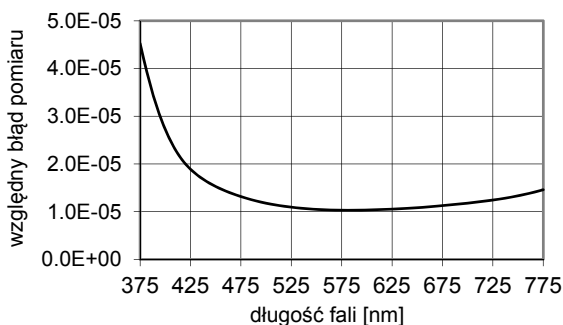
Uzyskane wartości błędów pomiaru, są niemal niezależnie od charakterystyki egzytancji badanego źródła i ich wartość jest największa w tych obszarach widma, w których czułość widmowa toru pomiarowego spektrometrii jest mała.



Rys. 11. Względny błąd pomiaru egzytancji iluminantu A (siatka o  $\lambda_0 = 550$  nm)



Rys. 12. Względny błąd pomiaru egzytancji świetlówki Cool White (siatka o  $\lambda_0 = 550$  nm)



Rys. 13. Względny błąd pomiaru egzytancji źródła równoenergetycznego (siatka o  $\lambda_0 = 550$  nm)

Równanie (4) jest prawdziwe jedynie w przypadku spektrometri idealnie wyskalowanego tj. przy dokładnej znajomości wartości  $S(\lambda)$ . W rzeczywistości wartość  $S(\lambda)$  pochodzi z pomiarów, a w związku z tym będzie ona obciążona określonym błędem  $\Delta S(\lambda)$ . Z tego powodu względny błąd pomiaru wykonanego spektrometrem będzie równy:

$$(5) \frac{\Delta n(\lambda)}{n(\lambda)} = \frac{\max_{\lambda} [S(\lambda)I(\lambda)]}{(N-1)S(\lambda)I(\lambda)} \Delta n + \frac{\Delta S(\lambda)}{S(\lambda)}$$

W praktyce pomiarowej, nie dokonuje się bezpośredniego pomiaru wartości iloczynu  $S(\lambda) = s(\lambda)\eta(\lambda)$ , ale wartość tą wyznacza się w czasie skalowania przyrządu.

Niech  $I_0(\lambda)$  oznacza egzytancję monochromatyczną emitowaną przez źródło kalibracyjne, zaś  $\Delta I_0(\lambda)$  wartość błędu wyznaczenia tejże egzytancji. Zakładając, że w czasie kalibracji detektor użyty w spektrometrze nie jest nasycony, a cały układ pracuje liniowo, wartość

uzyskana na wyjściu przetwornika A/C tego przyrządu, dla określonej długości fali  $\lambda$ , jest równa:

$$(6) \quad n_0(\lambda) = \alpha S(\lambda)I_0(\lambda),$$

gdzie  $\alpha$  oznacza stałą zależną od czasu całkowania (czasu ekspozycji  $IT$ ).

Z równania (6) można wyznaczyć wartość  $S(\lambda)$  jako (7)

$$(7) \quad S(\lambda) = \frac{n_0(\lambda)}{\alpha I_0(\lambda)}.$$

Korzystając z metody różniczki zupełnej [8] można wyznaczyć błąd względny wartości  $S(\lambda)$  jako (8)

$$(8) \quad \frac{\Delta S(\lambda)}{S(\lambda)} = \frac{\Delta I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)} + \frac{\Delta n_0(\lambda)}{n_0(\lambda)}.$$

Przyjmując, że każda z wartości  $n_0(\lambda)$  jest obciążona niepewnością pomiarową  $\Delta n$  (minimalnie wynoszącą 1), z równania (8) otrzymujemy:

$$(9) \quad \frac{\Delta S(\lambda)}{S(\lambda)} = \frac{\Delta I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)} + \frac{\Delta n}{n_0(\lambda)}.$$

Aby wartość  $S(\lambda)$  obciążona była minimalnym błędem względnym, kalibracji przyrządu należy dokonywać w taki sposób, by wartości były możliwie duże, czyli w taki sposób, by detektor nie był nasycony, układ pracował liniowo i dla pewnej długości fali na wyjściu przetwornika uzyskać wartość  $(N-1)$ . W takim przypadku wartości  $n_0(\lambda)$  będą równe:

$$(10) \quad n_0(\lambda) = (N-1) \frac{S(\lambda)I_0(\lambda)}{\max_{\lambda} [S(\lambda)I_0(\lambda)]}.$$

