

BIULETYN

INFORMACYJNY

INSTYTUTU

ŁĄCZNOŚCI

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
BIBLIOTEKA NAUKOWA

Nr _____



1996

6

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
BIBLIOTEKA NAUCZONA

Nr

**BIULETYN
INFORMACYJNY
INSTYTUTU
ŁĄCZNOŚCI**

ROK 36

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

NR 6(340)

WARSZAWA 1996

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny: dr inż. Krystyn Plewko

Z-ca Redaktora Naczelnego: doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska

Redaktorzy Działowi:

doc. dr inż. Włodzimierz Barjasz

dr inż. Stanisław Sońta

inż. Maria Łopuszniak

© Copyright by Instytut Łączności, Warszawa 1996

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juskiewicz

Skład komputerowy: techn. Grażyna Woźnica

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

Jerzy Dudziewicz

ZASTOSOWANIE NOWEJ METODY ISO
WYRAŻANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU
DO KALIBRACJI ELEKTRYCZNYCH NARZĘDZI
POMIAROWYCH

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	5
2. Metody analizy niepewności w procesach kalibracji	6
2.1. Struktura funkcjonalna 1	9
2.2. Struktura funkcjonalna 2	16
2.3. Struktura funkcjonalna 3	19
2.4. Struktura funkcjonalna 4	23
3. Przykłady obliczeniowe	27
3.1. Kalibracja multimetru (wg struktury 1)	27
3.2. Kalibracja generatora sygnałów (wg struktury 2)	31
3.3. Kalibracja miernika mocy promieniowania optycznego (wg struktury 3)	38
3.4. Kalibracja opornika wzorcowego (wg struktury 4)	42
4. Zakończenie	47
Wykaz literatury	48



ZASTOSOWANIE NOWEJ METODY ISO WYRAŻANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU DO KALIBRACJI ELEKTRYCZNYCH NARZĘDZI POMIAROWYCH

1. WSTĘP

Jak wiadomo [5], w 1992 roku został wydany przez ISO specjalny dokument pt.: *"Guide to Expression of Uncertainty in Measurement"* (przewodnik do wyrażania niepewności pomiaru), w którym znajdują się szczegółowe wytyczne dotyczące sposobów oceny i wyrażania niepewności pomiaru. W dokumencie tym wyłożono całą metodykę oraz podano sposoby analizy niepewności pomiaru, niezależnie od branży techniki i stopnia dokładności procesu pomiarowego.

Należy wyraźnie podkreślić, że użytkownicy tego nowego przewodnika, a takimi powinni być wszyscy pracownicy techniczni zajmujący się pomiarami, muszą zmienić stare przyzwyczajenia i praktyki dotyczące tego co dawniej nazywano "analizą błędów pomiaru". Odnosi się to w szczególności do pojęć określanych terminami "błąd systematyczny" i "błąd przypadkowy", które sugerowały niejasny podział logiczny [1]. Wprowadzono zamiast tego pojęcie "poprawki" (lub współczynnika poprawkowego) oraz pojęcie "niepewności pomiaru", wyrażane w kategoriach statystycznych. Dalsze szczegóły dotyczące nowej metody podejścia do zagadnienia oceny niepewności wyniku pomiaru można znaleźć w literaturze [1 ÷ 4].

Aby ta nowa metoda przyjęła się powszechnie, należy stosować ją na każdym etapie działalności technicznej. Ponieważ dotyczy to techniki pomiarów, wobec tego odnosi się to do takich etapów, jak: projektowanie aparatury pomiarowej, dokumentowanie jej właściwości metrologicznych (specyfikacje techniczne, protokoły kontroli

aparatury, dane katalogowe itp.), kalibrowanie aparatury (użytkowej i kontrolnej - etalonów) oraz stosowanie jej w typowych procesach pomiarowych jako narzędzi autonomicznych lub wchodzących w skład wielkich systemów pomiarowych, sterowanych i przetwarzających dane według odpowiednich programów komputerowych. We wszystkich tych etapach muszą być stosowane jednolite pojęcia, aby można było jednoznacznie oceniać jakość aparatury pomiarowej i prowadzonych z jej pomocą procesów pomiarowych.

Wśród wielu rodzajów działalności techniki pomiarowej można wyróżnić dość specyficzną gałąź, jaką stanowi kalibrowanie narzędzi pomiarowych. Działalność ta różni się tym od innych działań techniki pomiarowej, że obiektem pomiaru jest w tym przypadku samo narzędzie pomiarowe, a raczej jego właściwości metrologiczne. Niniejszy artykuł jest poświęcony właśnie zastosowaniu nowej metody oceny niepewności pomiaru w odniesieniu do procesów kalibracyjnych (uwierzytelniania, sprawdzania, wzorcowania, legalizacji itp.) elektrycznych narzędzi pomiarowych. Autor ma nadzieję, że prezentowany materiał, a zwłaszcza rozwiązania konkretnych zadań kalibracyjnych, może zainteresować szerokie rzesze pracowników służb miar i kontroli jakości, które zaczynają nabierać coraz większego znaczenia w naszym kraju.

2. METODY ANALIZY NIEPEWNOŚCI W PROCESACH KALIBRACJI

Zgodnie z *"Międzynarodowym słownikiem podstawowych i ogólnych terminów metrologii"* [6] przez kalibrację narzędzia pomiarowego rozumie się *"zbiór operacji tworzących, w określonych warunkach, relację między wartościami wskazanymi przez narzędzie pomiarowe a odpowiednimi wartościami wielkości realizowanymi przez etalony"*. Należy przy tym pamiętać, że wartość wskazana przez narzędzie pomiarowe to wartość odczytana na urządzeniu wskazują-

cym tego przyrządu lub wartość jemu przypisana w przypadku, gdy narzędzie pomiarowe stanowi miarę materialną, tzn. gdy to narzędzie jest przeznaczone do odtwarzania lub dostarczania w sposób ciągły podczas jego użycia jednej lub wielu znanych wartości danej wielkości. Metrolog dokonujący kalibracji danego narzędzia pomiarowego ma zatem za zadanie przypisanie wskazaniom tego narzędzia odpowiednich - poprawnych - wartości wielkości mierzonej lub odtwarzanej, czyli wyznaczenie odpowiednich poprawek (lub współczynników poprawkowych) oraz podanie odpowiednich miar niepewności tych poprawek (współczynników poprawkowych) [5].

Zwraca się uwagę, że w wyżej wymienionej definicji kalibracji użyto wyrażenia "w określonych warunkach". Należy przez to rozumieć pewne unormowane warunki zewnętrzne, tak zwane **warunki odniesienia**, które dotyczą konkretnych wartości lub ich dopuszczalnych przedziałów, w jakich mogą się znajdować wielkości wpływające, takie jak na przykład: temperatura, wilgotność, napięcie zasilające, wibracje, zakłócenia elektromagnetyczne itp. Tylko w takich ściśle określonych warunkach można przeprowadzać procesy kalibracji narzędzi pomiarowych i dokonywać porównań między danymi narzędziami pod względem jakości metrologicznej. Badania zależności podstawowych parametrów sprawdzanego narzędzia pomiarowego od wahań powyższych wielkości wpływających, wchodzi w grę przy **badaniach typu** danego narzędzia, lecz nie przy kalibracjach, które mają na celu okresowe uwierzytelnianie poprawności wskazań danego egzemplarza narzędzia pomiarowego i wydanie odpowiedniego zaświadczenia (certyfikatu) o aktualności jego podstawowych danych technicznych, a więc głównie o jego poprawkach i niepewnościach wyników pomiarów, przeprowadzonych za jego pomocą.

Gdyby w szczególnym przypadku, w danym laboratorium metrologicznym, nie można było zachować wymaganych warunków odniesienia, należy to wyraźnie zaznaczyć w certyfikacie i uwzględ-

nić w obróbce wyników pomiarów, korygując odpowiednie poprawki i niepewności wyników pomiaru. W takim przypadku muszą być jednak znane odpowiednie zależności określonych parametrów kalibrowanego narzędzia oraz etalonu od danej wielkości wpływającej; okoliczność taka znacznie komplikuje analizę metrologiczną. Może to być usprawiedliwione tylko przy kalibracji (uwierzytelnianiu) narzędzi kontrolnych - etalonów - najwyższej klasy, tzn. przynależnych do górnych węzłów łańcucha przekazywania poprawnej miary.

Jeżeli wyznaczy się dla badanego - kalibrowanego - narzędzia pomiarowego odpowiednią poprawkę (lub współczynnik poprawkowy), to tym samym każdemu wskazaniu tego narzędzia będzie można przyporządkować wartość poprawną. Tak więc, gdy wskazanie kalibrowanego narzędzia wynosi x (wartość pojedyncza lub uśredniona), to przynależna mu wartość poprawna X wynosi:

$$X = x + \Delta x = x \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) = x k_x, \quad (1)$$

gdzie Δx oznacza poprawkę, a

$$k_x = \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \quad (2)$$

współczynnik poprawkowy.

Wartość poprawną wskazania narzędzia pomiarowego można uzyskać tylko tworząc właściwą relację między tym narzędziem a odpowiednim etalonem. Biorąc pod uwagę, że każde narzędzie kalibrowane K oraz każdy etalon E może stanowić przyrząd mierzący lub miarę materialną, tzn. być narzędziem biernym B (tylko mierzącym) lub narzędziem czynnym C (tylko odtwarzającym), można uzyskać cztery podstawowe struktury funkcjonalne wzajemnych relacji, a mianowicie:

- 1) EC - KB,
- 2) KC - EB,

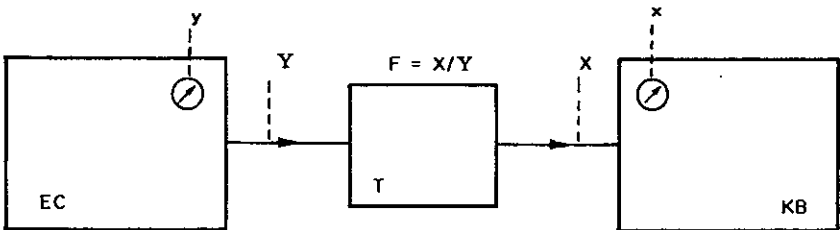
3) EB - KB,

4) KC - EC.

Oprócz tych dwóch podstawowych członów układu kalibracyjnego, tzn. K i E, musi się w nim znajdować jeszcze człon transferu T, a niekiedy także pomocniczy człon generacyjny G (pobudzający) i człon komparacyjny P.

