

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**INSTYTUTU  
ŁĄCZNOŚCI**



**1992**  

---

**10**



**BIULETYN  
INFORMACYJNY  
INSTYTUTU  
ŁĄCZNOŚCI**

ROK 32

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

NR 10(303)

---

WARSZAWA 1992

Komitet Redakcyjny  
Redaktor Naczelny: inż. Krystyn Pławko  
Z-ca Redaktora Naczelnego: dr inż. Stanisław Sołta  
Redaktorzy Działowi:  
doc. dr inż. Włodzimierz Barjasz  
doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska  
inż. Maria Łopuszniak

© Copyright by Instytut Łączności, Warszawa 1992

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juszklewicz

Montaż tekstu: techn. Grażyna Woźnica

---

Instytut Łączności, Dział Ogólnotechniczny  
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa

# SPIS TREŚCI

## PRAKTYCZNA METODA OCENY NIEPEWNOŚCI POMIARU

(Przekład z języka niemieckiego  
dokonany przez prof. dr Jerzego Dudziewicza z Instytutu Łączności)

	Str.
I. Słowo wstępne	1
II. Dokument PTB pt. "Wyznaczanie niepewności pomiaru"	3
Informacje wstępne	3
Przedmowa	4
1. Wstęp	4
2. Koncepcja i pojęcia	5
3. Założenia dotyczące wielkości wejściowych	6
3.1. Wielkości mierzone wielokrotnie	6
3.2. Wartości pojedyncze i wielkości wpływające	7
4. Obliczanie wyników	8
4.1. Wynik pomiaru	8
4.2. Wariancja	8
5. Niepewność pomiaru całkowita	9
6. Prezentacja niepewności pomiaru	9
6.1. Zestawienie niepewności	9
6.2. Zapis w certyfikatach kalibracyjnych	10
7. Schemat procedury	10
Załącznik A - Skorelowane wielkości wejściowe	12
Załącznik B - Postępowanie przy liczbie pojedynczych pomiarów mniejszej niż 10	13
Załącznik C - Przykłady	14
C.1. Przykład 1	14
C.1.1. Zadanie pomiarowe i model matematyczny	14
C.1.2. Założenia dla danych wejściowych	14

	Str.
C.1.3. Wynik pomiaru i niepewność całkowita	17
C.1.4. Rachunki wykonywane na wartościach względnych	18
C.2. Przykład 2	19
C.2.1. Zadanie pomiarowe i model matematyczny	19
C.2.2. Założenia dotyczące danych wejściowych	20
C.2.3. Całkowita niepewność pomiaru	22

Zdzisław Kuśmirek

## PRECYZYJNE POMIARY MOCY PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO W TELEKOMUNIKACJI ŚWIATŁOWODOWEJ

	Str.
1. Wstęp	25
2. Ograniczenia dokładności pomiarów mocy optycznej powodowane przez detektor i wzmacniacz	27
3. Wpływ sprzężenia światłowodu z detektorem na dokładność pomiarów mocy optycznej	32
4. Niepowtarzalność pomiarów mocy optycznej powodowana przez światłowód i źródło	38
5. Wzorce i kalibracja mierników mocy optycznej	42
Wykaz literatury	47

# PRAKTYCZNA METODA OCENY NIEPEWNOŚCI POMIARU<sup>1)</sup>

## I. SŁOWO WSTĘPNE

Niniejszy artykuł stanowi wolny przekład dokumentu Fizyczno-Technicznego Urzędu Federalnego w Brunświku w RFN (Physikalisch Technische Bundesanstalt - PTB - Braunschweig), który jest jednym z największych instytutów metrologicznych w Europie. Dokument ten zatytułowany: "Ermittlung von Messunsicherheiten" ("Wyznaczanie niepewności pomiaru") został wydany pod symbolem DKD-3 (Ausgabe 1990). Należy zaznaczyć, że akronim DKD stanowi skrót nazwy "Deutscher Kalibrierdienst", oznaczający "Niemiecką Służbę Kalibracyjną". Warto poza tym wspomnieć, że wyżej wymieniony dokument jest niemiecką wersją dokumentu 19-1990 WECC<sup>2)</sup> pt. "Guidelines for Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations" ("Wytyczne dla wyrażania niepewności pomiaru w kalibracjach").

Tłumacz odsyła czytelników do dwóch poprzednich artykułów wydanych w Biuletynie Informacyjnym IL w latach 1984 i 1990<sup>3)</sup>. O ile jednak tamte teksty dotyczyły ideologii i teorii nowego podejścia do spraw wyznaczania niepewności pomiaru, a w szczególności sposobu podejścia do tzw. błędów systematycznych i przypadkowych, to niniejszy artykuł dotyczy praktycznego stosowania poprzednio omawianych zaleceń i wytycznych. Jeżeli czytelnik dokładnie zapozna się z niniejszym materiałem, a w szczególności z przyto-

---

<sup>1)</sup> Przekład z języka niemieckiego dokonany przez prof. dr Jerzego Dudziewicza z Instytutu Łączności.

<sup>2)</sup> WECC - Western European Calibration Cooperation (Zachodnio-Europejska Współpraca w Dziedzinie Kalibracji).

<sup>3)</sup> "Określenia i oceny niepewności pomiaru w świetle praktyki wielkich ośrodków metrologicznych", Biuletyn Informacyjny IL nr 1-2(223-224), 1984 oraz "Niepewności wyników pomiaru", Biuletyn Informacyjny IL nr 11-12(285-286), 1990.

czonymi w nim przykładami zastosowań tej metody do konkretnych przypadków dotyczących pomiaru prądu elektrycznego i długości, to można mieć nadzieję, że sprawa dojrzała do praktycznego wdrożenia do codziennej działalności nie tylko "rasowego" metrologa, ale również każdego inżyniera i technika, przeprowadzającego rutynowe pomiary jakiegokolwiek wielkości fizycznej. Sprawa ta może mieć dalsze implikacje natury "software'owej", a mianowicie może spowodować ujednoczenie metrologicznych programów automatów pomiarowych. Najważniejszą wartością przyjęcia tego sposobu interpretacji i obróbki matematycznej wyników pomiaru jest ich jednolitość i jednoznaczność, co wreszcie po wielu latach można będzie osiągnąć w skali międzynarodowej. Wobec stałej tendencji integracyjnej w dziedzinie przemysłu i handlu ma to wielkie znaczenie. Oddając do rąk czytelników ten zeszyt Biuletynu Informacyjnego tłumacz ma nadzieję, że ułatwi tym samym przyswojenie nowej metody w codziennej praktyce pomiarowej.

W zakończeniu tłumacz wyraża gorące podziękowanie p. dr inż. Tadeuszowi Skubisowi z Instytutu Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej w Gliwicach za udostępnienie oryginalnego dokumentu niemieckiego z PTB, gdzie przechodził wielomiesięczny staż metrologiczny.

Jerzy Dudziewicz



## II. DOKUMENT PTB PT. "WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU"

### INFORMACJE WSTĘPNE O DKD, PTB I WECC

W DKD zgrupowano izby (laboratoria) kalibracyjne przedsiębiorstw przemysłowych, instytutów badawczych, urzędów o charakterze technicznym, instytucji nadzoru i badań. Są one akredytowane przez PTB i nadzorowane w sposób ciągły, wykonują na zlecenie kalibracje przyrządów pomiarowych oraz wzorców miar, podlegających uwierzytelnieniu dla wyspecyfikowanych przez PTB wielkości pomiarowych. Wydane przez nie certyfikaty kalibracyjne DKD są świadectwem powiązania kalibrowanych narzędzi pomiarowych ze wzorcami państwowymi za pomocą odpowiedniego systemu relacji miary.

Kalibracje dokonywane przez DKD dają użytkownikowi pewność dotyczącą wiarygodności wyników pomiarowych, zwiększają zaufanie klientów i zdolności konkurencyjne na rynku krajowym i międzynarodowym oraz stanowią podstawę techniczną nadzoru nad aparaturą pomiarowo-kontrolną stosowaną w systemach gwarancji jakości.

DKD oferuje możliwości kalibracyjne dla wielkości elektrycznych, począwszy od prądu stałego aż do największych częstotliwości, dla długości i innych wielkości geometrycznych, dla czasu i częstotliwości, dla siły, momentu obrotowego, przyspieszenia, ciśnienia, temperatury itd.

Celem stowarzyszenia "Western European Calibration Cooperation" (WECC) jest osiągnięcie równoważności w działalności krajowych służb kalibracyjnych i wzajemne uznawanie certyfikatów kalibracyjnych. Niniejsza broszura stanowi niemiecką wersję dokumentu WECC uzgodnionego w maju 1989 roku. Służy on do ujednoczonego wyznaczania niepewności pomiaru przy kalibracjach i przyczynia się w znacznym stopniu do umożliwienia porównań certyfikatów kalibracyjnych w różnych krajach Europy.

Niniejsza instrukcja obowiązuje dla wszystkich izb kalibracyjnych DKD i opiera się na zaleceniach Międzynarodowej Konwencji Metrycznej oraz odno-

śnych normach niemieckich. Ich zastosowanie poza DKD może wywołać tylko aplauz.

*Publikowane informacje PTB:* spis izb pomiarowych upoważnionych do kalibracji, instrukcje kalibracyjne, informatory, sprawozdania roczne.

*Adres PTB:* Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Referat 8.32 - Kalibrier- und Pruefdienste, Bundesallee 100, 3300 Braunschweig, Telefon: 0531/592-0 albo bezpośrednio 592-8320.

## PRZEDMOWA

1. Stowarzyszenie Western European Calibration Cooperation (WECC) stanowi forum współpracy między służbami kalibracyjnymi Zachodniej Europy. Uruchoimiło ono stale rozwijający się program technicznej współpracy, tak aby osiągnąć wzajemne zaufanie między służbami kalibracyjnymi i umożliwić zawieranie umów w sprawie wzajemnego uznawania technicznej równoważności między służbami kalibracyjnymi.
2. Niezbędnym założeniem dla technicznej równoważności certyfikatów kalibracyjnych jest to, aby niepewności pomiaru wyznaczano i podawano w certyfikatach w uzgodniony sposób.

## 1. WSTĘP

Niniejszy dokument ma stanowić instrukcję do wyznaczania niepewności pomiaru w laboratorium kalibracyjnym i podawania jej w certyfikatach kalibracyjnych. Sposób potraktowania jest tu bardzo ogólny, tak aby można było zastosować go do wszystkich dziedzin techniki pomiarowej. Te ogólne wytyczne można uzupełniać specjalnymi instrukcjami dla określonych dziedzin, aby ułatwić zastosowanie praktyczne. Przy opracowywaniu takich szczegóło-

wych wytycznych uzupełniających należy jednak przestrzegać ogólnych zasad podanych w tym dokumencie, aby zagwarantować zgodność między poszczególnymi dziedzinami.

Sposób postępowania w myśl tych wytycznych daje wyniki, które są zgodne z zasadami przyjętymi przez Międzynarodowy Komitet Miar na swoim 70 posiedzeniu (por. Zalecenie 1/CI-1981/, opublikowane w czasopiśmie *Metrologia* 18/1982/, str. 44<sup>1)</sup>).

## 2. KONCEPCJA I POJĘCIA

Niepewność pomiaru jest wartością oszacowania tej części wyniku pomiaru, która charakteryzuje zakres wartości, w obrębie którego znajduje się prawdziwa wartość pomiarowa. Zakłada się przy tym, że uwzględniono już uprzednio wszystkie systematyczne odchylenia (błędy) pomiaru stosując poprawki.

W tym dokumencie wszystkie wielkości fizyczne są traktowane jako zmienne losowe, również wielkości wpływające, które powodują odchylenia systematyczne. Wielkości wpływające różnią się przy tym od wielkości mierzonych tylko tym, że o nich na ogół mniej jest informacji.

Wielkość  $Y$ , którą należy wyznaczyć, jest nazywana wielkością wyjściową lub wynikową. Należy ją uważać jako zależną od pewnej liczby wielkości wejściowych  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, \nu$ ) poprzez pewną funkcję  $G$ :

$$Y = G(X_1, X_2, \dots, X_\nu, \dots, X_\nu) \quad (1)$$

Do wielkości wejściowych należą dane zaznaczone w certyfikatach kalibracyjnych i dotyczące zastosowanych etalonów, jak również dane pomiarowe i wielkości wpływające. Ponieważ wartości prawdziwe wielkości  $X_i$  są na ogół nieznane, wobec tego jako wielkości wejściowe do wyznaczenia całkowitej niepewności pomiaru należy stosować ich oszacowania  $x_i$ .

<sup>1)</sup> Por. także Biuletyn Informacyjny IL, nr 1-2(223-224), 1984.

Miarą niepewności tych oszacowań (estymatorów)  $x_i$  będą (empiryczne) wariancje  $s_{xi}^2$  lub ich dodatnie pierwiastki, zwane odchyleniami standardowymi  $s_{xi}$ . Można również posługiwać się względnymi wariancjami  $(s'_{xi})^2 = (s_{xi}/x_i)^2$  lub względnymi odchyleniami standardowymi  $s'_{xi} = s_{xi} / |x_i|$ .

