

## ANALIZA NIEPEWNOŚCI WSKAZAŃ GENERATORA WILGOTNOŚCI

*W opracowaniu przeprowadzono analizę niepewności generatora wilgotności. W pierwszej kolejności omówiono zasadę pracy generatora, następnie, wykorzystując analizę fizyczną działania urządzenia, pokazano równanie, które modeluje procesy występujące w generatorze. Na tej podstawie przeprowadzono oszacowanie poszczególnych członów w równaniu i określono udział ich w ocenie niepewności wskazań urządzenia.*

### RELATIVE HUMIDITY UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE HUMIDITY GENERATOR

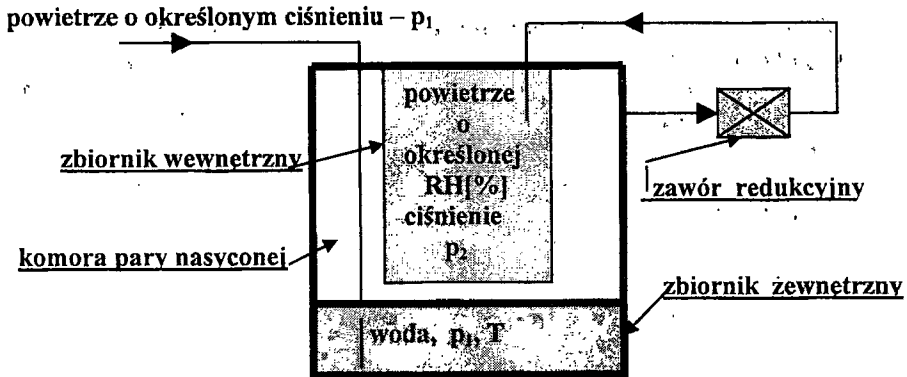
*Described here is the Relative Humidity Uncertainty Analysis for a Humidity Generator, that utilizes the developed and proven two-pressure humidity generation principle. Generation of humidity in a system of this type does not require direct measurement of the water vapor content of the gas. Rather, the generated humidity is derived from the measurements of saturation and chamber pressures, temperatures.*

## 1. WPROWADZENIE

Generator który omówimy, działa na zasadzie generatora dwu ciśnień, używany jest przez laboratoria zajmujące się wzorcowaniem przyrządów do pomiaru wilgotności. (jest na wyposażeniu laboratorium PIAP-LAB). Generator wytwarza dokładnie określone warunki wilgotności. Ze względów na uzyskiwane parametry przyrównywany jest do międzynarodowych wzorców. Wilgotność względna nastawiana jest przez zmianę nastawy precyzyjnego zaworu redukującego ciśnienie. Nastawienia oraz informacje o błędach można odczytywać na dwuwierszowym wyświetlaczu. Dzięki stałemu nastawieniu przepływu gazu 3l/min generator posiada maksymalnie krótki czas odpowiedzi, poniżej 1min. Z tego powodu jest bardzo wygodny w zastosowaniach.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA GENERATORA WILGOTNOŚCI

Strumień powietrza o ciśnieniu  $p_1$  (10 bar) podawany ze sprężarki poprzez regulator ciśnienia przechodzi przez komorę nasycenia wypełnioną wodą, gdzie ulega całkowitemu nasyceniu przy danym ciśnieniu  $p_1$ . Za zaworem redukcyjnym powietrze nasycone zostaje rozprężone do ciśnienia  $p_2$  i wypełnia komorę badań higrometrów. Przedstawiony na rys. – zbiornik wewnętrzny (testujący) utrzymuje określony stan wilgotności względnej w komorze.