2.1. Struktura funkcjonalna 1

Struktura ta została graficznie przedstawiona na rys. 1. Jak z niego widać, układ kalibracyjny składa się z etalonu czynnego EC (miary materialnej), transferu T oraz kalibrowanego narzędzia biernego KB (miernika). Typowym przykładem takiej struktury może być przypadek, gdy człon EC stanowi kalibrator napięcia lub prądu albo wzorcowy opornik, człon KB - multimetr, a człon T - parę przewodów pomiarowych.



Rys. 1. Pierwsza struktura funkcjonalna wzajemnej relacji między etalonem czynnym EC a kalibrowanym narzędziem pomiarowym biernym KB

Niech wskazanie etalonu EC wynosi y , a odpowiadająca mu wartość poprawna oznaczona będzie przez Y , a więc:

$$Y = y + \Delta y = y \left(1 + \frac{\Delta y}{y} \right) = y k_y, \quad (3)$$

gdzie Δy oznacza poprawkę, a

$$k_y = \left(1 + \frac{\Delta y}{y}\right) \quad (4)$$

współczynnik poprawkowy.

Z rys. 1 wynika, że stosunek wyjścia do wejścia transferu T, zwany jego **transmitancją**, jest równy:

$$F = \frac{X}{Y} = \frac{x + \Delta x}{y + \Delta y} = \frac{x k_x}{y k_y}, \quad (5)$$

skąd poszukiwana poprawka kalibrowanego narzędzia pomiarowego

$$\Delta x = F(y + \Delta y) - x = G(F, y, \Delta y, x) \quad (6)$$

lub odpowiedni współczynnik poprawkowy

$$k_x = \frac{F y k_y}{x} = H(F, y, k_y, x). \quad (7)$$

Tak więc, aby wyznaczyć poprawkę Δx (lub współczynnik poprawkowy k_x) kalibrowanego narzędzia KB, należy podstawić do wzoru (6) (lub wzoru 7) odpowiednie wartości: F , y , Δy (lub k_y) oraz x . Wartości x i y stanowią odpowiednie aktualne wskazania KB i EC, natomiast F i Δy (lub k_y) stanowią dane charakterystyczne transferu T oraz etalonu EC, które powinny być zawarte w ich certyfikatach kalibracyjnych.

Zgodnie z prawem propagacji błędów [5] niepewność wyznaczenia poprawki wg wzoru (6) można oszacować następującą wariancją:

$$\begin{aligned} s_{\Delta x}^2 &= \left(\frac{\partial G}{\partial F}\right)^2 s_F^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 s_y^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \Delta y}\right)^2 s_{\Delta y}^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 s_x^2 + 2 \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} s_{xy} = \\ &= (y + \Delta y)^2 s_F^2 + F^2 s_y^2 + F^2 s_{\Delta y}^2 + s_x^2 + 2 |F s_x s_y|, \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie poszczególne wariancje dotyczą niepewności:

$s_{\Delta x}^2$ - wyznaczenia poprawki Δx kalibrowanego narzędzia KB,

s_F^2 - wyznaczenia transmitancji F , wynikającej z dokumentacji transferu T,

s_y^2 - wskazania y etalonu EC, wynikającej z jego skończonej rozdzielczości i powtarzalności,

$s_{\Delta y}^2$ - poprawki Δy etalonu EC, podanej w jego certyfikacie kalibracyjnym,

s_x^2 - wskazania narzędzia kalibrowanego KB, wynikającej z jego skończonej rozdzielczości i powtarzalności,

a kowariancja

$s_{xy} = |s_x s_y|$ ujmuje składnik, wynikający ze wzajemnej korelacji między zmiennymi x i y (założono ostrożnie, że należy brać pod uwagę moduł maksymalnej wartości ostatniego składnika we wzorze 8).

Postępując analogicznie w przypadku niepewności wyznaczenia współczynnika poprawkowego wg wzoru (7) uzyska się następującą wartość względną (wariancje względne będą oznaczane poniżej symbolem z^2):

$$z_{kx}^2 = z_F^2 + z_y^2 + z_{ky}^2 + z_x^2 + |2z_x z_y|, \quad (9)$$

gdzie poszczególne wariancje względne¹⁾ dotyczą niepewności:

z_{kx}^2 - wyznaczenia współczynnika poprawkowego k_x kalibrowanego narzędzia KB,

z_F^2 - wyznaczenia transmitancji F , wynikającej z dokumentacji transferu T,

¹⁾ Ponieważ funkcja $H(F, y, k, x)$ zawiera tylko iloczyny i ilorazy, więc z prawa propagacji wynika, że wariancja względna tej funkcji $H = k_x$ jest równa sumie wariancji względnych poszczególnych argumentów tej funkcji.

- z_y^2 - wskazania y etalonu EC, wynikającej z jego skończonej rozdzielczości i powtarzalności,
- z_{ky}^2 - współczynnika poprawkowego etalonu EC, podanej w jego certyfikacie kalibracyjnym,
- z_x^2 - wskazania narzędzia kalibrowanego KB, wynikającej z jego skończonej rozdzielczości i powtarzalności.

Uwzględniając wzory (1) i (8) można stwierdzić, że prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej przez KB jest zawarta, z prawdopodobieństwem w przybliżeniu 95%, w przedziale:

$$x + \Delta x - 2s_{\Delta x} < \xi < x + \Delta x + 2s_{\Delta x} , \quad (10)$$

gdzie zgodnie z zaleceniami ISO [5] przyjęto współczynnik pokrycia równy 2 (co - przy założeniu rozkładu gaussowskiego zmiennej x - odpowiada właśnie poziomowi ufności 95%).

W tabelicy 1 zestawiono odpowiednie symbole wielkości oraz związki istniejące między nimi, dotyczące wyznaczania poprawki i jej niepewności. W tabelicy 2 zamieszczono analogiczne zestawienie dotyczące wyznaczania współczynnika poprawkowego i jego niepewności.

Tabela 1

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania poprawki i jej niepewności w procesie kalibracji miernika KB (struktura 1)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji miernika KB	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego miernika KB	x
2.	Wskazanie etalonu EC	y
3.	Poprawka dotycząca etalonu EC	Δy

1	2	3
4.	Poszukiwana poprawka dotycząca miernika KB	$\Delta x = F(y + \Delta y) - x$
5.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez miernik KB	$X = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez etalon EC	$Y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja transferu T	$F = X/Y = (x + \Delta x)/(y + \Delta y)$
8.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F	s_F
9.	Standardowa niepewność wskazania etalonu EC	s_y
10.	Standardowa niepewność poprawki Δy etalonu EC	$s_{\Delta y}$
11.	Standardowa niepewność wskazania miernika KB	s_x
12.	Standardowa niepewność wyznaczania poprawki Δx miernika KB	$s_{\Delta x} = [(y + \Delta y)^2 s_F^2 + F^2 s_y^2 + F^2 s_{\Delta y}^2 + s_x^2 + 2 F s_x s_y]^{1/2}$
13.	Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB	$X - 2s_{\Delta x} < \xi < X + 2s_{\Delta x}$

Jak wynika ze wzorów (8) i (9), uwzględniono tylko niepewności wynikające z niepewtarzalności i skończonej rozdzielczości narzędzi pomiarowych oraz niedoskonałości wyników ostatnich kalibracji etalonu EC i transferu T. Nie uwzględniono natomiast wpływu czynników zewnętrznych, jak np. temperatury, napięcia zasilania itp. Tytułem przykładu podaje się poniżej zarys uproszczonej analizy, dzięki której można uwzględnić najbardziej typowy wpływ,

jakim jest wpływ temperatury na wynik kalibracji narzędzia pomiarowego KB.

Tablica 2

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania współczynnika poprawkowego i jego niepewności w procesie kalibracji miernika KB (struktura 1)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji miernika KB	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego miernika KB	x
2.	Wskazanie etalonu EC	y
3.	Współczynnik poprawkowy dotyczący etalonu EC	$k_y = 1 + \Delta y/y$
4.	Poszukiwany współczynnik poprawkowy dotyczący miernika KB	$k_x = F y k_y / x = 1 + \Delta x/x$
5.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez miernik KB	$X = k_x x = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez etalon EC	$Y = k_y y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja transferu T	$F = X/Y = x k_x / y k_y = (x + \Delta x) / (y + \Delta y)$
8.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F	$z_F = s_F / F$
9.	Standardowa niepewność względna wskazania etalonu EC	$z_y = s_y / y$
10.	Standardowa niepewność względna współczynnika poprawkowego k_y etalonu EC	$z_{k_y} = s_{\Delta y} / y$

cd. tablicy 2

1	2	3
11.	Standardowa niepewność względna wskazania miernika KB	$z_x = s_x/x$
12.	Standardowa niepewność względna wyznaczania współczynnika poprawkowego k_x miernika KB	$z_{kx} = [z_p^2 + z_y^2 + z_{ky}^2 + z_x^2 + 2 z_x z_y]^{1/2} = s_{\Delta x}/x$
13.	Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB	$X(1 - 2z_{kx}) < \xi < X(1 + 2z_{kx})$

Przyjmuje się następujące założenia:

- temperatura otoczenia, przy jakiej dokonano ostatniej kalibracji etalonu EC, wynosiła t_e ,
- średnia temperatura otoczenia, przy jakiej dokonuje się aktualnej kalibracji narzędzia pomiarowego KB, wynosi t_k ,
- współczynnik temperaturowy wskazań etalonu EC wynosi α [%/°C],
- niepewność temperatury t_k , wywołana nieidealnością automatycznego urządzenia klimatyzacyjnego w laboratorium kalibracyjnym i pomiarem tej temperatury, wynosi $\pm \Delta t_k$ [°C].

Wobec tego wartość poprawna Y' , odpowiadająca wskazaniu etalonu EC w temperaturze t_k , nie równa się wartości Y wyznaczonej wg wzoru (3), lecz wyraża się następującym wzorem:

$$Y' = yk_y' = yk_y [1 + 10^{-2} \alpha (t_k - t_e)] , \quad (11)$$

tzn. aktualny współczynnik poprawkowy etalonu EC w temperaturze t_k jest równy

$$k_y' = k_y [1 + 10^{-2} \alpha (t_k - t_e)] . \quad (12)$$

Chcąc uwzględnić wpływ temperatury otoczenia t_k na niepewność wyznaczenia współczynnika poprawkowego k_y' , należy zwiększyć

wariancję względną dotyczącą składnika z_{ky}^2 we wzorze (9) o dodatkowy wyraz, tzn. zamiast składnika z_{ky}^2 stosować wyrażenie

$$(z_{ky}')^2 = z_{ky}^2 + \frac{(\Delta t_k)^2 10^{-4} \alpha^2}{3}, \quad (13)$$

przy czym założono, że rozkład temperatury t_k jest jednostajny w przedziale $(t_k - \Delta t_k) \dots (t_k + \Delta t_k)$.