Jeżeli znana jest pewna korelacja między dwiema wielkościami  $X_i$  i  $X_k$  - tzn. że są one w pewnej mierze zależne od siebie - to należy również szacowaną kowariancję uwzględniać jako składnik niepewności (por. Dodatek A). We wszystkich innych przypadkach należy wielkości wejściowe uważać jako nieskorelowane.

### 3. ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE WIELKOŚCI WEJŚCIOWYCH

#### 3.1. Wielkości mierzone wielokrotnie

Przy szeregu powtarzanych pomiarów może wystąpić rozrzut poszczególnych wartości pomiarowych, o ile tylko istnieje dostatecznie duża rozdzielczość urządzenia pomiarowego. Przy  $n$  niezależnych pojedynczych pomiarach ( $n > 1$ ) estymator  $x_i$  prawdziwej wartości wielkości  $X_i$  wyraża się przez wartość średnią arytmetyczną poszczególnych wartości pomiarowych  $v_{i,j}$  ( $j = 1, \dots, n$ ):

$$x_i = \bar{v}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{i,j} \quad (2)$$

Jako estymator empirycznej wariancji zmiennej losowej  $x_i$  należy przyjąć:

$$s_{xi}^2 = \frac{1}{n} s_{vi}^2 \quad (3)$$

Przy tym  $s_{vi}$  jest estymatorem odchylenia standardowego pojedynczego pomiaru zgodnie ze wzorem:

$$s_{vi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{j=1}^n (v_{i,j} - \bar{v}_i)^2 \right]} \quad (4)$$

Jeżeli liczba powtarzanych pomiarów jest mniejsza niż 10, to zastosowanie wzoru (4) może prowadzić do zaniżenia niepewności. W takim przypadku należy oszacować wartość  $s_{x_i}^2$  z doświadczenia (np. na podstawie wyników poprzednich serii pomiarów). Jeżeli to jest niemożliwe lub wydaje się nieodpowiednie, to należy zastosować metodę podaną w Załączniku B.

### 3.2. Wartości pojedyncze i wielkości wpływające

3.2.1. Jeżeli w odniesieniu do wielkości  $X$ , istnieje tylko jedna wartość, np. jedna wartość pomiarowa, wartość wyniku poprzedniego pomiaru, wartość wzięta z literatury lub wartość poprawki, to należy ją traktować jako estymator  $x_i$ . Należy wykorzystać również wartość wariancji  $s_{x_i}^2$ , o ile są one podane lub dają się wyliczyć z jednoznacznych danych dotyczących niepewności. Jeżeli takich danych nie ma, to należy wariancję oszacować na podstawie doświadczenia.

3.2.2. Jeżeli jakiejś wielkości wpływowej można przyporządkować - na podstawie teorii lub doświadczenia - pewien określony rozkład, to należy podstawić na  $(s_{x_i}')^2$  odpowiadającą jemu wariancję.

3.2.3. Jeżeli dla wartości wielkości wpływającej można oszacować tylko dolną i górną granicę, odpowiednio  $a_{d,i}$  i  $a_{g,i}$  (np. graniczne wartości błędu przyrządu pomiarowego, regulowany zakres temperatury), to na szacowaną wartość oczekiwaną należy podstawić wartość średnią:

$$x_i = \frac{1}{2} (a_{d,i} + a_{g,i}), \quad (5)$$

a na szacowaną wariancję

$$s_{xi}^2 = \frac{1}{12} (a_{g,i} - a_{d,i})^2 \quad (6)$$

Jeżeli oznaczyć różnicę między dwiema wartościami granicznymi przez  $2a_i$ , to uzyskamy z równania (6):

$$s_{xi}^2 = \frac{1}{3} a_i^2 \quad (7)$$

Te założenia odpowiadają rozkładowi prostokątnemu wielkości wpływających między ich granicami.

#### 4. OBLICZANIE WYNIKÓW

##### 4.1. Wynik pomiaru

Wynik pomiaru  $y$  (jako oszacowanie prawdziwej wartości wielkości wyjściowej  $Y$ ) oblicza się z danych wejściowych  $x_i$  wprowadzonych do równania (1) na miejsce wielkości wejściowych  $X_i$ :

$$y = G(x_1, x_2, \dots, x_v) \quad (8)$$

##### 4.2. Wariancja

Wariancja wielkości wynikowej - dla nieskorelowanych wielkości wejściowych - wyraża się wzorem:

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^v \left( \frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2 s_{xi}^2 \quad (9)$$

Przy tym  $(\partial G / \partial X_i)$  jest pochodną cząstkową funkcji  $G$  względem poszczególnej wielkości  $X_i$  przy podstawieniu danych wejściowych  $x_i$ ; wzór ten opisuje zależność wielkości wynikowej od każdej z wielkości wejściowych. Wariancja

wyniku pomiaru równa jest więc sumie wariancji różnych składowych niepewności, z których każdą należy wymnożyć przez kwadrat odpowiedniej pochodnej cząstkowej.

Jeżeli można prowadzić obliczenia za pomocą wariancji względnych, a funkcja  $G$  zawiera tylko iloczyny lub ilorazy wielkości wejściowych, to wszystkie wyrazy  $(\partial G/\partial X_i)^2 = \left(\frac{Y}{X_i}\right)^2$  i równanie (9) upraszcza się następująco:

$$(s_y')^2 = \sum_{i=1}^v (s_{x_i}')^2 \quad (10)$$

Dla wielkości skorelowanych - por. Załącznik A.

## 5. NIEPEWNOŚĆ POMIARU CAŁKOWITA

Dodatni pierwiastek z wariancji  $s_y$ , tzn. odchylenie standardowe  $s_y$ , jest miarą niepewności dla (złożonej) wielkości wynikowej  $Y$ . Przy kalibracjach zaleca się w tej instrukcji podawać całkowitą niepewność  $\pm u$ , którą można uzyskać przez wymnożenie odchylenia standardowego  $s_y$  przez pewien czynnik  $k$ :

$$u = k \cdot s_y \quad (11)$$

Na terenie WECC postanowiono stosować wartość współczynnika  $k = 2$ . W przypadku rozkładu normalnego (rozkładu Gaussa) oznacza to ( $k = 2$ ), że te granice niepewności odpowiadają poziomowi ufności 95%.

## 6. PREZENTACJA NIEPEWNOŚCI POMIARU

### 6.1. Zestawienie niepewności

Zestawienie niepewności dla przebiegu pomiarowego powinno obejmować wszystkie przyczyny niepewności, przynależne im wariancje (lub odchylenia standardowe) i metody obliczania lub oszacowania. W przypadku szeregu

powtarzanych pomiarów należy podawać również liczbę  $n$  pojedynczych pomiarów.

Wartość liczbowa niepewności przy ostatecznym jej wyrażeniu należy podawać co najwyżej za pomocą dwóch cyfr znaczących. Wartość liczbowa wielkości mierzonej przy ostatecznym jej wyrażeniu należy zaokrąglić odpowiednio do ostatniej cyfry znaczącej dotyczącej niepewności.

## 6.2. Zapis w certyfikatach kalibracyjnych

W certyfikatach kalibracyjnych należy podawać wynik pomiaru  $y$  oraz całkowitą niepewność pomiaru  $u$  w postaci  $(y \pm u)$ . Dodatkowa uwaga powinna mieć następującą treść:

Podana niepewność odpowiada dwukrotnej wartości odchylenia standardowego ( $k = 2$ ). Odchylenie standardowe obliczono zgodnie z WECC Doc. 19 przy uwzględnieniu składników niepewności wynikających z zastosowanego etalonu, metody kalibracji i warunków otoczenia, jak również krótkoczasowych efektów obiektu pomiarowego.

## 7. SCHEMAT PROCEDURY

Poniższy tekst stanowi wytyczną do praktycznego stosowania tej instrukcji (por. przykłady w Załączniku C).

- a) Zależność wielkości mierzonej (wielkości wyjściowej)  $Y$  od wielkości wejściowych  $X$ , należy wyrażać w postaci matematycznej odpowiednio do równania (1). Ta zależność, w przypadku porównania dwóch etalonów, może być bardzo prosta, np.  $Y = X + \Delta X$ .
- b) Należy wyznaczyć wszystkie niezbędne poprawki i wnieść te poprawki do wszystkich znanych systematycznych odchyłeń pomiarowych (błędów).



- c) W zestawieniu niepewności zgodnie z punktem 6.1 należy przytoczyć wszystkie niepewności, które pochodzą zarówno od pomiarów powtarzanych, jak i od wyników poprzednich pomiarów, od poprawek i wielkości wpływających.
- d) Dla wielkości mierzonych wielokrotnie należy obliczyć wariancję  $s_{rel}$  zgodnie z pkt. 3.1, o ile wykonano co najmniej dziesięć pomiarów pojedynczych. Przy mniejszej liczbie pojedynczych pomiarów należy sięgnąć do wyników poprzednich serii pomiarowych albo do innych doświadczeń; jeżeli jest to niemożliwe lub nieodpowiednie, to należy postępować zgodnie z metodą podaną w Załączniku B.
- e) Dla pojedynczych wartości, np. wartości wyników poprzednich pomiarów, wartości poprawek, wartości wziętych z literatury itp., należy wykorzystywać wartości wariancji, o ile są one podane lub dadzą się obliczyć. Jeżeli nie zachodzi ten przypadek, to należy te wariancje oszacowywać na podstawie doświadczenia.
- f) Dla wielkości wpływających, których funkcja rozkładu jest znana lub może być założona, należy wyznaczać wariancję odpowiadającą temu rozkładowi.  
Jeżeli można tylko podać dolną i górną granicę lub można je oszacować, to należy obliczać wariancję zgodnie z pkt. 3.2.3.
- g) Wariancje  $s_{rel}$  wszystkich wielkości wejściowych należy odnosić do wielkości wynikowej i sumować zgodnie z równaniem (9) lub (10), aby uzyskać wariancję  $s_y$ .
- h) Obliczenie całkowitej niepewności pomiaru następuje zgodnie z pkt. 5 przez mnożenie odchylenia standardowego  $s_y$  przez współczynnik  $k = 2$ .
- i) Wynik pomiaru i całkowitą niepewność należy podawać w certyfikacie kalibracji odpowiednio do pkt. 6.2.

## Załącznik A - Skorelowane wielkości wejściowe

Jeżeli znana jest korelacja między dwiema wielkościami wejściowymi  $X_i$  i  $X_k$ , tzn. że są one w pewien sposób zależne od siebie, to należy uwzględnić szacowaną kowariancję:

$$s_{x,ik} = s_{xi} \cdot s_{xk} \cdot r_{x,ik} \quad (i \neq k) \quad (12)$$

jako dodatkową składową niepewności. Stopień korelacji charakteryzuje się współczynnikiem korelacji  $r_{x,ik}$  (przy czym  $i \neq k$  oraz  $-1 \leq r \leq 1$ ).

W przypadku pomiarów powtarzanych kowariancja wyraża się wzorem:

$$s_{x,ik} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{v}_i)(v_{kj} - \bar{v}_k) \quad (13)$$

Współczynnik  $r$  można wyznaczyć przez podstawienie do wzoru (12).

Przy wielkościach wpływających trzeba oszacować współczynnik korelacji. Jeżeli korelacje istnieją, to równanie (9) należy zastąpić następującym równaniem:

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^v \left( \frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2 s_{xi}^2 + \sum_{i,k=1}^v \frac{\partial G}{\partial X_i} \frac{\partial G}{\partial X_k} s_{x,ik} \quad (14)$$

przy czym  $i \neq k$ .

Należy wspomnieć, że druga suma w równaniu (14) może być ujemna.

Jeżeli między dwiema (lub więcej) wielkościami występuje tylko dodatnia korelacja i można podstawić jako współczynnik korelacji wartość  $+1$ , to z równań (12) i (14) uzyska się dla złożonej wariancji lub odchylenia standardowego:

$$s_p^2 = \left( \sum_{i=1}^v \frac{\partial G}{\partial X_i} s_{xi} \right)^2 \quad \text{lub} \quad s_p = \sum_{i=1}^v \frac{\partial G}{\partial X_i} s_{xi} \quad (15)$$

W tym szczególnym przypadku odchylenie standardowe wyniku pomiaru równa się sumie odchyleń standardowych pomnożonych przez odpowiednie pochodne cząstkowe. Wartość +1 można na przykład podstawić, jeżeli podczas pomiaru jest wielokrotnie stosowany ten sam przyrząd (np. dzielnik 1:10 trzykrotnie dla stopniowego zmniejszenia do 1:1000).

W przypadku gdy wielkości  $X_i$  i  $X_j$  są skorelowane ujemnie ze współczynnikiem korelacji -1, to odpowiednie człony w równaniu (14) można złożyć w następujący sposób:

$$s_n^2 = \left( \frac{\partial G}{\partial X_i} s_{xi} - \frac{\partial G}{\partial X_j} s_{xj} \right)^2 \quad (16)$$

#### Załącznik B - Postępowanie przy liczbie pojedynczych pomiarów mniejszej niż 10

W przypadku gdy dla mniejszej liczby pojedynczych pomiarów niż 10 nie można oszacować wartości wariancji na podstawie doświadczenia, należy wartość liczbową  $s_p$  w równaniu (4) pomnożyć przez współczynnik podany w poniższej tabelcy.