Rys.1. Zasada działania generatora wilgotności

Założeniem istotnym jest utrzymywanie tej samej temperatury w komorze par nasyczonej jak i wewnętrznej. Równocześnie wilgotność powietrza z parą wodną o określonym ciśnieniu, zmniejsza się dokładnie w tej samej proporcji w jakiej zmniejszono ciśnienie w zbiorniku wewnętrznym. Powietrze przechodząc do komory badań (komory wewnętrznej) generuje wilgotność względną powietrza:

$w = \frac{p_2}{p_1} \cdot 100$  [%].RH Ciśnienia  $p_1$  i  $p_2$  są wtedy mierzone, a przy użyciu mikroprocesora obliczana jest wilgotność względna powietrza (w) z uwzględnieniem poprawki ściślności i funkcji kalibrowania. Schemat przyjęto zgodnie z katalogami producenta [1]

## 3. DANE TECHNICZNE

Generator działa na zasadzie dwóch ciśnień. Zakres pracy: 10 ÷ 95% RH.

Powtarzalność : ± 0,2 % RH

Dokładność odniesiona do wzorca fabrycznego, który otrzymano z wzorców międzynarodowych dla różnych zakresów RH przedstawia się następująco:

10 ÷ 70 ± 0,3 % RH ; 70 ÷ 85 ± 0,5 % RH ; 85 ÷ 95 ± 1,0 % RH

Czas odpowiedzi < 1 min. Stabilność : 0,5% RH. Przepływ gazu 3l/min dla wilgotności 85%, przepływ maleje do ok. 1,5 l/min przy 95% RH.

Zasilanie: 230 (110) V AC / 50 (60) Hz / < 25 W

Odolejone, filtrowane sprężone powietrze lub azot ( $N_2$ ) o maksymalnym ciśnieniu 10 bar. Woda destylowana (dejonizowana)

Wbudowane źródła zasilania: 24V DC, 150 mA, wskazania: wyświetlacz dwuwierszowy. Warunki otoczenia: temperatura:  $10 \div 40^{\circ}\text{C}$ ; wilgotność:  $10 \div 80^{\circ}\text{RH}$ . Wymiary : 400x260x200. Masa: 23 kg.

#### 4. STOSOWANE METODY SPRAWDZANIA

W pracy[2] podano historię budowy hierarchicznego układu wzorców higrometrycznych oraz ich realizację. Obecnie uznanym układem wzorców jest podany w dokumencie WMO-No.8[3]. W praktycznych zastosowaniach klimatycznych czujniki wilgotnościowe sprawdza się metodami najprostszymi. Do sprawdzania higrometrów włosowych i innych o niepewności  $\geq 2\%$  z powodzeniem mogą być wykorzystywane komory klimatyczne, w przestrzeni w których wytwarzane są żądane warunki klimatyczne. Są one w pełni zautomatyzowane i znane [2,4] Niektóre firmy (jako użytkownicy) sprawdzają czujniki w kilku punktach pomiarowych nad solami higrostatycznymi w odpowiednich pudełkach kalibracyjnych. Tą metodą można sprawdzać czujniki w przedziale od 0,5% do 95%RH [5].

Jako wzorce pierwotne stosowane są higrometry grawimetryczne, określające wilgotność z niepewnością  $\pm 0,2\%\text{RH}$ . Występują ponad to generatory wilgotności: dwu-temperaturowe oraz dwu-ciśnieniowe o podobnej niepewności ( $\pm 0,2\%\text{RH}$ ). Dalsze urządzenia to wzorce wtórne: higrometry punktu rosy z lustrem, psychrometr odniesienia, psychrometr Assmanna. Niepewność tych urządzeń waha się od  $\pm 0,5\%\text{RH}$  do  $\pm 2\%\text{RH}$ . Przedstawiony przegląd metod i urządzeń jak i ich niepewności wykazują, że przedstawiony generator w p.2. to wzorzec pierwotny, a określenie jego niepewności wiąże się z przyjętą metodologią jej szacowania. Przy tych wartościach niepewności, nie ma dokładniejszych urządzeń sprawdzających i jedynie pozostaje metoda porównawcza z odpowiednim oszacowaniem niepewności. Z tego też powodu podejmujemy ten temat.