Tak więc wszystkie wzory zestawione w tabelicy 2 są w tym przypadku również aktualne pod warunkiem, że zamiast wielkości k_y należy podstawić wielkość k_y' oraz zamiast wielkości z_{ky}^2 we wzorze (9) należy podstawić wielkość $(z_{ky}')^2$ wyrażoną wzorem (13).

Postępując analogicznie w odniesieniu do poprawki można uzyskać odpowiedni wzór, który jest w tym przypadku bardziej skomplikowany niż wzór (12), a mianowicie:

$$\Delta y' = \Delta y [1 + 10^{-2} \alpha (t_k - t_e)] + y 10^{-2} \alpha (t_k - t_e). \quad (14)$$

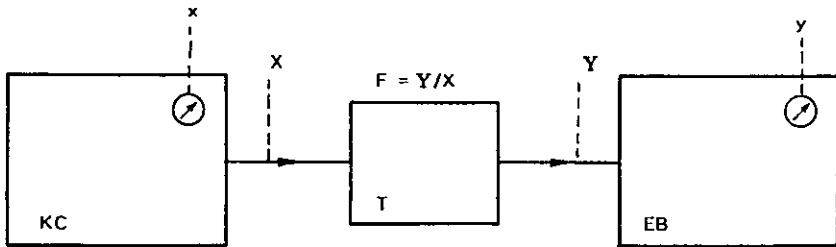
Chcąc uwzględnić również wpływ temperatury otoczenia t_k na niepewność wyznaczenia poprawki $\Delta y'$, należy zwiększyć wariancję dotyczącą składnika $F^2 s_{\Delta y}^2$ we wzorze (8) o dodatkowy wyraz, tzn. zamiast składnika $F^2 s_{\Delta y}^2$ stosować wyrażenie

$$F^2 (s_{\Delta y}')^2 = F^2 \left[s_{\Delta y}^2 + \frac{(\Delta t_k)^2}{3} 10^{-4} \alpha^2 (\Delta y + y)^2 \right]. \quad (15)$$

2.2. Struktura funkcjonalna 2

Struktura ta została graficznie przedstawiona na rys. 2. Jak z niego widać, układ kalibracyjny składa się z kalibrowanego narzędzia czynnego KC (wzorca miary), transferu T oraz etalonu biernego EB (miernika). Typowym przykładem takiej struktury może być przypadek, gdy człon KC stanowi kalibrowane źródło sygnałów elektrycz-

nych (generator pomiarowy), człon EB - woltomierz kontrolny, a człon T - tłumik nastawny.



Rys. 2. Druga struktura funkcjonalna wzajemnej relacji między etalonem biernym EB a kalibrowanym narzędziem pomiarowym czynnym KC

Przeprowadzając podobną analizę jak dla struktury 1 uzyska się analogiczne wyniki, które zestawiono w tablicach 3 i 4.

Tablica 3

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania poprawki i jej niepewności w procesie kalibracji wzorca miary KC (struktura 2)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji wzorca miary KC	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego wzorca miary KC	x
2.	Wskazanie etalonu EB	y
3.	Poprawka etalonu EB	Δy
4.	Poszukiwana poprawka dotycząca wzorca miary KC	$\Delta x = (y + \Delta y)/F - x$
5.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez wzorec miary KC	$X = x + \Delta x$

cd. tablicy 3

1	2	3
6.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez etalon EB	$Y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja transferu T	$F = Y/X = (y + \Delta y)/(x + \Delta x)$
8.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F	s_F
9.	Standardowa niepewność wskazania etalonu EB	s_y
10.	Standardowa niepewność poprawki Δy etalonu EB	$s_{\Delta y}$
11.	Standardowa niepewność wskazania kalibrowanego wzorca miary KC	s_x
12.	Standardowa niepewność wyznaczenia poprawki Δx wzorca miary KC	$s_{\Delta x} = [(y + \Delta y)^2 F^{-4} s_F^2 + F^{-2} s_y^2 + F^{-2} s_{\Delta y}^2 + s_x^2 + 2 F^{-1} s_x s_y]^{1/2}$
13.	Prawdziwa wartość ξ wielkości dostarczanej przez wzorzec miary KC	$X - 2s_{\Delta x} < \xi < X + 2s_{\Delta x}$

Tablica 4

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania współczynnika poprawkowego i jego niepewności w procesie kalibracji wzorca miary KC (struktura 2)

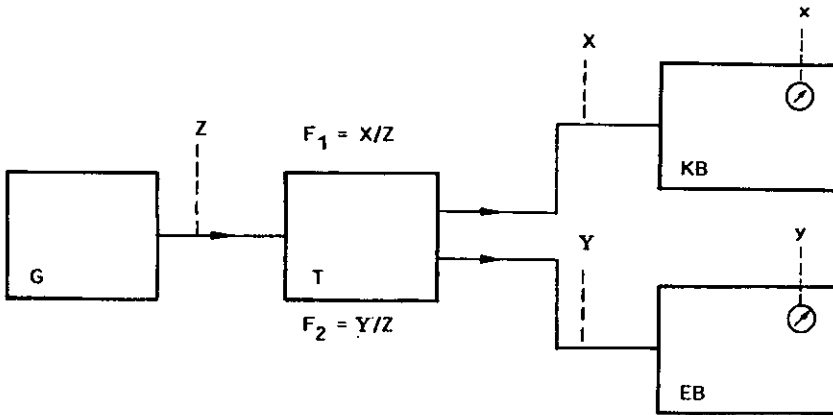
Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji wzorca miary KC	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego wzorca miary KC	x
2.	Wskazanie etalonu EB	y

1	2	3
3.	Współczynnik poprawkowy dotyczący etalonu EB	$k_y = 1 + \Delta y/y$
4.	Poszukiwany współczynnik poprawkowy dotyczący wzorca miary KC	$k_x = yk_y/xF = 1 + \Delta x/x$
5.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez wzorec miary KC	$X = k_x x = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez etalon EB	$Y = k_y y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja transferu T	$F = Y/X = yk_y/xk_x = (y + \Delta y)/(x + \Delta x)$
8.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F	$z_F = s_F/F$
9.	Standardowa niepewność względna wskazania etalonu EB	$z_y = s_y/y$
10.	Standardowa niepewność względna współczynnika poprawkowego k_y etalonu EB	$z_{ky} = s_{\Delta y}/y$
11.	Standardowa niepewność względna wskazania wzorca miary KC	$z_x = s_x/x$
12.	Standardowa niepewność względna wyznaczania współczynnika poprawkowego k_x wzorca miary KC	$z_{kx} = [z_F^2 + z_y^2 + z_{ky}^2 + z_x^2 + 2 z_x z_y]^{1/2} = s_{\Delta x}/x$
13.	Prawdziwa wartość ξ wielkości dostarczanej przez wzorec miary KC	$X(1 - 2z_{kx}) < \xi < X(1 + 2z_{kx})$

2.3. Struktura funkcjonalna 3

Struktura ta została graficznie zaprezentowana na rys. 3. Jak z niego widać, układ kalibracyjny składa się z kalibrowanego narzędzia biernego KB (miernika), transferu T o dwóch gałęziach, etalonu bier-

nego EB (miernika) oraz członu generacyjnego (pobudzającego) G. Typowym przykładem takiej struktury może być przypadek, gdy człon KB stanowi kalibrowany miernik mocy promieniowania optycznego, człon EB - kontrolny miernik mocy promieniowania optycznego, transfer T - optyczny sprzęgacz kierunkowy, a człon G - źródło promieniowania optycznego.



Rys. 3. Trzecia struktura funkcjonalna wzajemnej relacji między etalonem biernym EB a kalibrowanym narzędziem pomiarowym biernym KB

Przeprowadzając podobną analizę jak dla struktury 1 uzyska się analogiczne wyniki, które zestawiono w tablicach 5 i 6.

Tablica 5

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania poprawki i jej niepewności w procesie kalibracji miernika KB (struktura 3)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji miernika KB	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego miernika KB	x
2.	Wskazanie etalonu EB	y

1	2	3
3.	Poprawka etalonu EB	Δy
4.	Poszukiwana poprawka dotycząca miernika KB	$\Delta x = (y + \Delta y) F_1 / F_2 - x$
5.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez miernik KB	$X = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez etalon EB	$Y = y + \Delta y$
7.	Wartość wielkości zasilającej układ pomiarowy	Z
8.	Transmitancja F_1 transferu T	$F_1 = X/Z = (x + \Delta x) F_2 / (y + \Delta y)$
9.	Transmitancja F_2 transferu T	$F_2 = Y/Z = (y + \Delta y) F_1 / (x + \Delta x)$
10.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F_1	s_{F_1}
11.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F_2	s_{F_2}
12.	Standardowa niepewność wskazania etalonu EB	s_y
13.	Standardowa niepewność poprawki Δy etalonu EB	$s_{\Delta y}$
14.	Standardowa niepewność wskazania miernika KB	s_x
15.	Standardowa niepewność wyznaczenia poprawki Δx miernika KB	$s_{\Delta x} = [(y + \Delta y)^2 F^{-2} s_{F_1}^2 +$ $+ (y + \Delta y)^2 F_2^{-4} F_1^2 s_{F_2}^2 + F_1^2 F_2^{-2} s_y^2 +$ $+ F_1^2 F_2^{-2} s_{\Delta y}^2 + s_x^2 + 2 F_1 F_2^{-1} s_x s_y]^{1/2}$
16.	Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB	$X - 2s_{\Delta x} < \xi < X + 2s_{\Delta x}$

Tablica 6

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania współczynnika poprawkowego i jego niepewności w procesie kalibracji miernika KB (struktura 3)