Liczba pojedynczych wartości	Mnożnik
2	7,0
3	2,3
4	1,7
5	1,4
6	1,3
7	1,3
8	1,2
9	1,2

Mnożniki obowiązują dla  $k = 2$  i są oparte na rozkładach normalnym i t-Studenta.

## Załącznik C - Przykłady

Poniższe przykłady odpowiadają przypadkom praktycznym. Szczegóły i wartości liczbowe są jednak umyślnie tak dobrane, aby przy szacowaniu wielkości wejściowych można było rozważać możliwie najrozmaitsze przypadki. Poza tym tekst i tok obliczeń jest bardziej szczegółowy niż jest to potrzebne w zastosowaniach praktycznych.

### C.1. Przykład 1

#### C.1.1. Zadanie pomiarowe i model matematyczny

Pomiar prądu  $I$  jako spadek napięcia  $U$  na oporniku pomiarowym  $R$ . Prąd wynosi około 10 A, stosuje się pomiarowy opornik prądowy o wartości znamionowej  $R = 0,01 \Omega$ , a spadek napięcia będzie mierzony woltomierzem cyfrowym o impedancji wejściowej  $> 10^9 \Omega$ , tak że poprawka ze względu na prąd woltomierza jest pomijalnie mała. Temperatura otoczenia jest utrzymywana w granicach  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Wszystkie wielkości wejściowe są nieskorelowane.

Zależność wielkości wynikowej od wielkości wejściowych zgodnie z równaniem (1) jest następująca:

$$I = \frac{U}{R}$$

#### C.1.2. Założenia dla danych wejściowych

a) Zmierzono bezpośrednio w sposób wielokrotny (por. pkt. 3.1) następujące wartości dla spadku napięcia  $U$  (odczyty woltomierza cyfrowego):

Pomiar nr	$U_i$ w [mV]	$10^5(U_i - \bar{U})$ w [V]	$10^{10}(U_i - \bar{U})^2$ w [V <sup>2</sup> ]
1	100,13	+10	100
2	99,98	-5	25
3	99,94	-9	81
4	100,09	+6	36
5	100,20	+17	289
6	99,93	-10	100
7	99,98	-5	25
8	99,90	-13	169
9	100,06	+3	9
10	100,15	+12	144
11	100,06	+3	9
12	99,94	-9	81
$\Sigma$	1200,36	0	1068

Wartość średnia  $\bar{U}$  wg równania (2):

$$\bar{U} = \frac{1200,36}{12} \text{ mV} = 100,03 \text{ mV}$$

Empiryczne odchylenie standardowe wg równania (4):

$$s_v = \sqrt{\frac{1068}{11}} \cdot 10^{-5} \text{ V} = \sqrt{97} \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

Oszacowanie wariancji wg równania (3):

$$s_{xl}^2 = \frac{97}{12} \cdot 10^{-10} \text{ V}^2 = 8,1 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2$$

b) Producent podał dla woltomierza cyfrowego jako granice błędów dla zakresu 200 mV i dla zakresu temperatury od 10°C do 35°C:  $\pm(0,025\%$  wartości mierzonej  $+0,01\%$  zakresu). Te dane zostały potwierdzone przez kalibrację. Dla wartości pomiarowej 100 mV uzyskuje się więc granice błędów 0,045%, co odpowiada  $4,5 \cdot 10^{-5}$  V. Zakładając rozkład prostokątny uzyska się wg pkt. 3.2.3, równanie (7) jako oszacowanie wariancji:

$$s_{x2}^2 = \frac{1}{3} 4,5^2 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2 = 6,75 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2$$

c) Dla pomiarowego opornika prądowego istnieją następujące dane uzyskane z poprzedniej kalibracji:

- przy 10 A i 23°C zmierzona wartość rezystancji wynosi 0,010018  $\Omega$ ;
- względna niepewność pomiaru  $6 \cdot 10^{-4}$ ,  $k = 2$ ;
- względny współczynnik temperatury w zakresie od 15°C do 25°C:  $5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ .

Odpowiednio do pkt. 3.2.1 należy założyć jako oszacowanie dla  $R$  wartość pomiarową:

$$R = 0,0100180 \text{ } \Omega$$

Zakładając dane dotyczące niepewności i  $k = 2$  uzyska się wg równania (11) względne odchylenie standardowe:

$$\frac{6}{2} \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4},$$

a bezwzględne

$$3 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega,$$

a stąd wariancja:

$$s_{x3}^2 = 9 \cdot 10^{-12} \text{ } \Omega^2$$

d) W odniesieniu do wielkości wpływającej - temperatury otoczenia - zakłada się rozkład prostokątny w zakresie  $\pm 3$  K. Dla woltomierza cyfrowego uwzględniono już wpływ temperatury otoczenia przy błędach granicznych (por. b powyżej). Dla opornika o współczynniku temperaturowym ( $5 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1} \cdot 0,01 \Omega$ ) =  $5 \cdot 10^{-7} \Omega \text{K}^{-1}$  uzyska się wg równania (7) wariancję:

$$s_{x4}^2 = \frac{1}{3} (3 \cdot 5)^2 \cdot 10^{-14} \Omega^2 = 0,75 \cdot 10^{-12} \Omega^2$$

Ten składnik niepewności jest wobec innych tak mały, że praktycznie nie wpływa na niepewność całkowitą; dlatego też można go pominąć.

### C.1.3. Wynik pomiaru i niepewność całkowita

Z wartości na  $U$  i  $R$  można wyznaczyć wartość prądu  $I$ :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,10003 \text{ V}}{0,010018 \Omega} = 9,985 \text{ A}$$

Do przeliczenia wariancji  $s_y^2$  na wielkości wynikowe potrzebne są pochodne cząstkowe. Zgodnie z równaniem (9) uzyska się wariancję  $s_y^2$  w następujący sposób:

$$\begin{aligned} s_y^2 &= \left( \frac{\partial[U/R]}{\partial U} \right)^2 (s_{x1}^2 + s_{x2}^2) + \left( \frac{\partial[U/R]}{\partial R} \right)^2 (s_{x3}^2 + s_{x4}^2) = \\ &= \frac{1}{R^2} (s_{x1}^2 + s_{x2}^2) + \frac{U^2}{R^4} (s_{x3}^2 + s_{x4}^2) \\ s_y^2 &= \frac{10^4}{\Omega^2} (8,1 + 6,75) \cdot 10^{-10} \text{V}^2 + 10^6 \frac{\text{V}^2}{\Omega^4} (9 + 0,75) \cdot 10^{-12} \Omega^2 = \\ &= (8,1 + 6,75 + 9 + 0,75) \cdot 10^{-6} \text{A}^2 = 24,6 \cdot 10^{-6} \text{A}^2 \end{aligned}$$

Tak więc odchylenie standardowe

$$s_y = \sqrt{24,6 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

i niepewność całkowita wg równania (11) i dla  $k = 2$  wynosi

$$u = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ A}.$$

Całkowity wynik pomiaru wynosi więc:

$$I = (9,985 \pm 0,01) \text{ A}$$

lub w zapisie względnym

$$I = 9,985 (1 \pm 1 \cdot 10^{-3}) \text{ A}$$

#### C.1.4. Rachunki wykonywane na wartościach względnych

W pewnych dziedzinach jest przyjęte - a nawet okazuje się często łatwiejsze - odnosić odchylenia standardowe i wariancje od razu do danej wielkości, tzn. wykonywać rachunki za pomocą wartości bezwymiarowych względnych:

$$(s'_{x1})^2 = \left( \frac{s_{x1}}{x_1} \right)^2 \quad i \quad (s'_y)^2 = \left( \frac{s_y}{y} \right)^2.$$

W tym przykładzie uzyska się wtedy dla bezpośrednio mierzonych wartości:

$$(s'_{x1})^2 = \frac{8,1 \cdot 10^{-10}}{0,1^2} = 8,1 \cdot 10^{-8}$$

Ze względnych granic błędów woltomierza cyfrowego  $4,5 \cdot 10^{-4}$  wynika:

$$(s'_{x2})^2 = \frac{4,5^2}{3} \cdot 10^{-8} = 6,75 \cdot 10^{-8}$$



Względna niepewność kalibracji pomiarowego opornika prądowego  $6 \cdot 10^{-4}$  przy współczynniku  $k = 2$  oznacza względne odchylenie standardowe  $3 \cdot 10^{-4}$  i względną wariancję:

$$(s'_{x3})^2 = 9 \cdot 10^{-8} ,$$

a po uwzględnieniu zakresu temperatur 3 K oraz względnego współczynnika temperaturowego  $5 \cdot 10^{-6}/K$  uzyska się:

$$(s'_{x4})^2 = \frac{1}{3} (3 \cdot 5)^2 \cdot 10^{-10} = 0,75 \cdot 10^{-8} .$$

Ponieważ zachodzą tu tylko liniowe zależności, uzyska się jako sumę arytmetyczną:

$$(s'_y)^2 = (8,1 + 6,75 + 9 + 0,75) 10^{-8} = 24,6 \cdot 10^{-8}$$

Tak więc

$$s'_y = 5 \cdot 10^{-4} ,$$

a dla  $k = 2$  względna niepewność

$$u' = 1 \cdot 10^{-3}$$

## C.2. Przykład 2

### C.2.1. Zadanie pomiarowe i model matematyczny

Wyznaczenie niepewności kalibracji końcowych wzorców długości w zakresie 0,5 mm do 100 mm przeprowadzonej za pomocą mechanicznych pomiarów porównawczych ze wzorcami kalibrowanymi interferometrycznie o tej samej długości nominalnej jak i obiekty mierzone.

Długość  $l$  obiektu mierzonego równa się:

$$l = l_s + l_d + \sum \Delta l_j,$$

przy czym:

- $l_s$  - długość wzorca zgodnie z certyfikatem kalibracji,
- $l_d$  - zmierzona różnica długości między obiektem mierzonym a wzorcem,
- $\Delta l_j$  - addytywny wyraz j-tej poprawki o wartości oczekiwanej równej zero.

### C.2.2. Założenia dotyczące danych wejściowych

W tym uproszczonym przykładzie uwzględnione będą tylko najważniejsze składniki niepewności.

a) Niepewność wynikająca z rozrzutu wartości pomiarowych.

Podczas przebiegu pomiaru zmierzono różnice  $l_d$  tylko 5 razy. Przy poprzedniej serii pomiarowej o dużej liczbie powtarzanych pomiarów uzyskano (empirycznie) odchylenie standardowe zgodnie z równaniem (4) równe 13 nm.

Wobec tego oszacowano wariancję wg równania (3) jako:

$$s_{x1}^2 = \frac{1}{5} 13^2 \text{ nm}^2 = 34 \text{ nm}^2.$$

b) Składnik niepewności wynikający z kalibracji wzorca.

W certyfikacie kalibracji jest podana całkowita niepewność pomiaru dla całego kompletu wzorców:

$$u(l_s) = 0,05 \text{ } \mu\text{m} + 0,5 \cdot 10^{-6} l, \quad k = 3$$

Stąd uzyskuje się dla odchylenia standardowego  $u(l_s)/3$ :

$$s_{x2} = 16,7 \text{ nm} + 0,167 \cdot 10^{-6} l$$

a dla wariancji

$$s_{x2}^2 = 279 \text{ nm}^2 + 5,58 \cdot 10^{-6} l \cdot \text{nm} + 28 \cdot 10^{-16} l^2.$$

c) Składnik niepewności wynikający z kalibracji komparatora.

Zgodnie z certyfikatem kalibracji niepewność "statystyczna" równa jest  $\pm 0,008 \mu\text{m}$  przy poziomie ufności 95% ( $k=2$ ). Odpowiednie odchylenie standardowe wynosi więc  $8/2 \text{ nm} = 4,0 \text{ nm}$ . Podano, że "systematyczna" niepewność równa się  $\pm 0,02 \mu\text{m}$  przy trzysigmowym poziomie ufności. Odpowiednie odchylenie standardowe wynosi więc  $20/3 \text{ nm} = 6,7 \text{ nm}$ . Stąd wariancja:

$$s_{x3}^2 = (4,0^2 + 6,7^2) \text{ nm}^2 = 61 \text{ nm}^2.$$

d) Składnik niepewności wynikający z różnicy temperatury między obiektem mierzonym a wzorcem.