#### 5. WARUNKI SPRAWDZANIA GENERATORA

W punkcie tym przedstawiamy wyniki jednego z sprawdzonych generatorów.

W celu dokonania sprawdzenia głowice czujnika higrometrycznego mierzącego punkt rosy połączono z wyjściem kalibratora. Mierzona była temperatura punktu rosy wpływającego powietrza. Temperaturę powietrza w komorze pomiarowej kalibratora mierzono termometrem rezystancyjnym platynowym. Wartość odniesienia dla wilgotności względnej w komorze pomiarowej obliczano na podstawie zmierzonych wartości i porównywano z wartościami wyświetlonymi przez generator. Regulowanie wartości po nastawieniu nowego punktu sprawdzanego uważano za zakończone gdy wyświetlana na kalibratorze (generatorze) wartość wilgotności nie wykazywała już dłuższej systematycznych zmian.

Wyniki uzyskane przedstawiono w tablicy 1, wszystkie dane podano w % RH.

Tablica 1

Wartość wyświetlana na generatorze	Wartość odniesienia dla wilgotności względnej	Odchylenia wartości wyświetlanej od wartości odniesienia
15,20	15,16	0,04
35,30	35,35	-0,05
55,55	55,48	0,07
75,85	75,65	0,2
85,80	86,27	-0,47
75,95	75,77	0,18
55,70	55,84	-0,14
35,30	35,38	-0,08
15,20	15,19	0,01

## 6. PODSTAWY DO ANALIZY NIEPEWNOŚCI

W przypadku oceny niepewności generatorów wilgotności ciśnieniowych wykorzystujemy model matematyczny procedury pomiarowej jak i prawo propagacji niepewności. Tak więc pomiar może być modelowany matematycznie w stopniu wynikającym z wymaganej dokładności opisu zjawisk fizycznych wykorzystywanych przy pomiarze. Wychodząc z definicji że; wilgotność względna stanowi stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej  $p_2$  (wg.p.1) w temperaturze  $T$ , do ciśnienia nasycenia pary wodnej  $p_1$  w tej samej temperaturze możemy określić względną wilgotność w dwu – ciśnieniowym generatorze wilgotności. Jest ona wyliczana z pomiaru: temperatury ciśnienia i jest wyrażona przez formułę:

$$w = p_2/p_1 * A_1/A_2 * B_1/B_2 * 100 \quad (1)$$

gdzie:  $w$  – wilgotność w komorze testowania,  $p_2$  – ciśnienie komory testującej,  $p_1$  – ciśnienie nasycenia, przy określonej temperaturze,  $A_2$  – ciśnienie pary nasyconej w komorze testującej,  $A_1$  – ciśnienie pary nasyconej przy ustalonej temperaturze, w komorze nasycenia- wg równania Wexlera [6], stosunek ten określa wpływ zmian temperatury między komorami.

$B_1$  – współczynnik wzmocnienia w komorze o nasyconym ciśnieniu i określonej temperaturze,  $B_2$  – współczynnik wzmocnienia w komorze testującej przy określonym ciśnieniu

Stosunek ten (współczynnik wzmocnienia) uwzględniający ww. współczynniki  $B_1$  i  $B_2$  wprowadzony jest do korekty obliczeń, ze względu na fakt, że para wodna nie zachowuje się jak idealny gaz. Współczynnik ten jest zależny od temperatury i ciśnienia i wyliczany jest z równania określonego w pracy [ 7 ] i zależny jest od temperatury i ciśnienia. Analiza ww. modelu matematycznego będzie przedmiotem oceny niepewności.