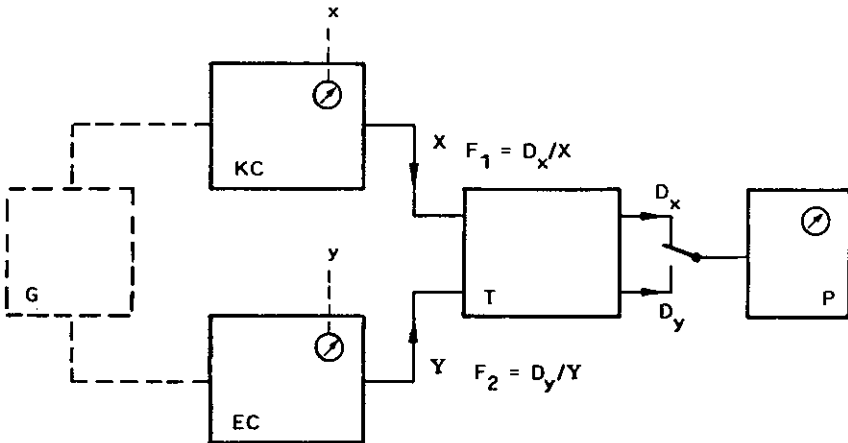
Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji miernika KB	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego miernika KB	x
2.	Wskazanie etalonu EB	y
3.	Współczynnik poprawkowy dotyczący etalonu EB	$k_y = 1 + \Delta y/y$
4.	Poszukiwany współczynnik poprawkowy dotyczący miernika KB	$k_x = y k_y F_1 / F_2 x = 1 + \Delta x/x$
5.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez miernik KB	$X = k_x x = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości mierzonej przez etalon EB	$Y = k_y y = y + \Delta y$
7.	Wartość wielkości zasilającej układ pomiarowy	Z
8.	Transmitancja F_1 transferu T	$F_1 = X/Z = k_x x F_2 / k_y y = (x + \Delta x) F_2 / (y + \Delta y)$
9.	Transmitancja F_2 transferu T	$F_2 = Y/Z = k_y y F_1 / k_x x = (y + \Delta y) F_1 / (x + \Delta x)$
10.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F_1	$z_{F_1} = s_{F_1} / F_1$
11.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F_2	$z_{F_2} = s_{F_2} / F_2$
12.	Standardowa niepewność względna wskazania etalonu EB	$z_y = s_y / y$

1	2	3
13.	Standardowa niepewność względna współczynnika poprawkowego k_y , etalonu EB	$z_{k_y} = s_{\Delta y}/y$
14.	Standardowa niepewność względna wskazania miernika KB	$z_x = s_x/x$
15.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia współczynnika poprawkowego k_x miernika KB	$z_{k_x} = [z_{F_1}^2 + z_{F_2}^2 + z_y^2 + z_{k_y}^2 + z_x^2 + 2 z_x z_y]^{1/2} = s_{\Delta x}/x$
16.	Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB	$X(1 - 2z_{k_x}) < \xi < X(1 + 2z_{k_x})$

2.4. Struktura 4

Struktura ta została graficznie przedstawiona na rys. 4. Jak z niego widać, układ kalibracyjny składa się z kalibrowanego narzędzia czynnego KC (wzorca miary), etalonu czynnego EC (wzorca miary), transferu T o dwóch gałęziach, członu porównawczego P z przełącznikiem i ewentualnie członu generacyjnego (pobudzającego) G. Typowym przykładem takiej struktury może być przypadek, gdy człon KC stanowi opornik "klasy" $0,01$ (10^{-4}), człon EC - opornik wzorcowy "klasy" $0,001$ (10^{-5}), transfer T - dwie pary przewodów, człon P - precyzyjny woltomierz 8-cyfrowy, a człon G - stabilizowane źródło prądu stałego. Inny przypadek wystąpi, gdy człon KC stanowi ogniwo Westona, człon EC - złącze Josephsona, transfer T - dzielnik oporowy 100:1 w gałęzi X oraz człon P (bez przełącznika) - nadprzewodzący interferometr kwantowy (SQUID).

Przeprowadzając podobną analizę jak dla struktury 1 uzyska się analogiczne wyniki, które zestawiono w tablicach 7 i 8.



Rys. 4. Czwarta struktura funkcjonalna wzajemnej relacji między etalonem czynnym EC a kalibrowanym narzędziem pomiarowym czynnym KC

Tablica 7

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania poprawki i jej niepewności w procesie kalibracji wzorca miary KC (struktura 4)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji wzorca miary KC	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego wzorca miary KC	x
2.	Wskazanie etalonu EC	y
3.	Poprawka etalonu EC	Δy
4.	Poszukiwana poprawka dotycząca wzorca miary KC	$\Delta x = v(y + \Delta y) F_2 / F_1 - x$
5.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez wzorec miary KC	$X = x + \Delta x$

1	2	3
6.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez etalon EC	$Y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja F_1 transferu T	$F_1 = D_x / X$
8.	Transmitancja F_2 transferu T	$F_2 = D_y / Y$
9.	Stosunek sygnałów porównywanych przez człon P	$v = D_x / D_y$ ¹⁾
10.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F_1	s_{F_1}
11.	Standardowa niepewność wyznaczenia transmitancji F_2	s_{F_2}
12.	Standardowa niepewność wskazania etalonu EC	s_y
13.	Standardowa niepewność poprawki Δy etalonu EC	$s_{\Delta y}$
14.	Standardowa niepewność wskazania wzorca miary KC	s_x
15.	Standardowa niepewność stosunku v	s_v
16.	Standardowa niepewność wyznaczenia poprawki Δx wzorca miary KC	$s_{\Delta x} = [v^2(y + \Delta y)^2 F_1^{-4} F_2^2 s_{F_1}^2 +$ $+ v^2(y + \Delta y)^2 F_1^{-2} s_{F_2}^2 + v^2 F_1^{-2} F_2^2 s_y^2 +$ $+ v^2 F_1^{-2} F_2^2 s_{\Delta y}^2 + (y + \Delta y)^2 F_1^{-2} F_2^2 s_v^2 +$ $+ s_x^2 + 2 v F_1^{-1} F_2 s_x s_y]^{1/2}$
17.	Prawdziwa wartość ξ wielkości dostarczanej przez wzorzec miary KC	$X - 2s_{\Delta x} < \xi < X + 2s_{\Delta x}$
¹⁾ Ze względu na dokładność kalibracji jest pożądane, aby $v \approx 1$, co można zrealizować doбором odpowiedniego transferu T.		

Tablica 8

Zestawienie głównych pojęć, oznaczeń i wzorów dotyczących wyznaczania współczynnika poprawkowego i jego niepewności w procesie kalibracji wzorca miary KC (struktura 4)

Lp.	Podstawowe pojęcia dotyczące kalibracji wzorca miary KC	Oznaczenia lub wzory
1	2	3
1.	Wskazanie kalibrowanego wzorca miary KC	x
2.	Wskazanie etalonu EC	y
3.	Współczynnik poprawkowy etalonu EC	$k_y = 1 + \Delta y/y$
4.	Poszukiwany współczynnik poprawkowy dotyczący wzorca miary KC	$k_x = vyk_y F_2/xF_1 = 1 + \Delta x/x$
5.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez wzorzec miary KC	$X = xk_x = x + \Delta x$
6.	Poprawna wartość wielkości dostarczanej przez etalon EC	$Y = yk_y = y + \Delta y$
7.	Transmitancja F_1 transferu T	$F_1 = D_x/X$
8.	Transmitancja F_2 transferu T	$F_2 = D_y/Y$
9.	Stosunek sygnałów porównywanych przez człon P	$v = D_x/D_y$ ¹⁾
10.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F_1	$z_{F_1} = s_{F_1}/F_1$
11.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia transmitancji F_2	$z_{F_2} = s_{F_2}/F_2$
12.	Standardowa niepewność względna wskazania etalonu EC	$z_y = s_y/y$

1	2	3
13.	Standardowa niepewność względna współczynnika poprawkowego k_y etalonu EC	$z_{k_y} = s_{\Delta y}/y$
14.	Standardowa niepewność względna wskazania wzorca miary KC	$z_x = s_x/x$
15.	Standardowa niepewność względna stosunku v	$z_v = s_v/v$
16.	Standardowa niepewność względna wyznaczenia współczynnika poprawkowego k_x wzorca miary KC	$z_{k_x} = [z_{F_1}^2 + z_{F_2}^2 + z_y^2 + z_{k_y}^2 + z_v^2 + z_x^2 + 2 z_x z_y]^{1/2} = s_{\Delta x}/x$
17.	Prawdziwa wartość ξ wielkości dostarczanej przez wzorzec miary KC	$X(1 - 2z_{k_x}) < \xi < X(1 + 2z_{k_x})$
1) Ze względu na dokładność kalibracji jest pożądane, aby $v \approx 1$, co można zrealizować doбором odpowiedniego transferu T.		

3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

3.1. Kalibracja multimetru (wg struktury 1)

Niech zgodnie z rys. 1 (por. także tablice 1 i 2) kalibrowanym narzędziem biernym KB będzie multimetr cyfrowy (4 1/2 cyfry) firmy Hewlett Packard typu HP 3466 A. Sprawdzeniu ma podlegać jego wskazanie napięcia stałego $x = 1,9000$ V na podzakresie pomiarowym 2 V. Dopuszczalny błąd wskazań tego multimetru (wg danych katalogowych) wynosi $\pm(0,03\% + 1$ cyfra), co przy wskazaniu x oznacza $\pm(3 \cdot 1,9 + 1) \cdot 10^{-4}$ V = $\pm 6,7 \cdot 10^{-4}$ V = $\pm 0,67$ mV.

Niech etalonem czynnym EC będzie wzorcowy kalibrator cyfrowy (8 1/2 cyfry) firmy Datron Instruments typu 4708. Wyżej wymienioną wartość x (punkt komutacji między wskazaniem $x = 1,8999$ V a wskazaniem $x = 1,9000$ V) uzyskano przy nastawieniu wartości $y = 1,900324$ V na podzakresie 10 V tego kalibratora. Dopuszczalna niepewność wskazania kalibratora EC wynosi (wg danych katalogowych) $\pm(4,5 \text{ ppm} + 3 \mu\text{V})$, co przy wskazaniu y oznacza $\pm(4,5 \cdot 1,9 + 3) \cdot 10^{-6} \text{ V} = \pm 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ V} = \pm 0,011 \text{ mV}$. Ze względu na dużą różnicę klas etalonu i kalibrowanego multimetru, wydaje się w tym przypadku usprawiedliwione założenie, że $\Delta y = 0$ lub że $k_y = 1$.

Należy założyć, że transfer T stanowi parę przewodów pomiarowych o znikomych oporach wobec oporu wejściowego multimetru KB, a więc można przyjąć konsekwentnie, że jego transmitancja $F = 1$. Przyjmuje się również, że niepewność tej transmitancji $s_F = 0$.

Należy wyznaczyć:

- poprawkę Δx lub współczynnik poprawkowy k_x ,
- jej niepewność standardową $s_{\Delta x}$ lub jego niepewność standardową względną z_{k_x} ,
- przedział, w którym zawiera się prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB.