Z definicji współczynnika  $\alpha$ , tzn. współczynnika temperaturowego rozszerzalności liniowej ( $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), uzyska się:

$$\Delta l(\Delta \theta) = \alpha \cdot l \cdot \Delta \theta$$

Można założyć, że  $\Delta \theta$  zawarte jest w granicach  $\pm 0,05 \text{ K}$ , a więc zgodnie z równaniem (7) można wariancję oszacować jako (pod założeniem rozkładu prostokątnego):

$$s_{x4}^2 = \frac{1}{3} (11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 l)^2 = 110 \cdot 10^{-15} l^2.$$

e) Niepewność wynikająca z różnicy między temperaturą wzorca a temperaturą odniesienia ( $20^\circ\text{C}$ ), skąd wynika odchylenie:

$$\Delta l(\Delta \theta) = \Delta \alpha \cdot l \cdot \Delta \theta$$

Przy tym  $\Delta \alpha$  stanowi różnicę współczynników  $\alpha$  między wzorcem a obiektem mierzonym, co do której zakłada się, że  $|\Delta \alpha| \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Podano, że temperatura otoczenia równa jest  $(20 \pm 0,6)^\circ\text{C}$ . Zgodnie z równaniem (7) można oszacować cząstkowe wariancje jako:

$$s_x^2(\Delta\alpha) = \frac{1}{3} \cdot 10^{-12} \text{K}^2 \quad i \quad s_x^2(\Delta\Theta) = \frac{1}{3} \cdot 0,36 \text{K}^2.$$

Te wariancje dotyczące temperatury muszą być przetransformowane na wariancje dotyczące długości. Zgodnie z równaniem (9) złożona wariancja może być oszacowana przez:

$$s_{x\lambda}^2 = [(\Delta\Theta)^2 s_x^2(\Delta\alpha) + (\Delta\alpha)^2 s_x^2(\Delta\Theta)] l^2.$$

Jeżeli założyć arbitralnie  $s_x(\Delta\Theta)$  zamiast  $\Delta\Theta$  oraz  $s_x(\Delta\alpha)$  zamiast  $\Delta\alpha$ , to uzyska się:

$$s_{x\lambda}^2 = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,36 \cdot 10^{-12} l^2 = 80 \cdot 10^{-16} l^2.$$

### C.2.3. Całkowita niepewność pomiaru

Zgodnie z równaniem (9) wariancja  $s_y^2$  równa się sumie wariancji cząstkowych:

Składnik	Wariancja
1	34 nm <sup>2</sup>
2	279 nm <sup>2</sup> + 5,58 · 10 <sup>-6</sup> l nm + 28 · 10 <sup>-16</sup> l <sup>2</sup>
3	61 nm <sup>2</sup>
4	110 · 10 <sup>-16</sup> l <sup>2</sup>
5	80 · 10 <sup>-16</sup> l <sup>2</sup>
Suma	374 nm <sup>2</sup> + 5,58 · 10 <sup>-6</sup> l nm + 218 · 10 <sup>-16</sup> l <sup>2</sup>

Odchylenie standardowe wynosi więc:

$$s_y = (374 \text{ nm}^2 + 5,58 \cdot 10^{-6} l \text{ nm} + 218 \cdot 10^{-16} l^2)^{\frac{1}{2}}$$

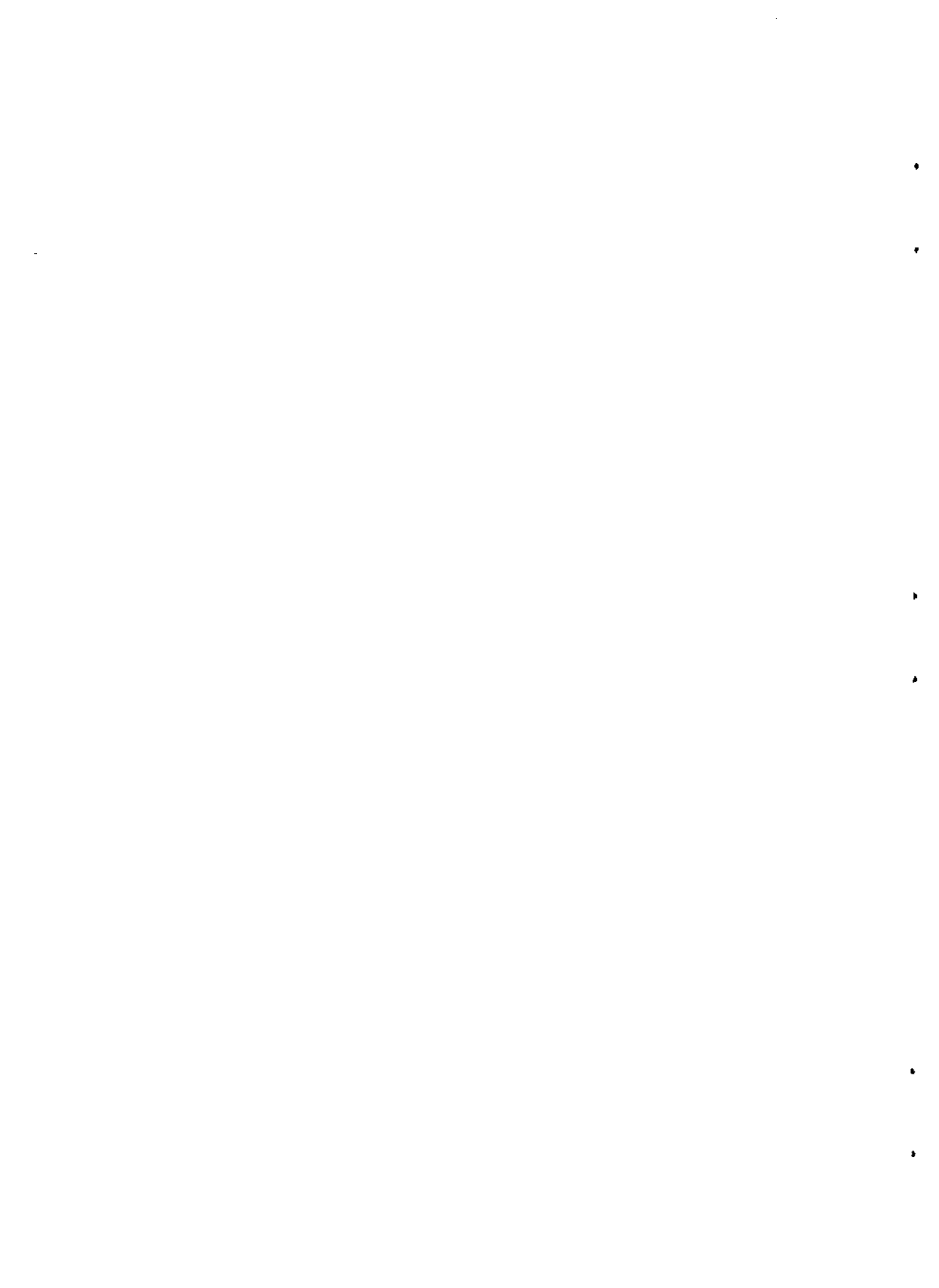
To równanie można wyrazić w przybliżeniu następująco:

$$s_y \approx 19 \text{ nm} + 0,37 \cdot 10^{-6} l.$$

Przybliżenie obowiązuje dokładnie dla wartości granicznych i zawyża niepewność dla wartości pośrednich (maksymalnie o 10% przy  $l \approx 40 \text{ mm}$ ).

Tak więc całkowita niepewność pomiaru wynosi zgodnie z równaniem (11) dla  $k = 2$ :

$$u = 38 \text{ nm} + 0,74 \cdot 10^{-6} l.$$



## PRECYZYJNE POMIARY MOCY PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO W TELEKOMUNIKACJI ŚWIATŁOWODOWEJ

### 1. WSTĘP

Pomiary mocy promieniowania optycznego są podstawowymi pomiarami w telekomunikacji światłowodowej. Moc promieniowania optycznego (w skrócie moc optyczna) jest najbardziej istotną wielkością mierzoną przy sprawdzaniu źródeł (nadajników) i detektorów (odbiorników) oraz innych elementów układów optycznych stosowanych w telekomunikacji, jak np. włókien światłowodowych, wtyków, sprzęgaczy i tłumików. W codziennej praktyce pomiarowej spotykamy się z niezwykle dużymi błędami i niepewnościami pomiarów mocy optycznej [13, 14, 19]. Zjawisko to zostało potwierdzone przez tzw. "test okrężny" [3], przeprowadzony przez amerykański Instytut metrologiczny NBS<sup>1)</sup>. Polegał on na porównaniu wskazań różnych typów mierników mocy, będących w posiadaniu innych narodowych laboratoriów metrologicznych, takich jak np. ETL<sup>2)</sup> (Japonia), PTB<sup>3)</sup> (RFN) itp., z "przenośnym" miernikiem mocy dostarczonym przez NBS. W wyniku tych pomiarów dokonywanych z największą możliwą precyzją otrzymano różnice wskazań rzędu  $\pm 0,8$  dB ( $\pm 20\%$ ), co przy obecnym stanie techniki kalibracji samych detektorów, gdy osiągnana jest dokładność rzędu  $\pm 0,05$  dB ( $\pm 1\%$ ), jest nie do przyjęcia. Źródłem tych błędów są prawdopodobnie nie tylko same przyrządy, lecz także

---

<sup>1)</sup> NBS - National Bureau of Standards (Narodowe Biuro Wzorców) od 1983 r.

NIST - National Institut of Standards and Technology (Narodowy Instytut Wzorców i Technologii).

<sup>2)</sup> ETL - Elektrotechnical Laboratory (Laboratorium Elektrotechniczne).

<sup>3)</sup> PTB - Physikalisch - Technische Bundesanstalt (Fizyczno-Techniczny Urząd Federalny).

inne, pozainstrumentalne przyczyny, bowiem NBS nie precyzował warunków pomiarów, np. nie było wiadome, czy mierzono promieniowanie lasera, czy diody elektroluminescencyjne, nieznanym był również rodzaj sprzężenia źródła z miernikiem mocy oraz typ światłowodu.

Uruchomienie międzynarodowej centrali telefonicznej w Warszawie, połączonej z Danią linią światłowodową 140 Mbit/s, i rozpoczęcie budowy 12 węzłowych central cyfrowych spowodowało, że sprawa wdrażania techniki światłowodowej zaczęła nabierać znacznego przyspieszenia. Szybko wzrasta liczba zakupowanej aparatury pomiarowej laboratoryjnej i polowej. Są to przede wszystkim mierniki tłumienności linii światłowodowych: impulsowe (tzw. reflektometry) i analogowe, składające się z wymiennych modułów - źródeł i mierników mocy optycznej, dla trzech typowych długości fal 0,85; 1,3 i 1,55  $\mu\text{m}$ . Szacuje się, że na koniec bieżącego roku liczba tych optycznych narzędzi pomiarowych wykorzystywanych w telekomunikacji światłowodowej przekroczy kilkadziesiąt sztuk, za kwotę rzędu 1 mln dolarów.

Wiarygodność wskazań tych narzędzi warunkuje poprawną pracę światłowodowych systemów telekomunikacyjnych. W związku z tym jest celowe, szczegółowe zapoznanie użytkowników tego rodzaju narzędzi pomiarowych z przyczynami błędów i niepewności pomiarów oraz sposobami ich redukcji. Będzie to pomocne w polowych, laboratoryjnych oraz kalibracyjnych pomiarach mocy optycznej.

Podany dalej opis oparto na publikacjach firm [1, 5, 6, 9, 10, 12+16, 19, 20] produkujących optyczne narzędzia pomiarowe oraz instytucji prowadzących laboratoria metrologiczne [2, 3, 8, 11, 18] dla potrzeb techniki światłowodowej. Na koniec w skrócie zaanonsowano problem kalibracji mierników mocy optycznej stosowanych w technice światłowodowej, który obecnie jest przedmiotem prac [7] Komitetu Technicznego TC'86 Międzynarodowej Komisji Elektrycznej (IEC)<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> IEC - International Electrotechnical Commission.



## 2. OGRANICZENIA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW MOCY OPTYCZNEJ POWODOWANE PRZEZ DETEKTOR I WZMACNIACZ

Zestawienie czynników, oddziałujących na sondę (fotodetektor - fotodiode i wzmacniacz) miernika mocy optycznej, mających istotny wpływ na dokładność pomiarów mocy tym miernikiem podano w tablicy 1.