## 7. SKŁADOWE NIEPEWNOŚCI

Analiza równania [1]. pod względem oceny niepewności wskazuje, że powinny być analizowane poszczególne parametry i zmienne wprowadzone w równaniu. Tak więc każdy iloraz oceniany powinien być oddzielnie. Połączenie niepewności daje całkowitą rozszerzoną niepewność. Celowym wydaje się prowadzenie analizy następująco:

- obliczenie udziału niepewności wynikającej ze stosunku  $p_2/p_1$ , który zawiera: niepewność pomiaru, pomiar histerezy, pomiar rozdzielczości,
- obliczenie udziału niepewności stosunku  $A_1/A_2$ , która zawiera: niepewność pomiaru, niepewność pomiaru w komorze nasycenia, ocenę rozdzielczości, ocenę związaną z nagrzewaniem się komory testującej
- ustalenie udziału w niepewności stosunku  $B_1/B_2$

## 8. SUMARYCZNA NIEPEWNOŚĆ OKREŚLONA DLA STOSUNKU $P_2/P_1$

Wykorzystując prawo propagacji niepewności możemy ją zapisać następująco

$$U_c^2(P_2/P_1) = U^2(P_2) + U^2(P_1) + U^2(R_{p2}) + U^2(R_{p1}) + U^2(H) \quad (2)$$

gdzie:  $U_c(P_2/P_1)$  – niepewność całkowita określona dla stosunku  $p_2/p_1$

$U(P_2)$  - niepewność w komorze testującej

$U(P_1)$  - niepewność dla odpowiedniego ciśnienia nasycenia

$U(R_{p2})$  - niepewność uwzględniająca rozdzielczość w komorze testowania

$U(R_{p1})$  - niepewność uwzględniająca rozdzielczość w komorze nasycenia;

$U(h)$  – niepewność histerezy.

Przedstawione niepewności należy rozumieć jako udziały cząstkowe niepewności w niepewności -  $U_c$ . Suma tych udziałów jest kolejnym udziałem w określeniu całkowitej niepewności generatora. Analizę przedstawiamy w tablicy 2

Poszczególne składowe wyliczamy następująco:

$$U(P_2) = \pm \{(P_2 \pm \partial P_2)/(P_1) - (P_2/P_1)\} * 100 \quad (3)$$

$$U(P_1) = \pm \{(P_2)/(P_1 \pm \partial P_1) - (P_2/P_1)\} * 100 \quad (4)$$

Należy zwrócić uwagę, że niezbędnym jest określenie wielkości  $\partial P_2$  i  $\partial P_1$ . Przeprowadzając odpowiedniej liczności pomiary dla kilku punktów pomiarowych i określając odchylenie standardowe, którego wartość może być przyjęta jako elementarny przyrost odpowiedniej wartości ciśnienia, możemy obliczyć interesujące nas przyrosty.

W tablicy 2 przedstawiono składowe niepewności wilgotności w zależności od ciśnienia w komorze nasycenia.

Tablica 2

Źródło oceny niepewności	Typ oceny	Określenie ocenianej wielkości	Zakres ciśnień: $P_1 > 3$ bara
Pomiar	A	$U(P_1)$	$0,08 \pm 0,03$
Pomiar	A	$U(P_2)$	$0,05 \pm 0,006$
Rozdzielczość	B	$U(R_{11})$	$0,001 \pm 0,000$
Rozdzielczość	B	$U(R_{21})$	$0,001 \pm 0,000$
Histeresa	B	$U(H)$	0
Niepewność		$U_c(P_2/P_1)$	$0,09 \pm 0,03$

Rozdzielczość przetworników analogowo-cyfrowych określamy z zależności:

$$\text{rozdzielczość} = (\text{Zakres przetwornika}) / k * 0.5 / \sqrt{3}; \quad (5)$$

gdzie k- stała przetwornika

$$U(R_{p2}) = \pm (\text{Rozdzielczość} / P_1) * 100 \quad (6)$$

$$U(R_{p1}) = \pm [(P_2) / (P_1 \pm \text{Rozdzielczość}) - (P_2 / P_1)] * 100 \quad (7)$$

Wartości orientacyjne ww. rodzajów niepewności umieszczono w tablicy 2. Przy ciśnieniach małych  $p < 3$  bara, może wystąpić histeresa ciśnieniowa, którą określamy następująco:

$$\text{Histeresa} = [0,1\% * (P_1 - P_2)] / \sqrt{3} \quad (8)$$

$$U(h) = \pm [(P_2 + \text{Histeresa}) / (P_1) - (P_2 / P_1)] * 100 \quad (9)$$

W tablicy 2 nie uwzględniono histerazy, ponieważ jest ona określona dla ciśnień o większej wartości niż 3 bary.