● Rozwiązanie

- Poprawka (por. tablicę 1, p. 4)

$$\begin{aligned} \Delta x &= F(y + \Delta y) - x = y - x = \\ &= 1,900324 - 1,9000 = 0,000324 \text{ V} = 0,324 \text{ mV}, \end{aligned} \quad (16)$$

- współczynnik poprawkowy (por. tablicę 2, p. 4)

$$k_x = F y k_y / x = y / x = 1,900324 / 1,9000 = 1,000170. \quad (17)$$

b) Niepewność standardową poprawki (por. tablicę 1, p. 8-12) można wyznaczyć biorąc pod uwagę, że w tym przypadku $F = 1$, $s_F = 0$, $s_y = 10^{-6}/\sqrt{12} = 0,29 \cdot 10^{-6}$ V (błąd kwantowania etalonu EC), $s_{\Delta y} = 1,15 \cdot 10^{-5}/\sqrt{3} = 0,64 \cdot 10^{-5}$ V (niepewność standardowa etalonu EC) oraz $s_x = 10^{-4}/\sqrt{12} = 0,29 \cdot 10^{-4}$ V (błąd kwantowania multimetru KB). Uwzględniając to we wzorze ogólnym na standardową niepewność poprawki miernika KB uzyska się:

$$\begin{aligned} s_{\Delta x} &= [(y + \Delta y)^2 s_F^2 + F^2 s_y^2 + F^2 s_{\Delta y}^2 + s_x^2 + 2 |F s_x s_y|]^{1/2} = \\ &= [(0,29 \cdot 10^{-6})^2 + (0,64 \cdot 10^{-5})^2 + (0,29 \cdot 10^{-4})^2 + \\ &\quad + 2 \cdot 0,29 \cdot 10^{-4} \cdot 0,29 \cdot 10^{-6}]^{1/2} = 29,98 \cdot 10^{-6} \text{ V.} \end{aligned} \quad (18)$$

Postępując analogicznie przy wyznaczaniu niepewności standardowej względnej (por. tablicę 2, p. 8-12) i biorąc pod uwagę, że w tym przypadku $z_F = s_F/F = 0$, $z_y = s_y/y = 0,29 \cdot 10^{-6}/1,900324 = 0,1526 \cdot 10^{-6}$, $z_{ky} = s_{\Delta y}/y = 0,64 \cdot 10^{-5}/1,900324 = 0,3368 \cdot 10^{-5}$ oraz $z_x = s_x/x = 0,29 \cdot 10^{-4}/1,9 = 1,526 \cdot 10^{-5}$, można wyznaczyć standardową niepewność względną współczynnika poprawkowego miernika KB w następujący sposób:

$$\begin{aligned} z_{k_x} &= [z_F^2 + z_y^2 + z_{ky}^2 + z_x^2 + 2 |z_x z_y|]^{1/2} = \\ &= [(0,1526 \cdot 10^{-6})^2 + (0,3368 \cdot 10^{-5})^2 + (1,526 \cdot 10^{-5})^2 + \\ &\quad + 2 \cdot 1,526 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1526 \cdot 10^{-6}]^{1/2} = 15,77 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (19)$$

Sprawdzenia poprawności obliczeń numerycznych można łatwo dokonać mnożąc wartość niepewności względnej $15,77 \cdot 10^{-6}$ wg (19) przez wartość mierzoną poprawną $1,900324$ V, skąd wynika dokładnie wartość $29,98 \cdot 10^{-6}$ (por. wzór 18).

c) Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB zawarta jest w przedziale (por. tablicę 1, p. 5 i 13)

$$x + \Delta x - 2s_{\Delta x} < \xi < x + \Delta x + 2s_{\Delta x} \quad (20)$$

lub po wstawieniu wartości liczbowych

$$1,900000 + 0,000324 - 2 \cdot 0,00002998 < \xi < 1,900000 + 0,000324 + 2 \cdot 0,00002998, \quad (21)$$

co można przedstawić również w następującej postaci:

$$\xi = 1,900324 \pm 6,00 \cdot 10^{-5} \text{ [V]} \quad (22)$$

lub

$$1,900264 \text{ [V]} < \xi < 1,900384 \text{ [V]}. \quad (23)$$

W podobny sposób można stwierdzić, że prawdziwa wartość ξ zawiera się w przedziale (por. tablicę 2, p. 13)

$$(x + \Delta x) (1 - 2z_{k_x}) < \xi < (x + \Delta x) (1 + 2z_{k_x}) \quad (24)$$

lub po wstawieniu wartości liczbowych

$$1,900324(1 - 2 \cdot 15,77 \cdot 10^{-6}) < \xi < 1,900324(1 + 2 \cdot 15,77 \cdot 10^{-6}) \text{ [V]}, \quad (25)$$

czyli

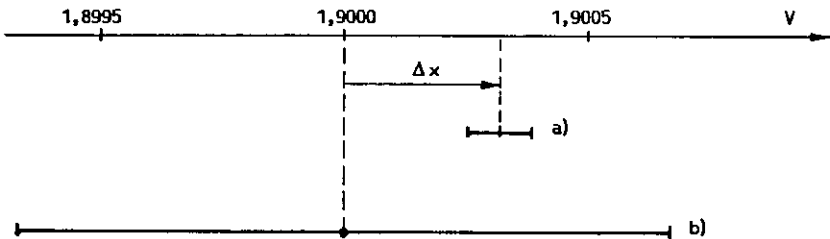
$$1,900324(1 - 3,15 \cdot 10^{-5}) < \xi < 1,900324(1 + 3,15 \cdot 10^{-5}) \text{ [V]}, \quad (26)$$

co bywa również zapisywane w następującej postaci:

$$\xi = 1,900324(1 \pm 3,15 \cdot 10^{-5}) \text{ [V]}. \quad (27)$$

● Wniosek ogólny

Kalibrowany multimetr KB spełnia z dużym zapasem wymagania dotyczące dopuszczalnego błędu wskazania $x = 1,9000$ V, ponieważ dopuszczalne odchylenie wynosi $\pm 0,67$ mV, czyli prawdziwa wartość napięcia mierzonego tym multimetrem może być zawarta w przedziale (1,89933 - 190067) V, podczas gdy w chwili kalibracji była zawarta w przedziale (1,900264 - 1,900384), a więc znacznie węższym (por. wzór 23 i rys. 5).



Rys. 5. Możliwy i dopuszczalny przedział wartości prawdziwej ξ napięcia przy wskazaniu $x = 1,9000$ V multimetru KB

- a) możliwy przedział wartości prawdziwej ξ napięcia przy wskazaniu $x = 1,9000$ V multimetru KB (po uwzględnieniu poprawki $\Delta x = 0,324$ mV) w chwili kalibracji;
- b) dopuszczalny przedział wartości prawdziwej ξ napięcia przy wskazaniu $x = 1,9000$ V multimetru KB wg danych jego producenta

3.2. Kalibracja generatora sygnałów (wg struktury 2)

Niech zgodnie z rys. 2 (por. także tablicę 3) kalibrowanym narzędziem czynnym KC będzie generator poziomu sygnału sinusoidalnego typu W 2008-K firmy Siemens o zakresie częstotliwości f od 200 Hz do 18,6 MHz i o znamionowej impedancji wewnętrznej $Z_g = 75 \Omega$. Sprawdzeniu ma podlegać jego wskazanie napięciowego poziomu wyjściowego $x = 0,0$ dB panującego na impedancji obciąże-

nia $Z_o = Z_g$. Podstawowe dane techniczne (istotne z punktu widzenia niniejszego procesu kalibracyjnego) kalibrowanego generatora są następujące:

- | | |
|---|--------------|
| a) poziom odniesienia przy częstotliwości
$f_o = 0,1$ MHz, przy impedancji $Z_o = Z_g$ | 0 dB |
| b) dopuszczalne odchylenie poziomu wg p. a) od jego wartości znamionowej | $\pm 0,1$ dB |
| c) dopuszczalne odchylenie poziomu zależne od częstotliwości (względem 0,1 MHz) w zakresie 1 kHz - 18,6 MHz | $\pm 0,1$ dB |
| d) temperatura otoczenia (podczas niniejszej kalibracji) | $+26$ °C |
| e) rozdzielczość wskazań | 0,1 dB |

Niech etalonem biernym EB będzie kontrolny miernik poziomu typu EPM-1 firmy Wandel & Goltermann wraz z głowicą (sondą) pomiarową typu TK-10 o zakresie częstotliwości f od 10 Hz do 300 MHz oraz 0 Hz (prąd stały). Istotne dane techniczne tego etalonu są następujące:

- | | |
|---|-------------------|
| a) poprawka na poziom autokalibracji prądem stałym | $+0,0002$ dB |
| b) dodatkowa poprawka na wskazanie poziomu 0 dB przy częstotliwości $f = 18,6$ MHz i w temperaturze $t_o = 23$ °C | $+0,007$ dB |
| c) niepewność poprawki wg p. a) w temperaturze $t_o = 23$ °C | $\pm 0,003$ dB |
| d) dodatkowa niepewność poprawki wg p. a) wynikająca ze zmian temperatury | $\pm 0,001$ dB/°C |
| e) niepewność poprawki wg p. b) | $\pm 0,020$ dB |
| f) niepewność wskazań wywołana zmianami temperatury | $\pm 0,005$ dB/°C |
| g) rozdzielczość wskazań | 0,01 dB |

Należy założyć, że transfer T stanowi para przewodów pomiarowych o znikomych oporach wobec oporu wejściowego etalonu EB, a więc można przyjąć konsekwentnie, że jego transmitancja $F = 1$. Przyjmuje się również, że niepewność tej transmitancji $s_F = 0$.

W procesie kalibracji uzyskano po 10 surowych wyników pomiarów powtarzanych dla częstotliwości odniesienia $f_o = 0,1$ MHz i dla częstotliwości granicznej $f_g = 18,6$ MHz.

f_o	f_g
$y_1 = +0,03$ dB	$y_1 = -0,06$ dB
$y_2 = +0,01$ dB	$y_2 = -0,08$ dB
$y_3 = +0,02$ dB	$y_3 = +0,02$ dB
$y_4 = 0,00$ dB	$y_4 = -0,05$ dB
$y_5 = -0,05$ dB	$y_5 = -0,09$ dB
$y_6 = +0,01$ dB	$y_6 = -0,04$ dB
$y_7 = -0,02$ dB	$y_7 = -0,06$ dB
$y_8 = -0,03$ dB	$y_8 = -0,02$ dB
$y_9 = +0,04$ dB	$y_9 = +0,01$ dB
$y_{10} = +0,02$ dB	$y_{10} = -0,05$ dB

Należy wyznaczyć:

- 1) poprawki Δx dla częstotliwości f_o i f_g ,
- 2) ich niepewności standardowe $s_{\Delta x}$,
- 3) przedziały, w których zawierają się prawdziwe wartości ξ wielkości wytwarzanej przez generator KC.