Tablica 1

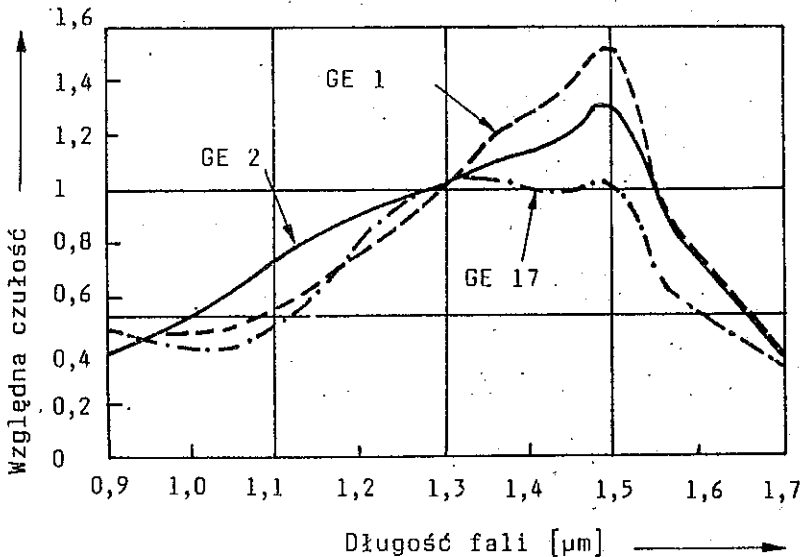
Wpływ parametrów sondy pomiarowej (fotodiody i wzmacniacza)  
na dokładność pomiarów mocy optycznej

Przyczyna	Skutek	Przeciwdziałanie
Wariancja czułości widmowej	Niezgodność wyników pomiarów z różnymi egzemplarzami fotodiod	Indywidualna kalibracja w funkcji długości fali
Zależność czułości widmowej od temperatury	Wyniki pomiarów zależne od temperatury	Stabilizacja temperatury fotodiody
Nieliniowość przetwarzania mocy optycznej na prąd elektryczny	Niedokładność pomiarów dużych poziomów mocy	Unikanie ogniskowania promieniowania, weryfikacja liniowości przy dużych poziomach mocy
Szumy - moc równoważna szumów (NEP <sup>1)</sup> )	Niedokładność pomiarów małych poziomów mocy	Chłodzenie fotodiody
Dryfty wzmacniacza	Niedokładność pomiarów małych poziomów mocy	Zastosowanie wzmacniaczy z małym dryftem
Starzenie	Powolne zmniejszanie dokładności pomiarów	Dokonywanie okresowych kalibracji
<sup>1)</sup> NEP - Noise Equivalent Power (równoważna moc szumów)		

Poniżej szczegółowo omówiono wpływ poszczególnych czynników na dokładność pomiarów mocy optycznej.

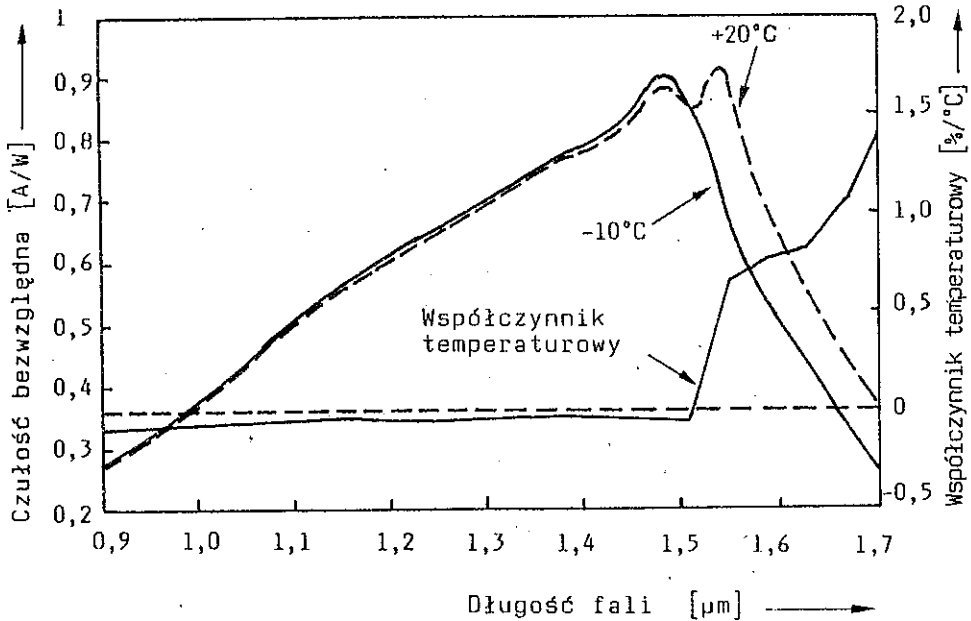
### Czułość widmowa

Charakterystykę czułości widmowej idealnej fotodiody typu p-i-n cechuje wolny, dość długi, liniowy wzrost aż do osiągnięcia maksimum dla długości fali odcięcia oraz szybki (krótki) liniowy spadek. Kształt ten wynika z mechanizmu przekształcania fotonów na elektrony, który dopóty trwa, dopóki energia fotonów jest większa od energii pasma zaporowego fotodiody. Przy tym energia fotonów jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali. Dla diody rzeczywistej krzywe czułości widmowej są zależne także od absorpcji i rekombinacji nośników energii (fotonów i elektronów) w materiale fotodiody. Krzywe czułości widmowej fotodiody germanowej przedstawione na rys. 1 i 2 potwier-



Rys. 1. Charakterystyki czułości widmowej różnych egzemplarzy tego samego typu fotodiody germanowych

dzają podany wyżej model działania. Maksimum czułości, około 0,9 A/W, występuje dla długości fali około 1500 nm. Porównując charakterystyki czułości różnych egzemplarzy tego samego typu diod germanowych (por. rys. 1)



Rys. 2. Przebieg współczynnika temperaturowego czułości widmowej fotodiody germanowej

zauważamy ich duży rozrzut. Osiągnięcie powtarzalnej charakterystyki czułości widmowej fotodiod jest więc niemożliwe. Na rys. 1 pokazano względne czułości trzech fotodiod, zredukowane do 1 względem czułości dla długości fali  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ . Maksymalny rozrzut czułości rzędu +30% występuje dla długości fali odcięcia około 1500 nm. Przedstawiony tu przykład bardzo dobrze uzasadnia konieczność dokonywania kalibracji. Istotnie każda fotodioda wchodząca w skład sondy pomiarowej miernika mocy optycznej jest indywidualnie kalibrowana w funkcji długości fali, nawet co 10 nm. Wyniki kalibracji są zapisywane w pamięci stałej, znajdującej się w module sondy, i służą do automatycznej korekcji wyników pomiarów mocy optycznej po wprowadzeniu do miernika mocy wartości mierzonej długości fali.

### Stabilność temperaturowa

Z przebiegu współczynnika temperaturowego czułości widmowej fotodiody germanowej w funkcji długości fali, przedstawionego na rys. 2, wynika konieczność stabilizacji temperaturowej detektora tego typu. W zakresie liniowego wzrostu czułości widmowej (do 1500 nm) współczynnik temperaturowy jest stały i wynosi około  $-0,1\%/^{\circ}\text{C}$ . Natomiast dla części opadającej czułości widmowej (dla 1550 nm) współczynnik temperaturowy szybko rośnie i wynosi  $+0,5\%/^{\circ}\text{C}$ . Jest to spowodowane przesunięciem tego odcinka charakterystyki czułości o 50 nm przy wzroście temperatury od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+20^{\circ}\text{C}$ . Z tego powodu detektory germanowe precyzyjnych mierników mocy optycznej są ochładzane do temperatury  $-10^{\circ}\text{C}$ , która jest stabilizowana elektronicznie z tolerancją rzędu  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  w zakresie roboczym temperatur otoczenia od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ . Dzięki ochłodzeniu fotodiody poprawia się rozdzielczość wskazań miernika mocy dla najczulszego zakresu pomiarowego miernika mocy. Wskazanie miernika, zwykle cyfrowe, nie zmienia się (nawet ostatnia cyfra), co łatwo można sprawdzić po zaciemnieniu wejścia optycznego detektora.

Stosowanie fotodiód germanowych bez stabilizacji temperatury jako detektorów przenośnych mierników mocy optycznej, używanych w warunkach polowych, jest przyczyną dużych błędów pomiarów mocy ( $\geq 20\%$ ).

### Nieliniowość

Detektor miernika mocy optycznej jest przetwornikiem sygnału optycznego na prąd elektryczny. Pracuje, po stronie elektrycznej, jako liniowe źródło prądu. Charakteryzuje się on bardzo dobrą liniowością w zakresie co najmniej sześciu dekad wartości mierzonej mocy, od pikowatów do mikrowatów. Współczynnik liniowości w tym zakresie jest mniejszy od  $0,1\%$ . Charakterystykę przetwarzania fotodiody ograniczają od dołu, dla bardzo małych mocy, szумы powodując niemierzalność nieliniowości. Szумы te oddziałują także na przedpięcie

wzmacniacza prądu fotodiody. Od góry, dla dużych mocy, charakterystyka przetwarzania zagina się z powodu wzrostu spadku napięcia wewnątrz diody. Dla fotodiod o średnicy 5 mm, typowej dla mierników mocy stosowanych w technice światłowodowej, zjawisko to pojawia się dla mocy powyżej 1 mW. Zagięcie to, będące skutkiem nasycenia, może pojawiać się również w przypadku wystąpienia dużej gęstości mocy na części czynnej powierzchni fotodiody, nawet jeśli padająca całkowita moc promieniowania optycznego jest wielokrotnie mniejsza od 1 mW. Dla fotodiod germanowych dopuszczalna gęstość mocy wynosi 10 mW/mm<sup>2</sup>.

### Szumy i dryfty

Szumy, jak już wyżej wspomniano, określają najmniejszą wartość mierzonej mocy optycznej. W celu usunięcia problemów związanych z przesunięciem punktu pracy, fotodioda pracuje jako źródło prądu. W tym przypadku prąd wyjściowy zaciemnionej fotodiody, gdy na nią nie pada promieniowanie, tzw. prąd ciemny, powinien być równy zeru. W układzie rzeczywistym detektora miernika mocy optycznej przypadek ten nie występuje. Do szumów wprowadzanych przez fotodiode dodają się szumy układu wzmacniającego prąd. Całkowitą wielkość szumów detektora opisuje parametr zwany mocą równoważną szumom (NEP). Reprezentuje on taką fikcyjną wartość skuteczną mocy padającej na fotodiode, która może być przez nią odebrana i przetworzona. Dla detektorów germanowych o dużej powierzchni istotny wpływ na ten parametr mają dwa czynniki silnie zależne od temperatury: prąd szumów fotodiody i wejściowe napięcie szumów wzmacniacza operacyjnego. Całkowita moc równoważna szumom detektora zależy również od temperatury. Zmiana temperatury od +25°C do -10°C wywołuje dziesięciokrotne zmniejszenie NEP. Takie zachowanie się detektora jest skutkiem wykładniczego spadku wartości prądu ciemnego fotodiody. Po zaciemnieniu wejścia optycznego sondy wskazanie miernika mocy optycznej powinno być równe 0 pW. Jeśli tak nie jest, to

przyczyną tego stanu jest wejściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza prądu. W wielu typach mierników mocy eliminuje się to napięcie przez kompensację, prowadzoną obecnie w sposób programowy w czasie tzw. "zerowania" wskazań miernika mocy. Dryft napięcia niezrównoważenia wzmacniacza związany z zastępczą rezystancją diody także zależy od temperatury, dlatego oziębienie fotodiody wpływa korzystnie na redukcję dryftu wskazań miernika mocy optycznej.

### Starzenia

Wpływ czasu na czułość widmową fotodiod germanowych, w przeciwieństwie do krzemowych jest jeszcze mało znany i rzadko podawany. Na podstawie badań stabilności czasowej czułości widmowej fotodiod germanowych, przeprowadzonych w latach osiemdziesiątych przez producentów fotodiod, stwierdzono zmiany charakterystyki czułości mniejsze od  $\pm 1\%$  na rok dla zakresu długości fali od 1200 nm do 1700 nm. W zakresie krótkofalowym ( $< 1200$  nm) np. dla 850 nm zmiany czułości są większe i wynoszą  $-(1..2)\%$  na rok. Dla każdego egzemplarza fotodiody przebieg starzenia jest inny. W związku z tym częsta kalibracja fotodiod jest jedynym remedium na efekty starzenia. Zależnie od miejsca i warunków eksploatacji, znaczenia i wymaganych dokładności pomiarów, sondy pomiarowe (detektory) mierników mocy optycznej są kalibrowane raz, dwa lub cztery razy w ciągu roku.

### 3. WPŁYW SPRĘŻENIA ŚWIATŁOWODU Z DETEKTOREM NA DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW MOCY OPTYCZNEJ

Oprócz wyżej podanych czynników na dokładność pomiaru mocy optycznej mają wpływ zjawiska związane ze sprzężeniem optycznym strumienia światła wychodzącego ze światłowodu z przetwornikiem - fotodiadą. Problemy z tym związane przedstawiono w tabelicy 2, a ich szersze omówienie poniżej.