## 9. SUMARYCZNA NIEPEWNOŚĆ OKREŚLONA DLA STOSUNKU $A_1/A_2$

Podobnie jak w p.8 sumaryczna niepewność dla stosunku  $A_1/A_2$  może być przedstawiona następująco:

$$U^2(A_1 / A_2) = U^2(T_1) + U^2(R_{T2}) + U^2(R_{T1}) + U^2(SH) \quad (10)$$

$$U(T_1) = \pm \{(A_1 + \partial A_1) / (A_2) - 1\} * w \quad (11)$$

Równanie (11) określa:  $U(T_1)$  niepewność, związaną z różnicami temperatury między komorą testującą a komorą nasycenia.

$$U(R_{T2}) = \pm \{(A_1 / A_2 + \text{Rozdzielczość}) - 1\} * w \quad (12)$$

$U(R_{T2})$  – uwzględnia niepewność w komorze testującej uzależnioną od rozdzielczości użytego do pomiarów termometru.

$$U(R_{T1}) = \pm \{(A_1 + \text{Rozdzielczość} / A_2) - 1\} * w \quad (13)$$

$U(R_{T1})$  – uwzględnia niepewność w komorze nasycenia uzależnioną od rozdzielczości użytego termometru.

Przykładowo można przyjąć: rozdzielczość termometru =  $0,01 * 0,5 \sqrt{3}$ .  
Uwzględniamy w cyfrowym termometrze jego stałą =  $0,01^\circ\text{C}$ , oraz przyjmujemy zmiany wg połowy przedziału rozkładu prostokątnego.

Ponieważ komora prób jest w otoczeniu nie izolowanym, występuje możliwość powstania dodatkowej niepewności z nagrzania komory. Przyjmowana jest jako 0.05% odczytywanej wartości.

Możemy określić: rozdzielczość od nagrzania :

$$R_{dt} = 0,05\% T_2 \sqrt{3} \quad (14)$$

Natomiast niepewność od nagrzania :

$$U(\text{SH}) = \pm \{(A_1 / A_2 + R_{dt}) - 1\} * w \quad (15)$$

Niepewność sumaryczną dla tego stosunku uwzględniającą podane źródła niepewności przedstawiamy w tablicy 3.

## 10. SUMARYCZNA NIEPEWNOŚĆ OKREŚLONA DLA STOSUNKU $B_1/B_2$

Ten stosunek może ulec zmianie pod wpływem fluktuacji ciśnienia i temperatury. Zgodnie z pracą [ ] możemy określić :  $U_2(B_1/B_2) = 0,0088(100-w)$   
W zależności od ciśnienia wartość jego może się wahać od 0,005 dla ciśnień mniejszych ok. 3 bara i wilgotności 95% do 0,0079 dla ciśnień 9. bara i wilgotności 10%.

Tablica 3

Źródło oceny niepewności	Typ oceny	Określenie ocenianej wielkości	Zakres temperatur $0^\circ \div 70^\circ \text{C}$
$T_1 - T_2$	A	$u(T_i)/w$	$0,00081 \div 0,00043$
$T_1$ -Rozdzielczość	B	$u(R_{TC})/w$	$0,00024 \div 0,00013$
$T_2$ -Rozdzielczość	B	$u(R_{Ts})/w$	$0,00016 \div 0,00013$
Nagrzanie kom.	B	$u(SH)/w$	0,00087
Niepewność sumaryczna		$u(A_1/A_2)$	0,00099

$T_1 - T_2$  – różnica temperatur między komorą nasycania a komorą testowania.