● Rozwiązanie

A. Częstotliwość $f = f_o = 0,1$ MHz

- Średnia wartość wskazań etalonu EB ($i = 1,2,\dots,10$)

$$y = 1/10 \sum y_i = +0,003 \text{ dB} . \quad (28)$$

- Odchylenie standardowe tej średniej wartości ($n = 10$)

$$\sigma_y = [\sum(y_i - y)^2 / n(n - 1)]^{1/2} = 0,00895 \text{ dB}. \quad (29)$$

- Poprawka wskazania etalonu EB w temperaturze $t_o = 23^\circ\text{C}$ (zakłada się, że jest ona taka sama jak przy prądzie stałym)

$$\Delta y = 0,0002 \text{ dB}. \quad (30)$$

- Poprawka wskazania generatora KC (por. tablicę 3, p. 4-6)

$$\Delta x = y + \Delta y - x = 0,003 + 0,0002 = 0,0032 \text{ dB} = X = Y. \quad (31)$$

- Standardowa niepewność wskazania etalonu EB (ujmująca błąd kwantowania, niepewność wg p. f) danych technicznych etalonu EB oraz rozrzut wyników pomiaru - por. wzór 29 oraz tablicę 3, p. 9)

$$s_y = \{(0,01^2/12) + [0,005(26 - 23)/\sqrt{3}]^2 + 0,00895^2\}^{1/2} = \\ = 0,01278 \text{ dB}. \quad (32)$$

- Standardowa niepewność $s_{\Delta y}$ poprawki Δy etalonu EB (por. tablicę 3 p. 10) ma dwa składniki, a mianowicie dotyczą:

- niepewności poprawki wg p. c) powyższych danych technicznych etalonu EB

$$0,003/\sqrt{3} = 0,00173 \text{ dB},$$

- niepewności poprawki wg p. d) powyższych danych technicznych etalonu EB

$$0,001(26 - 23)/\sqrt{3} = 0,00173 \text{ dB}.$$

Dodając te składniki geometrycznie uzyska się:

$$s_{\Delta y} = 10^{-3} [2 \cdot 1,73^2]^{1/2} = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ dB}. \quad (33)$$

- Standardowa niepewność wskazania generatora KC (por. tablicę 3, p. 11) ujmująca jego błąd kwantowania wynosi:

$$s_x = [0,1^2/12]^{1/2} = 28,87 \cdot 10^{-3} \text{ dB} . \quad (34)$$

- Uwzględniając więc wszystkie składniki wyrażone wzorami (32-34) można wyznaczyć standardową niepewność poprawki Δx generatora KC jak następuje (por. także tablicę 3, p. 12):

$$\begin{aligned} s_{\Delta x} &= 10^{-3} [12,78^2 + 2,45^2 + 28,87^2 + 2 \cdot 28,87 \cdot 12,78]^{1/2} = \\ &= 0,0417 \text{ dB} . \end{aligned} \quad (35)$$

Prawdziwa wartość ξ wielkości wytwarzanej przez generator KC, tzn. poziomu napięcia sygnału sinusoidalnego o częstotliwości $f_o = 0,1$ MHz, jest zawarta w przedziale (por. tablicę 3, p. 13)

$$0,0032 - 2 \cdot 0,0417 < \xi < 0,0032 + 2 \cdot 0,0417 ,$$

czyli

$$-0,0802 < \xi < +0,0866 \text{ [dB]} ,$$

co można również zapisać w następującej konwencjonalnej postaci:

$$\xi = (0,0032 \pm 0,0834) \text{ [dB]} . \quad (36)$$

B. Częstotliwość $f = f_g = 18,6$ MHz

- Średnia wartość wskazań etalonu EB ($i = 1,2,\dots,10$)

$$y = 1/10 \sum y_i = -0,042 \text{ dB} . \quad (37)$$

- Odchylenie standardowe tej średniej wartości ($n = 10$)

$$\sigma_y = [\sum (y_i - y)^2 / n(n + 1)]^{1/2} = 0,0113 \text{ dB} . \quad (38)$$

- Poprawka wskazania etalonu EB w temperaturze $t_0 = 23^\circ\text{C}$ (zakłada się, że jest ona sumą dwóch poprawek wg p. a) i b) danych technicznych etalonu EB)

$$\Delta y = 0,0002 + 0,007 = 0,0072 \text{ dB} . \quad (39)$$

- Poprawka wskazania generatora KC (por. tablicę 3, p. 4-6)

$$\Delta x = y + \Delta y - x = -0,042 + 0,0072 = -0,0348 \text{ dB} . \quad (40)$$

- Standardowa niepewność wskazania etalonu EB (ujmująca błąd kwantowania, niepewność wg p. f) powyższych danych technicznych etalonu EB oraz rozrzut wyników pomiaru - por. wzór 38 oraz tablicę 3, p. 9)

$$s_y = \left\{ (0,01^2/12) + [0,005(26-23)/\sqrt{3}]^2 + 0,0113^2 \right\}^{1/2} = 0,0145 \text{ dB} . \quad (41)$$

- Standardowa niepewność $s_{\Delta y}$ poprawki Δy etalonu EB (ujmująca niepewność wg p. c), d) i e) danych technicznych etalonu EB) wynosi:

$$s_{\Delta y} = \left\{ (0,003/\sqrt{3})^2 + [0,001(26-23)/\sqrt{3}]^2 + (0,02/\sqrt{3})^2 \right\}^{1/2} = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ dB} . \quad (42)$$

- Standardowa niepewność s_x wskazania generatora KC jest również taka sama jak w przypadku A, tzn.

$$s_x = 28,87 \cdot 10^{-3} \text{ dB} . \quad (43)$$

- Uwzględniając więc wszystkie składniki wyrażone wzorami (41-43) można wyznaczyć standardową niepewność poprawki Δx generatora KC jak następuje (por. także tablicę 3, p. 12):

$$s_{\Delta x} = 10^{-3} [14,5^2 + 11,8^2 + 28,87^2 + 2 \cdot 28,87 \cdot 14,5]^{1/2} = 0,0449 \text{ dB} . \quad (44)$$

Prawdziwa wartość ξ wielkości wytwarzanej przez generator KC, tzn. poziomu napięcia sygnału sinusoidalnego o częstotliwości $f_g = 18,6$ MHz, jest zawarta w przedziale (por. tablicę 3, p. 13)

$$-0,0348 - 2 \cdot 0,0449 < \xi < -0,0348 + 2 \cdot 0,0449,$$

czyli

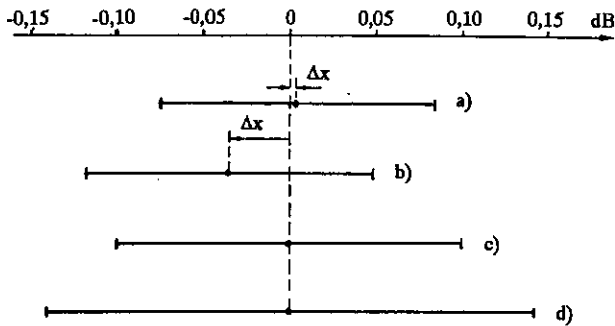
$$-0,125 < \xi < 0,055 \text{ [dB]},$$

co można również zapisać w następującej konwencjonalnej postaci:

$$\xi = (-0,0348 \pm 0,0898) \text{ [dB]}. \quad (45)$$

● Wniosek ogólny

Kalibrowany generator KC nie przekracza dopuszczalnego błędu wskazania $x = 0,0$ dB przy częstotliwości 0,1 MHz, ponieważ dopusz-



Rys. 6. Możliwe i dopuszczalne przedziały wartości prawdziwej ξ poziomu napięcia sygnału sinusoidalnego przy wskazaniu $x = 0$ dB generatora KC

a) możliwy przedział wartości prawdziwej ξ poziomu napięcia sygnału 0,1 MHz przy wskazaniu $x = 0$ dB generatora KC (po uwzględnieniu poprawki $\Delta x = 0,0032$ dB) w chwili kalibracji; b) możliwy przedział wartości prawdziwej ξ poziomu napięcia sygnału 18,6 MHz przy wskazaniu $x = 0$ dB generatora KC (po uwzględnieniu poprawki $\Delta x = -0,0348$ dB) w chwili kalibracji; c) dopuszczalny przedział wartości prawdziwej ξ poziomu napięcia sygnału 0,1 MHz przy wskazaniu $x = 0$ dB generatora KC wg danych jego producenta; d) dopuszczalny przedział wartości prawdziwej ξ poziomu napięcia sygnału 18,6 MHz przy wskazaniu $x = 0$ dB generatora KC wg danych jego producenta

czalne odchylenie wynosi $\pm 0,1$ dB, czyli prawdziwa wartość poziomu napięcia wytwarzanego przez ten generator może być zawarta w przedziale $(-0,1 \div +0,1)$ dB, podczas gdy w chwili kalibracji była zawarta w przedziale $(-0,0802 \div +0,0866)$ dB, a więc węższym (por. wzór 36). Podobnie przy częstotliwości 18,6 MHz dopuszczalne odchylenie wynosi $[0,1^2 + 0,1^2]^{1/2} = 0,141$ dB, czyli prawdziwa wartość poziomu napięcia wytwarzanego przez ten generator może być zawarta w przedziale $(-0,141 \div +0,141)$ dB, podczas gdy w chwili kalibracji była zawarta w przedziale $(-0,125 \div +0,055)$ dB, a więc węższym (por. wzór 45 i rys. 6).