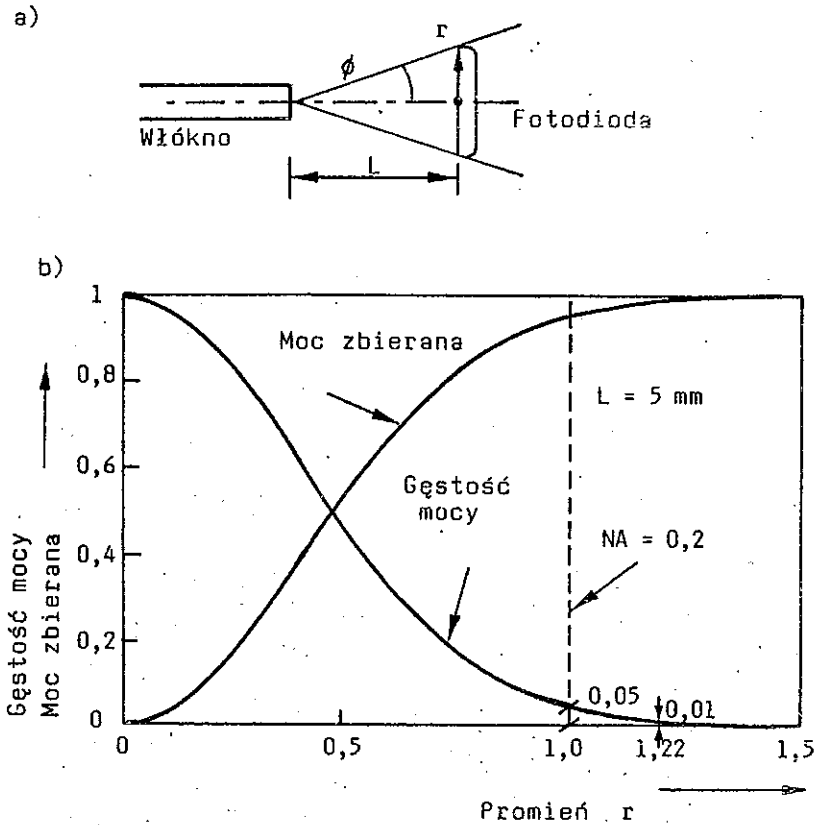
Zjawiska występujące przy sprzężeniu optycznym światłowodu  
z fotodiodą przy pomiarach mocy optycznej

Przyczyna	Skutek	Przeciwdziałanie
Niedopasowanie wielkości powierzchni fotodiody do mierzonego strumienia optycznego	Straty mocy optycznej	Detektory o dużej powierzchni czynnej
Zależność kątowa czułości widmowej	Wynik pomiaru zależny od apertury numerycznej źródła	Sprzężenie za pomocą strumienia równoległego
Niejednorodność czułości powierzchni czynnej fotodiody	Niedokładność wyników pomiaru w przypadku występowania plamek	Weryfikacja niejednorodności
Odbicia i interferencje wewnętrzne sondy miernika mocy optycznej	Niepowtarzalność wyników pomiaru	Powlekanie, pochylenie powierzchni czynnych, płytki samocentryżujące

Niedopasowanie powierzchni

Wypromieniowany z końca światłowodu (tak wielo- jak i jednomodowego) stożek światła jest charakteryzowany przez jego aperturę numeryczną (NA)<sup>1)</sup>. NA jest definiowana przez sinus kąta  $\Phi$  (por. rys. 3), dla którego gęstość mocy na powierzchni fotodiody spada do wartości równej 5% wartości maksymalnej. Przy pomiarze NA zapewnia się pobudzenie wszystkich modów płaszczowych. Rozkład gęstości mocy (natężenia napromieniowania) w płaszczyźnie prostopadłej do osi stożka może być aproksymowany funkcją rozkładu normalnego błędów (por. rys. 3). Przy sprzęganiu stożka światła z fotodiodą, jej czynna powierzchnia powinna być wystarczająco duża, aby można było uniknąć obcięcia rozkładu mocy w części dolnej tego stożka. Na rys. 3 przedstawiono zależność gęstości mocy promieniowanej przez włókno i odbieranej przez fotodiodę w funkcji promienia  $r$ .

<sup>1)</sup> NA - Numerical Aperture (apertura numeryczna).



Rys. 3. Rozkład gęstości mocy promieniowanej przez światłowód i odbieranej przez fotodiody, dla określonej apertury numerycznej i odległości światłowodu od fotodiody ( $L$ ), w funkcji zmiennej - minimalnej wartości średnicy ( $r$ ) powierzchni czynnej fotodiody niezbędnej do wykonania dokładnych pomiarów mocy optycznej

a) sprzężenie; b) wykres

Rozpatrując światłowód wielomodowy z gradientowym współczynnikiem załamania (o aperturze numerycznej  $NA = 0,2$  i średnicy rdzenia  $50 \mu\text{m}$ , z usuniętymi modami płaszczowymi) umieszczony w odległości  $L = 5 \text{ mm}$  od powierzchni czynnej fotodiody obserwuje się (por. rys. 3) stratę mocy rzędu 1% dla średnicy 2,4 mm. W przypadku wprowadzenia modów płaszczowych bądź dla włókien o skokowym współczynnikiem załamania ( $NA = 0,3$ ) niezbędna



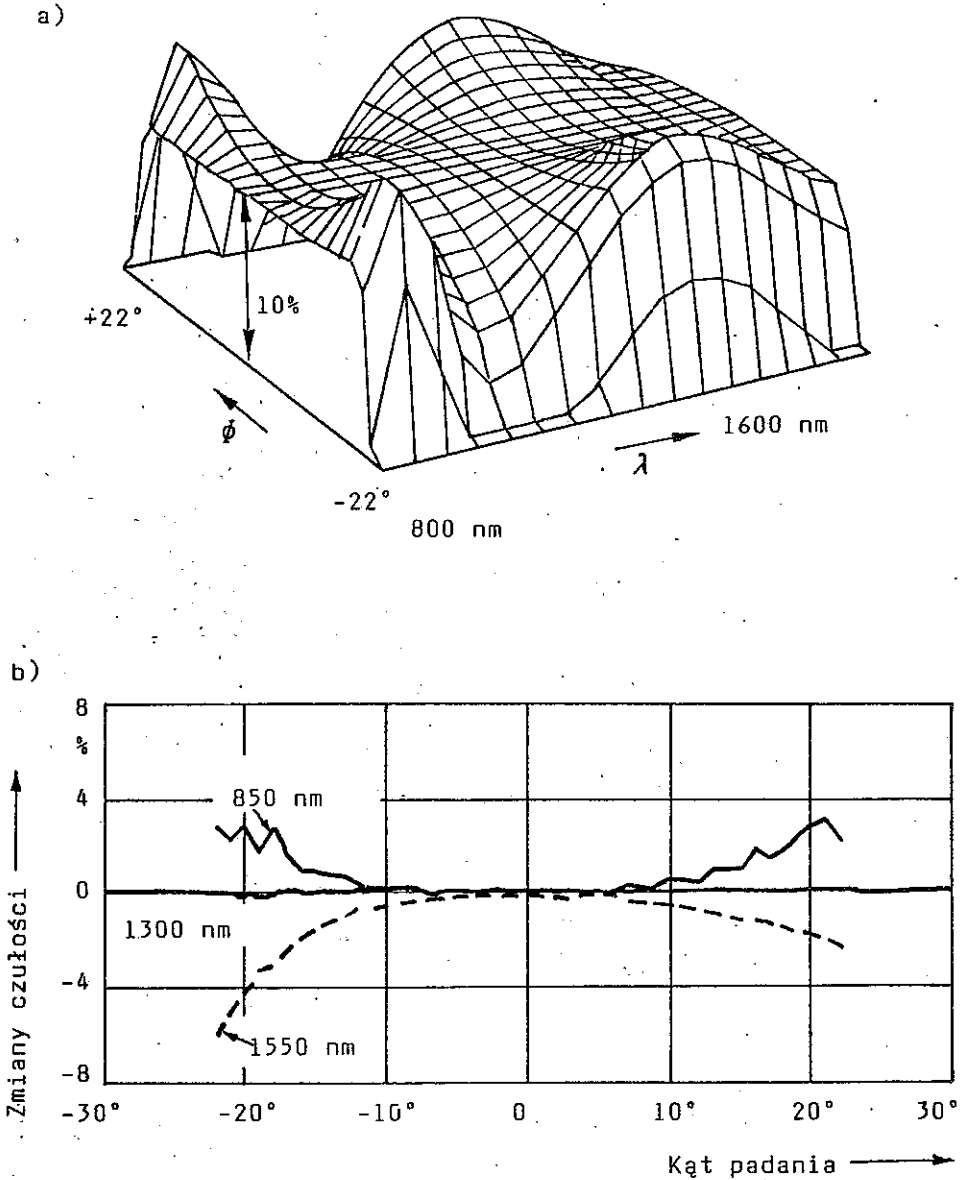
jest większa średnica rzędu 4 mm. W większości precyzyjnych mierników mocy stosowane są fotodiody o średnicy równej 5 mm. Jest to spowodowane również tym, że do kalibracji mierników mocy optycznej prowadzonej w narodowych laboratoriach metrologicznych (np. w PTB - RFN, NIST - USA) jest wykorzystywana równoległa wiązka światła o średnicy około 3 mm.

### Kąt padania

Zależność czułości widmowej od kąta padania wiązki światła na powierzchnię czynną powszechnie dostępnej diody germanowej pokazano na rys. 4. Zależność widmowa dla kąta  $0^\circ$  jest eliminowana, a charakterystyka czułości została odcięta płaszczyzną na poziomie 10% poniżej jej części płaskiej. Zależność kątowa jest powodowana przez interferencję światła w warstwie pasywacyjnej fotodiody. Zastosowanie soczewek kolimacyjnych przekształcających wiązkę stożkową w równoległą eliminuje błędy pomiaru mocy powodowane przez kątową zależność czułości widmowej.

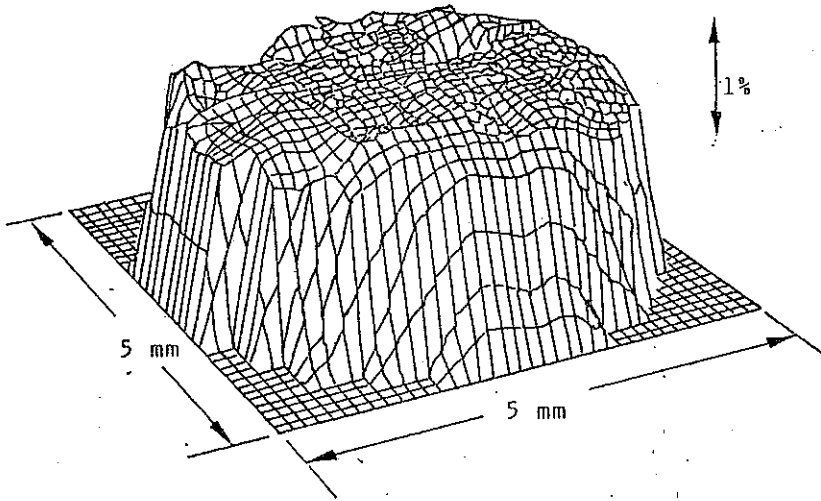
### Niejednorodność powierzchni czynnej

Na rys. 5 pokazano rozkład czułości fotodiody germanowej o średnicy 5 mm. W celu dokładnego zobrazowania niejednorodności czułości (badanej wiązką światła o średnicy 0,5 mm) pokazany przebieg odcięto na poziomie  $-2,5\%$ . Maksymalne odchylenie czułości widmowej, dla dobrych fotodiod nie powinno przekraczać 1%. W przypadku stałego rozkładu natężenia promieniowania na całej powierzchni czynnej, jej niejednorodność nie powoduje dodatkowych błędów pomiaru mocy optycznej. Natomiast nie do uniknięcia są błędy powodowane przez plamkowy rozkład mocy (w dalekim polu) w światłowodzie wielomodowym gradientowym przy pobudzeniu ze źródła światła spójnego, np. diody laserowej. W takim przypadku wynik pomiaru zależy od dopasowania rozkładu czułości fotodiody do rozkładu mocy wypromieniowanej ze światłowodu.



Rys. 4. Zależność czułości widmowej od kąta padania wiązki światła na fotodiode germanową

a) wykres przestrzenny; b) wycinek wykresu dla trzech długości fali

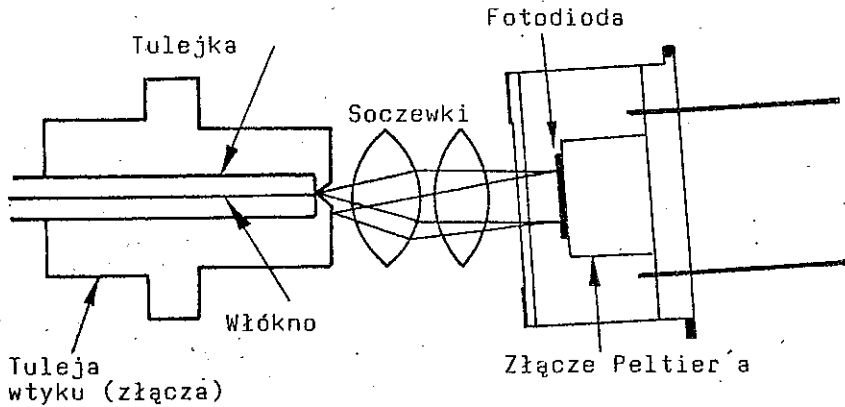


Rys. 5. Niejednorodność czułości widmowej fotodiody germanowej

### Odbicia

Odbić wewnątrz sondy miernika poziomu mocy optycznej nie można uniknąć. Około 20% mocy promieniowania wpadającego do sondy odbija się od powierzchni fotodiody. Jeśli fotodioda jest umieszczona prostopadle do kierunku wchodzącego strumienia, to jego wsteczne odbicie trafia ponownie do światłowodu i może powodować zakłócenie pracy źródła. Dlatego celowe jest odchylenie (por. rys. 6) wszystkich odbijających płaszczyzn. Mimo tych zabiegów na powierzchni czynnej fotodiody pojawia się moc, będąca skutkiem odbić wtórnych od metalowych części wewnątrz sondy. Moc tę po przetworzeniu dodaje się do wskazań miernika. Zjawiska tego nie można wyeliminować za pomocą kalibracji, bowiem każdy światłowód ma inne właściwości odbiciowe. Należy więc dążyć do minimalizacji tych odbić, np. przez pokrycie wszystkich krytycznych powierzchni sondy materiałami nie dającymi odbić. Można również stosować inną technikę eliminowania odbić wtórnych, np. przez modyfikację adaptera wejściowego, wyposażając go w płytkę szklaną stykają-

czą się fizycznie z czołem światłowodu. Płytką tą ma przeciwoodbiciowe pokrycie od strony przyległej do powierzchni czynnej fotodiody. W ten sposób eliminowane jest 4% odbicia mocy od końca światłowodu.