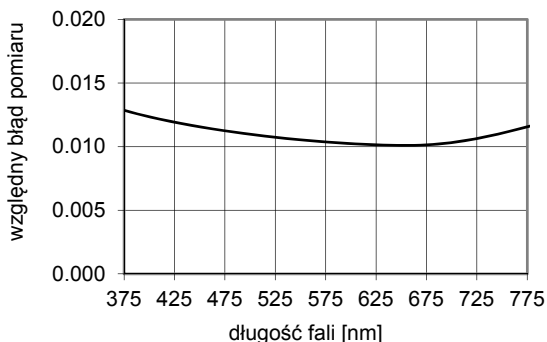
Na podstawie równań (5), (9) i (10) można wyznaczyć wartość  $\frac{\Delta n(\lambda)}{n(\lambda)}$  względnego błędu pomiarowego rozpatrywanego spektrometri.

$$(11) \quad \frac{\Delta n(\lambda)}{n(\lambda)} = \frac{\max_{\lambda} [S(\lambda)I(\lambda)]}{(N-1)S(\lambda)I(\lambda)} \Delta n + \frac{\max_{\lambda} [S(\lambda)I_0(\lambda)]}{(N-1)S(\lambda)I_0(\lambda)} \Delta n + \frac{\Delta I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

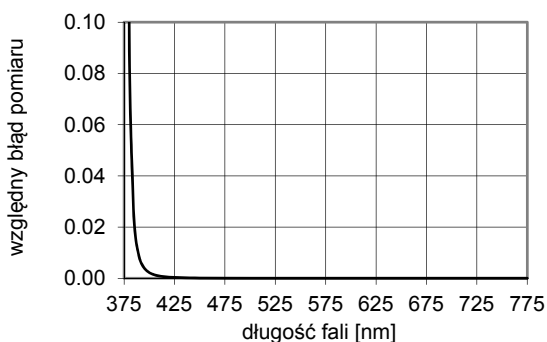
Z analizy równania (11) wynika, że wartość tego względnego błędu pomiarowego jest sumą błędów wynikających z ograniczonej rozdzielczości przetwornika analogowo-cyfrowego i charakterystyki czułości toru elektro-optycznego spektrometri  $A(\lambda)$  wyrażonego zależnością (12) i błędów skalowania tego przyrządu. Na błąd skalowania, składa się względny błąd  $C(\lambda)$  egzytancji źródła kalibracyjnego równy  $\Delta I_0/I_0$  (pokazany na rysunku 14) oraz pokazany na rysunkach 15 i 16 błąd  $B(\lambda)$  (wyrażony zależnością 13) spowodowany ograniczoną rozdzielczością przetwornika analogowo-cyfrowego oraz charakterystyką czułości widmowej przyrządu i charakterystyką egzytancji źródła kalibracyjnego.

$$(12) \quad A(\lambda) = \frac{\max_{\lambda} [S(\lambda)I(\lambda)]}{(N-1)S(\lambda)I(\lambda)} \Delta n$$

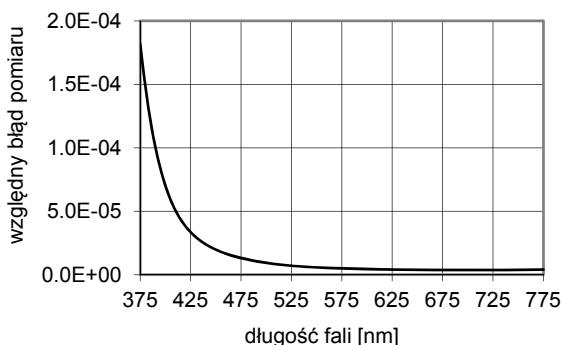
$$(13) \quad B(\lambda) = \frac{\max_{\lambda} [S(\lambda)I_0(\lambda)]}{(N-1)S(\lambda)I_0(\lambda)} \Delta n$$