3.3. Kalibracja miernika mocy promieniowania optycznego (wg struktury 3)

Niech zgodnie z rys. 3 (por. także tablice 5 i 6) kalibrowanym narzędziem pomiarowym biernym KB będzie miernik (poziomu) mocy promieniowania optycznego firmy Anritsu typu ML 9002 A wraz z czujnikiem (fotodetektorem InGaAs) typu MA 9621 A o zakresie pomiarowym $(-70 \div +3)$ dBm $(0,1 \text{ nW} \div 2 \text{ mW})$, o zakresie długości fali $(0,75 \div 1,7) \mu\text{m}$. Sprawdzeniu ma podlegać jego wskazanie poziomu wejściowego -10 dBm przy długości fali $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, czemu odpowiada moc $x = 100,0 \mu\text{W}$. Podstawowe dane techniczne (istotne z punktu widzenia niniejszego procesu kalibracyjnego) kalibrowanego miernika mocy KB są następujące:

- a) poziom mocy odniesienia (fali ciągłej,
 $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$) -10 dBm (100 μW)
- b) zakres pomiaru (poziomu)
mocy -70 \div +3 dBm (0,1 nW \div 2 mW)
- c) rozdzielczość wskazań (poziomu)
mocy 0,01 dB (0,1% \div 1%)

- d) niepewność wskazań (poziomu) mocy
(dla mocy odniesienia) $\pm 0,21$ dB ($\pm 5\%$)

Niech etalonem EB będzie multimetr optoelektroniczny firmy Hewlett Packard typu 8153 A, wyposażony w głowicę typu HP 81524 A i interfejs typu HP 81533 A. Podstawowe jego dane techniczne są następujące:

- a) zakres pomiaru (poziomu) mocy $-90 \div +3$ dBm (1 pW \div 2 mW)
- b) zakres długości fali 800 \div 1650 nm
- c) rozdzielczość wskazań (poziomu) mocy 0,001 dB (1 pW \div 0,1 μ W)
- d) niepewność wskazań (poziomu) mocy (w warunkach odniesienia) $\pm 0,095$ dB ($\pm 2,2\%$)

W tym przypadku transfer T stanowi optyczny sprzęgacz kierunkowy firmy Anritsu typu MN 9604 A o następujących danych technicznych:

- a) zakres długości fali 600 \div 1600 nm
- b) tłumienność wtrącenia ($1/F_1$ i $1/F_2$) ≤ 5 dB ($\leq 3,162$)
- c) różnica tłumienności wtrącenia obu gałęzi ≤ 2 dB ($\leq 1,585$)

Źródłem laserowym (podwójnym) promieniowania optycznego G jest wkładka do powyższego multimetru HP 8153 A firmy Hewlett Packard typu HP 81554 SM (dla ustawienia odpowiedniej wartości mocy x w mierniku KB należy włączyć dodatkowo między człon G i transfer T odpowiedni regulator - optyczny tłumik nastawny, nie zaznaczony na rys. 3) o następujących danych technicznych:

- a) długość fali centralnego prążka widma 1350/1550 ± 20 nm
- b) poziom mocy wyjściowej > -1 dBm ($> 0,7943$ mW)
- c) widmowa szerokość pasma $< 2,5/4$ nm rms
- d) niestabilność krótkoterminowa (15 min.) $\pm 0,005$ dB ($\pm 0,115\%$)

Konkretne parametry danego sprzęgacza kierunkowego przy $\lambda = 1,3$ μ m wynoszą:

- a) $F_1 = 0,3784$ (-4,22 dB),
 b) $F_2 = 0,3917$ (-4,07 dB),
 c) względne niepewności standardowe wyznaczenia wartości F_1 i F_2 (wyrażone w decybelach) wynoszą po $\pm 0,03$ dB, a więc (por. tablice 5 i 6) $z_{F_1} = z_{F_2} = \pm 0,00693$, czyli bezwzględne niepewności tych wartości są równe:
- $s_{F_1} = z_{F_1} \cdot F_1 = \pm 0,00262$,
 - $s_{F_2} = z_{F_2} \cdot F_2 = \pm 0,00271$.

Wskazanie etalonu EB wynosiło $y = 107,14 \mu\text{W}$. Zakłada się, że $\Delta y = 0$, czyli przyjmuje się, że cała niepewność, która jest wymieniona w p. d) powyższych danych technicznych etalonu, dotyczy granicznych wartości błędu wskazania tego etalonu; zakłada się konsekwentnie, że odpowiednia niepewność $s_{\Delta y} = 0$.

Należy wyznaczyć:

- a) poprawkę Δx ,
 b) jej niepewność standardową $s_{\Delta x}$,
 c) przedział, w którym zawiera się prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB.

● Rozwiązanie

- a) Poprawka (por. tablicę 5, p. 4)

$$\begin{aligned} \Delta x &= yF_1/F_2 - x = 107,14 \cdot 0,3784/0,3917 - 100 = \\ &= 3,50 \mu\text{W} \triangleq 0,15 \text{ dB}. \end{aligned} \quad (46)$$

- b) Niepewność standardowa wskazania etalonu EB (por. tablicę 5, p. 12)

$$s_y = z_y \cdot y = 2,2 \cdot 10^{-2} \cdot 107,14/\sqrt{3} = 1,36 \mu\text{W} \triangleq 0,055 \text{ dB}. \quad (47)$$

Standardowa niepewność wskazania miernika KB (ujmująca błąd kwantowania)

$$s_x = 0,1/2\sqrt{3} = 0,02887 \mu\text{W} \Delta 0,0013 \text{ dB}. \quad (48)$$

Tak więc standardowa niepewność wyznaczenia poprawki Δx miernika KB jest równa (por. tablicę 5, p. 15):

$$\begin{aligned} s_{\Delta x} &= [107,14^2 \cdot 0,3917^{-2} \cdot 0,00262^2 + \\ &+ 107,14^2 \cdot 0,3917^{-4} \cdot 0,3784^2 \cdot 0,00271^2 + \\ &+ 0,3784^2 \cdot 0,3917^{-2} \cdot 1,36^2 + 0,02887^2 + \\ &+ 2 \cdot 0,3784 \cdot 0,3917^{-1} \cdot 0,02887 \cdot 1,36]^{1/2} = \\ &= 1,68 \mu\text{W} \Delta 0,072 \text{ dB}. \end{aligned} \quad (49)$$

- c) Prawdziwa wartość ξ wielkości mierzonej miernikiem KB jest zawarta w przedziale (por. tablicę 5, p. 16)

$$100 + 3,5 - 2 \cdot 1,68 < \xi < 100 + 3,5 + 2 \cdot 1,68,$$

czyli $103,5 - 3,36 < \xi < 103,5 + 3,36 [\mu\text{W}] \quad (50)$

albo $100,14 < \xi < 106,86 [\mu\text{W}], \quad (51)$

co można również przedstawić w następującej postaci

$$\xi = 103,5 \pm 3,36 [\mu\text{W}] = 103,5 (1 \pm 0,032) [\mu\text{W}] \quad (52)$$

lub wyrażając to w decybelach

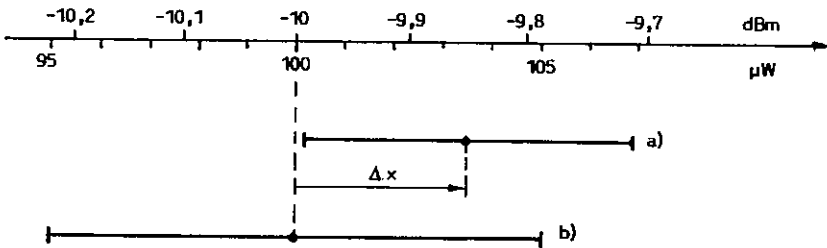
$$\xi = -9,85 \pm 0,14 [\text{dBm}] \quad (53)$$

albo $-9,99 < \xi < -9,71 [\text{dBm}]. \quad (54)$

● Wniosek ogólny

Kalibrowany miernik (poziomu) mocy promieniowania optycznego KB przy wskazaniu $x = 100,0 \mu\text{W}$ ($-10,00 \text{ dBm}$) oraz przy długo-

ści fali $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ wymaga zastosowania poprawki $\Delta x = 3,5 \mu\text{W}$ (0,15 dB) i wtedy jego wskazanie jest równe wartości poprawnej z niepewnością $\pm 3,36 \mu\text{W}$ ($\pm 0,14$ dB), a więc mniejszą niż dopuszczal producent tego kalibrowanego miernika, tzn. mniejszą niż $\pm 5 \mu\text{W}$ ($\pm 0,21$ dB) (por. rys. 7).



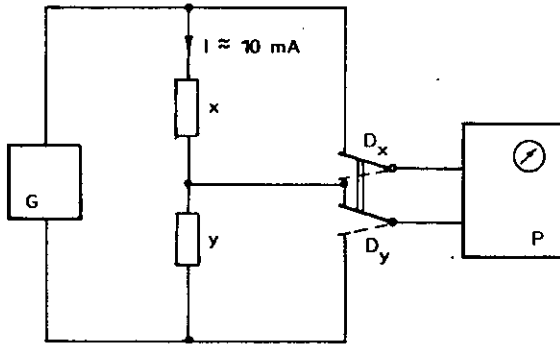
Rys. 7. Możliwe i dopuszczalne przedziały wartości prawdziwej ξ mocy przy wskazaniu $x = 100 \mu\text{W}$ (-10 dBm) miernika mocy promieniowania optycznego KB

- a) możliwy przedział wartości prawdziwej ξ mocy przy wskazaniu $x = 100 \mu\text{W}$ (-10 dBm) miernika KB (po uwzględnieniu poprawki $\Delta x = 3,5 \mu\text{W}$ (0,15 dB) w chwili kalibracji;
- b) dopuszczalny przedział wartości prawdziwej ξ mocy przy wskazaniu $x = 100 \mu\text{W}$ (-10 dBm) miernika KB wg danych jego producenta

3.4. Kalibracja opornika wzorcowego (wg struktury 4)

Niech zgodnie z rys. 4 (por. także tablice 7 i 8) człon KC i EC stanowią - każde z nich - oporniki wzorcowe firmy Cambridge Industrial Instruments Ltd. typu 43114 o wartościach znamionowych (wskazanych) $x = y = 100 \Omega$. Etalon EC jest wzorcem (miary) odniesienia o aktualnym certyfikacie kalibracyjnym, natomiast człon KC stanowi wzorzec (miary) roboczy, który należy poddać kalibracji, tzn. w tym przypadku przekazaniu poprawnej miary od etalonu EC do wzorca KC drogą komparacji (porównania). Zwraca się uwagę, że

w tym przypadku etalon EC i człon KC są narzędziami pomiarowymi tej samej klasy. Oba powyższe oporniki wzorcowe są połączone w szereg i zasilane ze źródła G, którym jest wzorcowy kalibrator cyfrowy opisany w przykładzie 1 (por. wyżej). Członem porównawczym P jest multimetr firmy Hewlett Packard typu 3458 A (8 1/2 cyfry). Transfer T stanowią w tym przypadku dwie pary przewodów, za pomocą których przekazuje się dwa porównywane napięcia $X = D_x$ i $Y = D_y$ (por. rys. 8), stanowiące spadki napięć na porównywanych oporach x i y .