Rys. 6. Sprzężenie światłowodu z fotodiodą za pomocą soczewek (strumień równoległy)

#### 4. NIEPOWTARZALNOŚĆ POMIARÓW MOCY OPTYCZNEJ POWODOWANA PRZEZ ŚWIATŁOWÓD I ŹRÓDŁO

Czynniki mające wpływ na optyczne sprzężenie źródła i światłowodu z sondą miernika mocy optycznej zestawiono w tabelicy 3. Dokładny ich opis podano dalej.

##### Mody przesyłane światłowodem

W technice światłowodowej moc optyczna jest zazwyczaj mierzona na końcu włókna. Powtarzalność tych pomiarów zależy od stanu wzbudzenia modów w tym włóknie. Najpierw należy wyeliminować mody płaszczowe. Dokonuje się tego przez zastosowanie odpowiednio długiego odcinka włókna bądź wybranie takiej jego konstrukcji, przy której współczynnik załamania

pokrycia jest większy od współczynnika załamania płaszcza. W tym drugim przypadku kilkumetrowy odcinek włókna wystarcza do absorpcji modów płaszczowych. Także odpowiednie wysterowanie modów w rdzeniu światłowodu poprawia powtarzalność wyników pomiarów mocy. W światłowodach wielomodowych (skokowych i gradientowych) wskazane jest równomierne rozłożenie modów. Natomiast w światłowodach jednomodowych należy wzbudzić tylko jeden podstawowy mod. Można tego dokonać przez odpowiednie ustalenie trzech wielkości - mierzonej długości fali, długości fali odcięcia i długości włókna. Np. pętla włókna o średnicy 3 cm skraca długość fali odcięcia o około 100 nm, przez co eliminuje mody wyższych rzędów.

Tablica 3

Wpływ sprzężenia optycznego - światłowód i źródło mocy -  
- na dokładność pomiarów mocy optycznej

Przyczyna	Skutek	Przeciwdziałanie
Nieznany rozkład modów	Wyniki pomiarów mocy zależne od długości i kształtu włókna	Filtr modów lub odpowiednio długie włókno
Odbicia i interferencje	Niestabilność całkowitej mocy sprzężenia	Sprzężenie bez odbić
Wrażliwość lasera na wsteczne odbicia	Niepowtarzalność wyników pomiarów mocy powodowana przez skoki modów lasera	Sprzężenie bez odbić, długie włókno przed badanym obiektem, izolator
Zmiana szerokości widma źródła (LED)	Niedokładność pomiaru powodowana przez "zniekształcenia"	Matematyczna korekcja wyniku pomiaru dla określonej szerokości widmowej

### Odbicia i interferencje

Odbicia występujące przy pomiarach mocy są powodowane przejściem światła z jednego ośrodka do drugiego. Typowe przejście szkło - powietrze występuje w sondzie pomiarowej (detektorze) miernika mocy kilkakrotnie. Najpierw włókno - powietrze, potem powietrze - okno szklane fotodiody (4%

mocy odbitej) oraz odbicie od powierzchni czynnej fotodiody (20% mocy odbitej). Odbicia zmniejszają liczbę fotonów przychodzących do detektora. Wpływ ten może być usunięty przez kalibrację sondy. Jeśli jednak więcej niż jedna odbita fala biegnie z powrotem, to może wystąpić interferencja (nakładanie fal) optyczna. Skutku tego nie można usunąć przez kalibrację, bowiem warunki interferencji, a zatem i współczynnik odbicia, zmieniają się nawet dla bardzo małych zmian długości fali. Interferencja optyczna ma miejsce zawsze tam, gdzie wystąpi nałożenie spójnych promieni świetlnych o tych samych kierunkach. Może być ona skutkiem odbić powstających w złączu optycznym, w którym nie wykorzystuje się fizycznego styku dwóch rdzeni włókien światłowodowych. Powstają wówczas dwie fale odbite zachodzące na siebie. Ich wzajemne oddziaływanie, podobne jak w przypadku wektorów pola elektrycznego, może być wzmacniane lub osłabiane zależnie od ich względnych faz. Taki rodzaj interferencji można analizować teoretycznie w funkcji odległości separującej te włókna. Dla odległości do  $22 \mu\text{m}$  strumień świetlny, o gausowskim rozkładzie mocy promieniowania, emitowany przez światłowód jednomodowy wykazuje wzrost średnicy mniejszy od 10% i może być przedstawiany jako strumień równoległy. Teoretycznie i praktycznie moc przesyłana przez takie złącze osiąga wartości maksymalne i minimalne jak przy rezonansie, bowiem złącze jednomodowe jest rezonatorem Fabry-Perota. Okres powtarzania tych pików, zależny od odległości separującej, jest mały i wynosi  $0,65 \mu\text{m}$  przy transmisji fali  $1,3 \mu\text{m}$ . Oznacza to, że warunki rezonansu są w praktyce nieodtwarzalne, a niepowtarzalność przesyłanej mocy może osiągać wartość 15%. Z tego powodu przy pomiarze mocy należy unikać złączy optycznych, zaś w przypadku ich wystąpienia należy zapewnić ich fizyczny styk.

Znacznie większe niepewności przesyłanej mocy wystąpią wskutek odbić wstecznych w kierunku źródła (lasera) powodujących niestabilność pracy we wnętrzu wnęki lasera (tzw. skoki modów). Obserwuje się także dodatkowe szумы, zmiany długości fali i szerokości widma.

W przypadku włókna wielomodowego niewielkie jego przemieszczenie może wywołać ruch odbitych plamek na powierzchni emitującej lasera. Aby tego

uniknąć, potrzebne jest długie włókno (np. 1 km), które likwiduje spójność modów, przez co wygładza plamki. Natomiast dla światłowodów jednomodowych ruch włókna powoduje zmianę fazy odbitej fali, przez co zmienia długość sprzężonego z nim rezonatora Fabry-Perota. W tym przypadku długie jednomodowe włókno eliminuje spójność, a tym samym wrażliwość na przemieszczenie tego włókna. Zmiany przesyłanej mocy były przedstawione wyżej dla przypadku zachodzenia interferencji optycznej w funkcji długości szczeliny powietrznej rozdzielającej dwa włókna jednomodowe. Zakładając brak tego oddziaływania można spodziewać się maksymalnej niepewności mocy rzędu 15%. W rzeczywistości, wskutek oddziaływania generowanej mocy z mocą odbitą, maksymalna niepewność pomiaru mocy może wzrosnąć do 37%. Jest to tzw. najgorszy przypadek w rzeczywistych warunkach bardzo rzadko występujący.

W celu uniknięcia odbić i interferencji należy stosować złącza wykorzystujące fizyczny styk światłowodów, pochylone powierzchnie czołowe na drodze strumienia, absorbujące pokrycia, tłumiki lub długie włókno włączane między źródło i badane urządzenie oraz izolatory optyczne.

#### Pomiar mocy diod elektroluminescencyjnych

W przypadku pomiaru mocy wyjściowej źródeł o skończonej szerokości widma, np. diod elektroluminescencyjnych (LED)<sup>11</sup>, może wystąpić dodatkowy błąd rzędu 5%, jeśli do pomiaru użyto fotodiody germanowej. Przyczyną tego jest tzw. "zniekształcenie" szerokiej krzywej widmowej emisji (rzędu kilkudziesięciu nm) przez krzywą widmową czułości zastosowanego detektora, znacznie odbiegającej od linii poziomej. Jeśli znane są obie krzywe, to można wyliczyć współczynnik korekcyjny. Mnożąc zmierzoną moc przez ten współczynnik otrzymamy poprawną wartość mocy badanego źródła LED. Współczynnik korekcyjny jest ilorazem dwu całek. Jedna reprezentuje pole powierzchni pod krzywą widmowej emisji LED, zaś druga - pole powierzchni pod krzywą powstałą z iloczynu krzywej czułości detektora przez krzywą widmowej emisji

---

<sup>11</sup> LED - Light Emitting Diode.

LED. Aby ułatwić obliczenie współczynnika korekcyjnego, krzywa czułości widmowej fotodiody danego miernika mocy może być wpisana do pamięci mikrokomputera sterującego pracą tego miernika. Wykorzystując środkową długość fali i widmowe pasmo emisyjne LED można zbudować prosty model matematyczny dla danej diody elektroluminescencyjnej. Następnie za pomocą odpowiedniego programu całkującego można wyliczyć poprawną wartość mocy promieniowania badanej diody LED.

## 5. WZORCE I KALIBRACJA MIERNIKÓW MOCY OPTYCZNEJ

### Radiometry absolutne

Kalibracja mierników mocy optycznej polega na porównaniu ich wskazań z wzorcowymi miernikami mocy tzw. radiometrami. Radiometry wykorzystują przetwarzanie mocy optycznej na ciepło powodujące przyrost temperatury, która jest następnie mierzona różnymi metodami. Zaletą tego rodzaju mierników w porównaniu z fotodetektorami jest ich nieczułość na zmianę długości fali. Natomiast wadą jest ich stosunkowo mała czułość, gdyż reagują one na moc rzędu mikrowatów. Najbardziej popularnymi radiometrami są radiometry pyroelektryczne i termoelektryczne. Po umieszczeniu w czujniku radiometra grzejnika elektrycznego można porównywać moc optyczną z mocą elektryczną przy zachowaniu stałości mierzonej temperatury. Jest to metoda substytucji powszechnie stosowana w metrologicznych laboratoriach do odtwarzania pierwotnych wzorców jednostki mocy optycznej. Radiometry tego typu zwane są też ESR<sup>1)</sup> (radiometr z substytucją /podstawianiem/ mocy elektrycznej).

Pyroelektryczne czujniki, popularne w USA, wykorzystują kondensatory, których pojemność zależy od temperatury. Radiometr tego typu, zwany w skrócie ECPR<sup>2)</sup> (elektrycznie kalibrowany pyroelektryczny radiometr), pracuje

---

<sup>1)</sup> ESR - Electrical Substitution Radiometry.

<sup>2)</sup> ECPR - Electrical Calibrated Pyrometry Radiometr.



z przerywaniem strumienia świetlnego, co powoduje, że prąd zmienny przepływający przez kryształ (dielektryk czujnika) jest automatycznie zerowany po zrównaniu mocy elektrycznej z optyczną, tzn. przy braku różnicy temperatury - skutku tych mocy. Realizowane w ten sposób radiometry pozwalają na uzyskanie dokładności pomiarów mocy rzędu 0,5% dla wartości  $10 \mu\text{W}$ . Konieczność zachowania synchronizacji okresów przerywania światła i grzania komplikuje konstrukcję tego typu radiometrów. Inną niedogodnością jest podatność kryształu czujnika pyroelektrycznego na drgania (mikrofonowanie).

Detektory termoelektryczne są stosowane w PTB (RFN). Mogą one pracować przy prądzie stałym, bowiem termostos (czujnik temperaturowy), który jest szeregowym połączeniem kilkunastu termoelementów, generuje napięcie stałe. W tym przypadku nie występuje zjawisko mikrofonowania. Czas pomiaru tego typu radiometrem jest dość długi; typowy okres podstawiania wynosi od kilkunastu sekund do kilku minut. Dokładność pomiaru mocy optycznej radiometrem z czujnikiem termoelektrycznym jest lepsza od 0,2%.

### Samokalibracja fotodiod

Wprawdzie metoda substytucji (ESR) jest ogólnie przyjęta, ale bardziej atrakcyjna jest metoda samokalibracji fotodiod [21], z uwagi na jej potencjalnie większą dokładność i czułość w porównaniu z ESR. Podstawą tej metody jest spełnienie założenia, że współczynnik sprawności kwantowej fotodiody jest równy 1, co oznacza, że każdy absorbowany foton wytwarza dokładnie jedną parę elektron-dziura. Aby to osiągnąć, należy tak skonstruować fotodiodę, aby zapobiec rekombinacji wytwarzanych nośników ładunków. Wówczas czułość widmowa jest funkcją liniową długości fali przy współczynniku proporcjonalności zależnym od stałych fizycznych ładunku elektronu, stałej Plancka i prędkości światła.