Rys. 14. Względny błąd wyznaczenia rozkładu widmowego egzytancji źródła kalibracyjnego [9]



Rys. 15. Względny błąd pomiaru spektrometru spowodowany czułością jego toru elektro-optycznego (detektor S10200-02 i siatka o  $\lambda_0 = 750$  nm) oraz egzytancją źródła kalibracyjnego



Rys. 16. Względny błąd pomiaru spektrometru spowodowany czułością jego toru elektro-optycznego (detektor S10200-02 i siatka o  $\lambda_0 = 550$  nm) oraz egzytancją źródła kalibracyjnego

Przeprowadzona analiza pokazuje, że wartość względnego błęd pomiarowego spektrometru, jest między innymi zależna od długości fali mierzonego nim promieniowania. W przypadku, gdy wartość czułości toru elektro-optycznego przyrządu jest duża, względny błąd pomiaru jest niewielki i dominującą część jego wartości stanowi błąd egzytancji źródła kalibracyjnego (rysunki 11,

12, 13, 14 i 16). Jeżeli jednak wartość tej czułości jest mała, to względny błąd pomiaru może osiągać bardzo duże wartości, w porównaniu z błędem egzytancji źródła kalibracyjnego (rysunki: 8, 9, 10, 14 i 15).

### Wnioski

Przeprowadzona, w niniejszej pracy, analiza matematyczna wykazała, że możliwość wykonania dokładnych pomiarów spektrometrycznych istnieje jedynie wtedy, gdy kalibracja przyrządu została dokonana za pomocą źródła wzorcowego o stałej w całym przedziale widmowym wartości jego egzytancji.

Ponadto konstruując spektrometr, służący do badania różnych źródeł promieniowania, należy zadbać o to, by czułość widmowa jego toru elektro-optycznego miała możliwie stałą, dużą wartość w całym przedziale widmowym pracy tego przyrządu. Jednakże wymaganie to, jest szczególnie trudne do zrealizowania, w przypadku spektrometrów, mających pracować w szerokim zakresie widmowym tj. spektrometrów kompaktowych, zwykle zbudowanych z użyciem jednego detektora CCD i jednej siatki dyfrakcyjnej.

### LITERATURA

- [1] na podstawie danych zawartych w katalogu Hamamatsu: <http://sales.hamamatsu.com/en/products/solid-state-division/image-sensors/>
- [2] Fryc I., „Istotne parametry spektrometru wielokanałowego”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 4a/2012
- [3] Fryc I., Czyżewski D., „Dokładność pomiarowa spektrometrów typu CCD”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11/2009
- [4] Damman H., „Blazed Synthetic Phase-Only Holograms”, *Optik* **31**, 95–104, (1970)
- [5] Ammer T., Rossi M., „Diffractive optical elements with modulated zone sizes”, *J. Mod. Opt.* **47**, 2281–2293, (2000)
- [6] Minguez-Vega G., Thaning A., Climent V., Friberg A., Jaroszewicz Z., „Diffraction efficiency achromatization by random change of the blaze angle”, *Proceedings of SPIE* **4829**, 1070–1072, (2003)
- [7] na podstawie danych zawartych w katalogu Edmund Optics <http://www.edmundoptics.com/optics/gratings/reflective-ruled-diffraction-gratings/1896>
- [8] Kostkowski H. J. „Reliable Spectroradiometry” Spectroradiometry Consulting, 1997
- [9] na podstawie danych zawartych w „Report of calibration of one standard of spectra irradiance OL 200M”, Optronic Laboratories, Inc.

### Autorzy:

dr inż. Eugeniusz Czech, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: [eczech@plusnet.pl](mailto:eczech@plusnet.pl);  
 prof. dr hab. Zbigniew Jaroszewicz, Instytut Optyki Stosowanej, ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, Instytut Łączności, ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa, e-mail: [mmtzjaroszewicz@post.home.pl](mailto:mmtzjaroszewicz@post.home.pl);  
 dr inż. Przemysław Tabaka, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, 90-924 Łódź, ul. Bohdana Stefanowskiego 18/22, e-mail: [przemyslaw.tabaka@wp.pl](mailto:przemyslaw.tabaka@wp.pl);  
 dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: [i.fryc@pb.edu.pl](mailto:i.fryc@pb.edu.pl)