Rys. 8. Schemat ideowy układu do komparacji oporników wzorcowych o oporach x i y (por. czwartą strukturę przedstawioną na rys. 4)

Podstawowe dane techniczne porównywanych oporników są następujące:

- | | |
|---|--------------------|
| a) opór znamionowy (wartość wskazana) ^{*)} | 100 Ω |
| b) niepewność wskazania tego oporu ^{*)} | $\pm 0,001 \Omega$ |

^{*)} Te dane pochodzą od producenta opornika KC i dotyczą odpowiednio jego wartości znamionowej i niepewności tej wartości, wynikającej z klasy tego opornika wzorcowego; wartość ta odnosi się w gruncie rzeczy do chwili jego wykonania i pierwszej kalibracji fabrycznej.

- c) poprawka etalonu EC Δy ^{*)} $\pm 0,004 \Omega$
 d) niepewność tej poprawki^{*)} $\pm 0,002 \Omega$

Podstawowe dane techniczne multimetru P są następujące:

- a) wybrany zakres pomiaru 1 (1,2) V
 b) niepewność wskazań (ujmująca błąd kwantowania i niepowtarzalność) $\pm [(0,3 \text{ wskazania} + 0,1 \text{ zakresu}) \text{ ppm}]$

Zakłada się w tym przypadku, że transfer T jest idealny, tzn. że $F_1 = F_2 = 1$ oraz że $s_{F_1} = s_{F_2} = 0$. Uzyskano następujące surowe wyniki pomiaru napięć: $D_x = 1,000090 \text{ V}$ oraz $D_y = 1,000000 \text{ V}$ (wartość nastawiona za pomocą regulatora w źródle G), tzn. $\nu = 1,000090$.

Należy wyznaczyć:

- a) poprawkę Δx lub współczynnik poprawkowy k_x ,
 b) jej niepewność standardową $s_{\Delta x}$ lub jego niepewność standardową względną z_{k_x} ,
 c) przedział, w którym zawiera się prawdziwa wartość ξ wielkości odtwarzanej przez wzorzec oporu KC.

● Rozwiązanie

- a) Poprawka (por. tablicę 7, p. 4)

$$\Delta x = 1,00009 (100 + 0,004) - 100 = 0,0130 \Omega \quad (55)$$

albo współczynnik poprawkowy (por. tablicę 8, p. 4)

$$k_x = 1 + \Delta x/x = 1 + 0,0130/100 = 1,000130 \quad (56)$$

^{*)} Te dane są zaczerpnięte z aktualnego świadectwa kalibracyjnego etalonu EC.

- b) Chcąc oszacować standardową niepewność względną wyznaczenia współczynnika poprawkowego k_x wzorca miary KC (por. tablicę 8, p. 10 ÷ 16) należy wyznaczyć następujące składniki:

$$- z_{F_1} = s_{F_1}/F_1 = 0$$

$$- z_{F_2} = s_{F_2}/F_2 = 0$$

$$- z_y = s_y/y = 10^{-3}/100\sqrt{3} = 0,577 \cdot 10^{-5}$$

$$- z_{k_y} = s_{\Delta y}/y = 2 \cdot 10^{-3}/100\sqrt{3} = 1,15 \cdot 10^{-5}$$

$$- z_v = s_v/v = \sqrt{2} \cdot 4 \cdot 10^{-7}/\sqrt{3} = 3,3 \cdot 10^{-7}$$

$$- z_x = s_x/x = z_y = 0,577 \cdot 10^{-5}$$

A więc ostatecznie ta niepewność względną

$$\begin{aligned} z_{k_x} &= 10^{-5} [0,577^2 + 1,15^2 + 0,033^2 + 0,577^2 + 2 \cdot 0,577^2]^{1/2} = \\ &= 1,63 \cdot 10^{-5}, \end{aligned} \quad (57)$$

skąd niepewność bezwzględna

$$s_{\Delta x} = x \cdot z_{k_x} = 100 \cdot 1,63 \cdot 10^{-5} = 1,63 \cdot 10^{-3} \Omega. \quad (58)$$

- c) Prawdziwa wartość ξ wielkości odtwarzanej przez wzorec miary oporu KC jest zawarta w przedziale (por. tablice 7 i 8, p. 17 oraz rys. 9)

$$100 + 0,013 - 2 \cdot 0,00163 < \xi < 100 + 0,013 + 2 \cdot 0,00163$$

albo

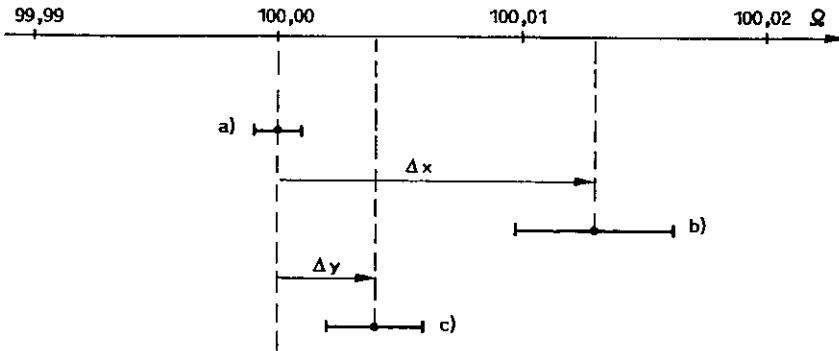
$$100,0130 - 0,00326 < \xi < 100,0130 + 0,00326, \quad (59)$$

czyli

$$100,0097 < \xi < 100,0163 [\Omega], \quad (60)$$

co można również przedstawić w następującej postaci:

$$\xi = 100,013 (1 \pm 3,26 \cdot 10^{-5}) [\Omega]. \quad (61)$$



Rys. 9. Możliwe przedziały odtwarzanej wartości prawdziwej oporu oporników wzorcowych porównywanych w procesie kalibracji

a) możliwy przedział odtwarzanej wartości prawdziwej oporu opornika wzorcowego typu 43114 firmy Cambridge I.I. Ltd. wg danych producenta; b) możliwy przedział odtwarzanej wartości prawdziwej ξ oporu opornika wzorcowego KC (po uwzględnieniu poprawki $\Delta x = 0,013 \Omega$) w chwili kalibracji; c) możliwy przedział odtwarzanej wartości prawdziwej ν oporu etalonu EC wg jego aktualnego świadectwa kalibracji (po uwzględnieniu poprawki $\Delta y = 0,004 \Omega$)

● Wniosek ogólny

1. Producent (Cambridge I.I. Ltd.) wykonał swego czasu wzorcowy opornik KC i przyporządkował mu wartość znamionową (nominalną) 100Ω , oraz jej niepewność $\pm 0,001 \Omega$, a więc niepewność względną $\pm 10^{-5} \Delta \pm 0,001\%$. Ta ostatnia liczba stanowi wyróżnik jego klasy. Niestety, nieznane jest określenie tej niepewności (np. brak danych dotyczących poziomu ufności lub nawiązania do wartości odchylenia standardowego).
2. Podczas wyżej opisanego procesu kalibracyjnego, przeprowadzonego na podstawie etalonu - wzorca oporu EC, który miał **aktualne** świadectwo kalibracyjne z podaną poprawką i jej niepewnością, można było przyporządkować temu opornikowi wzor-

cowemu KC **aktualną** wartość poprawki $0,013 \Omega$ i podać jej niepewność $\pm 0,00326 \Omega$, określoną jako podwójne odchylenie standardowe zmiennej losowej, jaką stanowi wyznaczona poprawka.

4. ZAKOŃCZENIE

1. W artykule rozpatrzono zagadnienie oceny i wyrażania niepewności typowych pomiarów przeprowadzanych podczas procesów kalibracji elektrycznych narzędzi pomiarowych, tzn. przyrządów pomiarowych oraz wzorców miary. Przyjęto najprostsze i jednocześnie typowe modele wzajemnych relacji między narzędziem kalibrowanym a etalonem.
2. W zależności od potrzeb można komplikować przedstawione modele kalibracyjne, uwzględniając dodatkowo takie okoliczności, jak na przykład:
 - a) różnicę między temperaturą, w której dokonano kalibracji etalonu, a temperaturą, w której dokonuje się aktualnej kalibracji na podstawie danego etalonu;
 - b) niestabilność temperatury otoczenia podczas kalibracji;
 - c) rozrzut wyników pomiaru;
 - d) inne (niż jednostajne) rozkłady założone przy ocenie niepewności wskazań w przypadku, gdy wytwórca narzędzia podał tylko wartości graniczne;
 - e) skomplikowany schemat korelacji wzajemnych między poszczególnymi zmiennymi algorytmu pomiaru;
 - f) dodatkowe czynniki wpływające (jak np. niestabilność czasową pewnych charakterystyk narzędzi pomiarowych, elektromagnetyczne pola zakłócające, wilgotność otaczającego powietrza itp.).

W charakterze przykładu przedstawiono przy analizie struktury 1 możliwy sposób uwzględnienia powyższego przypadku a) oraz przy analizie struktury 2 - przypadku c).

3. Aby zagwarantować spójność pomiarową, tzn. "właściwość wyniku pomiaru lub etalonu, polegającą na tym, że można je powiązać z określonymi odniesieniami, na ogół etalonami państwowymi lub międzynarodowymi, za pośrednictwem nieprzerwanego łańcucha porównań, z których wszystkie mają określone niepewności" [6], należy dbać o rzetelność wskazań roboczych (użytkowych) i kontrolnych (etalonów) narzędzi pomiarowych, czyli poddawać te narzędzia okresowym zabiegom kalibracyjnym, w których ocena niepewności ich wskazań jest rzeczą najistotniejszą.
4. Autor sądzi, że praktyczne przykłady obliczeniowe, podane w p. 3 powyżej, ułatwiają przyswojenie całości materiału opisowego i tabelarycznego oraz pokazują cały sposób postępowania metodą "krok po kroku", co powinno znacznie przybliżyć ideę tej metody do praktyki.

WYKAZ LITERATURY

1. Dudziewicz J.: *Niepewności wyników pomiaru*. Biuletyn Informacyjny Instytutu Łączności, nr 11-12 (285-286), 1990.
2. Dudziewicz J.: *Ocena niepewności wyniku pomiaru*. Biuletyn Informacyjny Instytutu Łączności, nr 1 (326), 1995.
3. Dudziewicz J.: *Określenia i oceny niepewności pomiaru w świetle praktyki wielkich ośrodków metrologicznych*. Biuletyn Informacyjny Instytutu Łączności, nr 1-2 (223-224), 1984.
4. Dudziewicz J.: *Praktyczna metoda oceny niepewności pomiaru*. Biuletyn Informacyjny Instytutu Łączności, nr 10 (303), 1992.
5. *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*. ISO, Genève, 1992.
6. *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. ISO, Genève, 1993.