W procedurze samokalibracji wyznacza się moc odbitą przez powierzchnię fotodiody, którą odejmuje się od całkowitej mocy padającej na fotodiodę. Każde odstępstwa od przyjętego założenia 100% sprawności, powodowane

przez rekombinacje dziur generowanych blisko powierzchni i rekombinacje elektronów generowanych poza pasmem, są eliminowane przez przyłożenie odpowiedniego przedpięcia do fotodiody.

Samokalibracja fotodiod krzemowych pozwala na osiągnięcie dokładności pomiaru mocy optycznej lepszej od 0,1% w pasmie krótkofalowym, tj. od 500 do 900 nm. Obecnie trwają eksperymenty z diodami germanowymi, które pozwolą na samokalibrację w pasmie długofalowym  $> 1000$  nm.

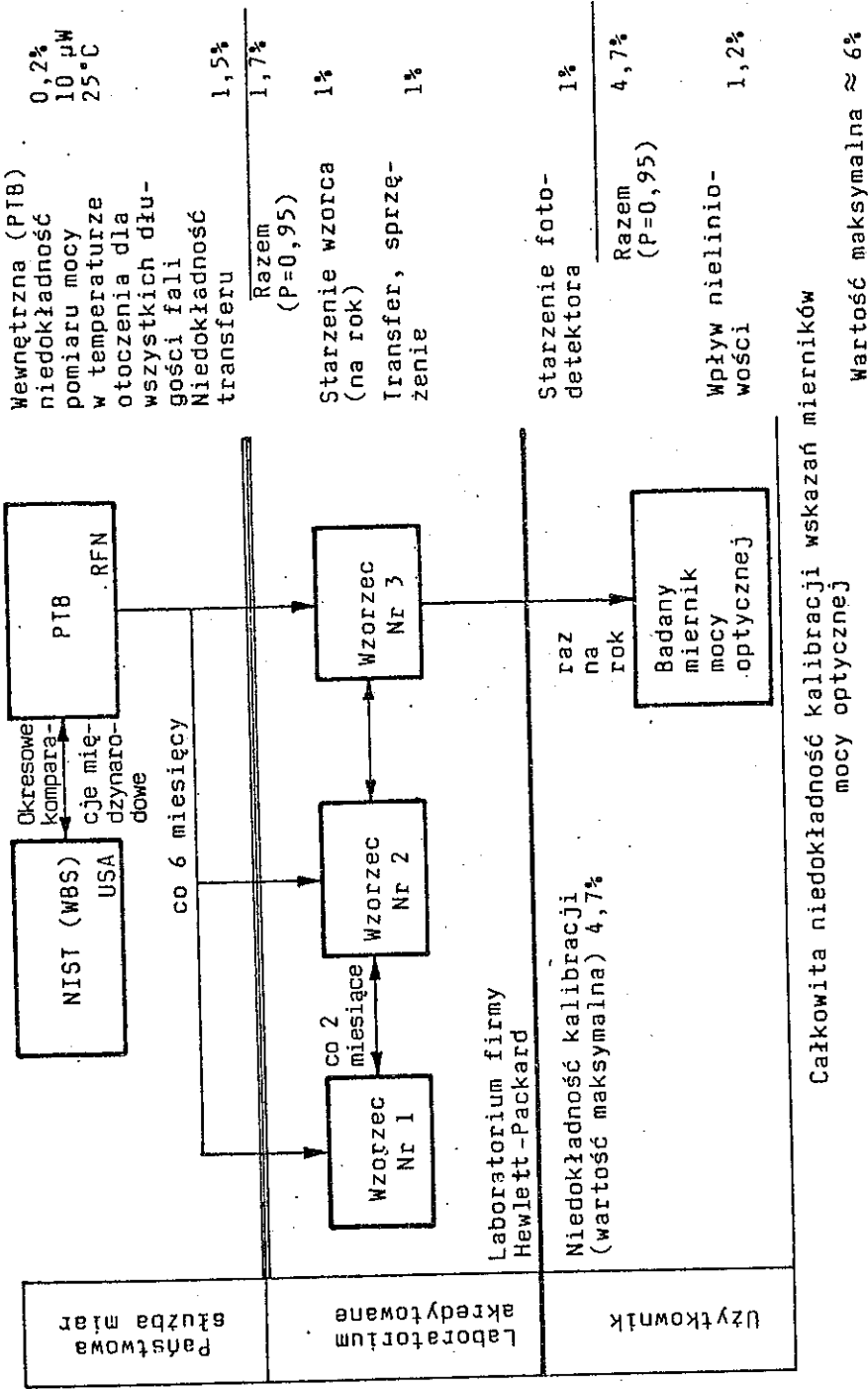
### Kalibracja mierników mocy optycznej

Dokładność pomiaru mocy optycznej za pomocą mierników mocy zależy przede wszystkim od przyjętej strategii i schematu ich kalibracji. Każdy miernik mocy optycznej powinien być kalibrowany w procesie wytwarzania względem tzw. wzorca roboczego. Wzorzec ten jest kalibrowany wzorcem wtórnym, którego dokładność jest określana bezpośrednio względem wzorca pierwotnego przechowywanego w narodowym laboratorium metrologicznym, np. PTB w RFN.

Przykładowy schemat przekazywania miary mocy optycznej w firmie Hewlett-Packard (Boeblingen RFN) przedstawiono na rys. 7. Każda kalibracja miernika poziomu mocy optycznej jest obciążona błędem transferu (przekazywania), dlatego tak ważna jest procedura i schemat kalibracji. Z uwagi na fakt, że wyniki pomiarów kalibracyjnych zależą od wielu parametrów, istotne jest jak najbliższe nawiązanie użytych wzorców do wzorców pierwotnych. Likwiduje się w ten sposób wiele pośrednich ogniów i związanych z tym niepewności pomiarów.

Obecnie trwają w IEC prace [7] dotyczące unormowania procesu kalibracji mierników mocy optycznej w zakresie schematów, sposobów oraz rachunku błędów i dokumentacji przebiegu kalibracji.

W firmie Hewlett-Packard do kalibracji wykorzystuje się tylko wtórne wzorce bezpośrednio kalibrowane w PTB. Stosowane są trzy wzorce wtórne porównywane między sobą w krótkich odstępach czasu, np. co dwa miesiące. Kalibrację przeprowadza się za pomocą równoległego strumienia światła



Rys. 7. Schemat kalibracji wskaźnika mierników mocy optycznej w firmie Hewlett-Packard

o średnicy 3 mm, dla poziomu mocy  $10 \mu\text{W}$  dla wszystkich wartości długości fali, skokowo co 20 nm w danym zakresie widma, w temperaturze odniesienia  $25^\circ\text{C}$ . Przeniesienie (transfer) wielkości mocy  $10 \mu\text{W}$  od wzorca pierwotnego jest obciążone błędem rzędu 1,5% dla poziomu ufności 95%. Natomiast na poziomie wtórnych wzorców dochodzą dodatkowe błędy od ich niestabilności. Następnie miara mocy  $10 \mu\text{W}$  jest przekazywana, z błędem równym 1%, do badanego detektora użytkowego miernika mocy optycznej. W skład wypadkowej niedokładności kalibracji użytkowego miernika mocy optycznej dla  $10 \mu\text{W}$  wchodzi niepewność powodowana starzeniem sondy oraz współczynnikiem temperaturowym jej charakterystyki widmowej. W rozpatrywanym tu przypadku zakładowego laboratorium firmy Hewlett-Packard błąd temperaturowy jest bliski 0%, w zakresie temperatur od 0 do  $40^\circ\text{C}$ , z uwagi na zastosowanie stabilizowanych temperaturowo detektorów jako wzorców wtórnych. Maksymalna niedokładność kalibracji mocy  $10 \mu\text{W}$  wyniesie 4,7%, w zaokrągleniu około 5% (0,2 dB). Natomiast całkowita niedokładność kalibracji wskaźnika miernika w pełnym zakresie mierzonych wartości mocy optycznej uwzględnia błąd od nieliniowości, około 1,2% (0,05 dB), i wynosi 6,2% (0,25 dB). Przedstawiony tu rachunek błędów dotyczy wartości maksymalnych otrzymanych poprzez proste sumowanie dla poziomu prawdopodobieństwa 0,95. Przy założeniu innego poziomu prawdopodobieństwa występowania błędów, np. 0,9973, wymienione wyżej niepewności wzrastają wg [15] 2,14 raza, względem błędów przy prawdopodobieństwie równym 0,95 oraz zmienia się sposób sumowania błędów z arytmetycznego na geometryczny [4]. W związku z tym niepewności kalibracji redukują się do wartości 2,5% (0,11 dB) dla warunków odniesienia.

Wydaje się celowe przyjęcie dla Polski schematu przekazywania miary mocy optycznej podobnego jak w firmie Hewlett-Packard (por. tablica 4). W tym przypadku Instytut Łączności pełniłby rolę laboratorium resortowego akredytowanego przez państwową służbę miar (Polski Komitet Normalizacji Miar i Jakości).

Droga przekazywania miary mocy optycznej

Wzorce	Przetwornik Sprzężenie	Moc optyczna Długość fali	Niepewność pomiaru <sup>2)</sup>
<u>Wzorce państwowe</u>  POLSKI KOMITET NORMALIZACJI MIAR I JAKOŚCI Laboratorium Promieniowania Optycznego	Pyroelektryczny Strumień otwarty	10 $\mu$ W - 10 mW 0,4 - 2 $\mu$ m	$\pm 1\%$
<u>Wzorce resortowe</u>  INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI Laboratorium Metrologiczne Telekomunikacji Światłowodowej	Fotodioda Si/Ge Strumień zamknięty <sup>1)</sup>	10 pW - 10 mW 0,4 - 1,8 $\mu$ m	$\pm 2,5\%$
<u>Narzędzia użytkowe</u>  Mierniki mocy	Fotodioda Si/Ge/InGa/As Strumień zamknięty <sup>1)</sup>	10 pW - 10 mW 0,4 - 1,8 $\mu$ m	> 5%
<sup>1)</sup> W światłowodzie wielo- lub jednomodowym. <sup>2)</sup> Dotyczy warunków odniesienia.			

## WYKAZ LITERATURY

1. Becker J.: Detectors for Optical Power Measurements. Hewlett-Packard Journal, February 1987.
2. Gallawa R.L., Li X.: Calibration of optical fiber power meters: the effect of connectors. Applied Optics, Vol. 26, No. 7, 1 April 1987.
3. Gallawa R.L., Yang S.: Optical fiber power meters: a round robin test of uncertainty. Applied Optics, Vol. 25, No. 7, 1 April 1986.

4. Hentschel Ch.: Calibration of Fiber Optic Power Meters. Hewlett-Packard Journal, February 1990.
5. Hentschel Ch.: Making accurate fiber optic power measurements. Laser Focus/Electro-optics, September 1986.
6. Hentschel Ch.: Wie genau sind faseroptische Leistungsmessungen? NTZ, Bd. 40, H. 7, 1987.
7. IEC/TC 86 Fibre optics: Draft-Calibration of fibre-optic power meters. 86 (Secretariat) 31, June 1990.
8. Instituto Superiori Poste et Telecommunicationi: Calibration System for Optical Communications. Konferencja - Malta 1989.
9. Ooka T.: Trends in Optical Communication Measuring Technology and Measuring Instruments. JEE, March 1989.
10. Reichert W.: A Lightwave Multimeter for Basic Fiber Optic Measurements. Hewlett-Packard Journal, February 1991.
11. Rybach J.: Optische Leistung und Lichtwellenleiter. Eine neue Herausforderung für das Kalibrierlabor. NTZ, Bd. 43, H. 1, 1990.
12. Sasaki K.: Measuring Instruments for Optical Standards to Improve Optical Traceability. Anritsu, Technical Review, Special Issue, Vol. 1, 1990.
13. Schmid W.: Just how accurate are the various techniques for measurement of optical fiber attenuation under operating conditions? Wandel & Goltermann, bits 58.
14. Schmid W., Weigle D.: Einflüsse auf die Genauigkeit Optischer Dämpfungsmessungen. Wandel & Goltermann, bits 46.
15. Schweikardt H.: Genauigkeitsnachweis bei optischen Leistungsmessungen. Rückführung auf nationale Standards. Elektronik, Nr. 24/25, 1988.
16. Shibata T.: Development Progresses for High Sensitivity Optical Power Meters and Stabilized Light Sources. JEE, March 1989.
17. Stock K.D., Heine R.: On the aging of photovoltaic cells. Optik, Vol. 71, No. 4, 1985.

18. Suzuki Y., Murata A., Araragi M., Inoue T.: Calorimeter with Compensative Absorber for Measuring Microwatt Level Optical Power. IEEE Trans. on Instrum. & Measurement, Vol. 40, No. 2, April 1991.
19. Weigle D.: Fehlerverhalten von Optischen Pegelmessern. Wandel & Goltermann, bits 40.
20. Weigle D.: Neuer optischer Leistungspegelmessers OLP-1 für den Wellenlängenbereich 800 bis 1600 nm. Wandel & Goltermann, bits 36.
21. Zalewski E.F., Geist J.: Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration. Applied Optics, Vol. 19, No. 8, 15 April 1980.