## 11. NIEPEWNOŚĆ ZWIĄZANA Z SKUTECZNOŚCIĄ NASYCENIA

Niepewność tę oznaczamy :  $U_{SE} = 0,35 / \sqrt{6} * w$

Wszystkie generatory wilgotności ciśnieniowej posiadają komory umożliwiające nasycenie parą wodną od wejścia do wyjścia. Skuteczność procesu nasycania jest oceniana na  $100 \pm 0,35\%$  przy założeniu rozkładu trójkątnego dla wartości średniej 100. Stąd, standardowa niepewność składowa związana ze skutecznością nasycenia może być określona wyżej podaną zależnością.

## 12. CAŁKOWITA NIEPEWNOŚĆ GENERATORA

Całkowitą niepewność uzyskujemy przez połączenie standardowych niepewności składowych dla: stosunku ciśnień -  $P_1/P_2$ , stosunku ciśnień pary nasyconej -  $A_1/A_2$ , współczynników wzmocnienia -  $B_1/B_2$  oraz skuteczności nasycenia.

$$U_c^2(w) = U_c^2(P_2 / P_1) + U_c^2(A_1 / A_2) + U_c^2(B_1 / B_2) + U_c^2(SE) \quad (16)$$

gdzie:  $U_c(w)$  – jest całkowitą niepewnością otrzymanej wilgotności w generatorze. Przyjmując współczynnik pokrycia rozkładu  $k = 2$  otrzymujemy niepewność rozszerzoną z zależności:  $U_r(w) = k * U_c(w)$ .



Tablica 4

Rozszerzona niepewność $U_r$ (w) dla współczynnika pokrycia $k=2$	
Temperatura nasycenia	Zakres ciśnień: 3 ÷ 9 bara
	Zakres wilgotności: 95% ÷ 10%
0°C	$\pm 0,35 \div \pm 0,17$
35°C	$\pm 0,35 \div \pm 0,17$
70°C	$\pm 0,36 \div \pm 0,17$

Analiza tych danych wykazuje, że zmiany wyżej przedstawione są rozstępem wyników maksymalnych zmian, przy przyjęciu tych założeń, które przedstawiono w ww. punktach oraz dla podanego zakresu zmian ciśnień i temperatur.

## 14. WNIOSKI

- Analiza przeprowadzonego schematu obliczeń niepewności wykazała że wpływ na niepewność generatora zależy od odpowiedniego elementu analizowanego w równaniu końcowym (16) i w poprzednich (1), (2) (10).
- Największy wpływ ma niepewność określana mają pomiary stosunku ciśnień  $P_2$  i  $P_1$ . Rozdzielczość dla tych ciśnień i histereza podano w tab.2.są o rząd mniejsze. W praktycznych ocenach mogą być pominięte. Natomiast widać wyraźnie, że pomiar ciśnienia w komorach powinien być jak najdokładniejszy.
- Histereza jest widoczna przy ciśnieniach niskich w przedziale 1 ÷ 3 bara. Wartość jej waha się w zakresie 0,003 dla dolnego ciśnienia i dochodzi do wartości 0,04 dla ciśnienia 3 bara.
- Stosunek  $A_1/A_2$  – ujmuje wpływ różnicy temperatur w komorach nasycenia i testowania. Z tablicy3 widać wyraźnie, że niepewność różnicy  $T_1 - T_2$  jest największa w porównaniu wartościami rozdzielczości i ogrzania komory. Wobec tego widać wyraźnie, że pomiar temperatury powinien być zapewniony jak najdokładniejszy.
- Współczynnik skuteczności nasycenia wzrasta wraz z wzrostem ciśnienia i malejącą wilgotnością.
- Należy zwrócić uwagę, że typy oceny niepewności A i B oparte są na wytycznych podanych w przewodniku GUM.
- Przyjęte rozkłady dla odpowiednich obliczeń są zalecane w wielu opracowaniach dla cyfrowych przetworników ciśnieniowych i termometrów rezystancyjnych.
- Porównując wyniki z tablicy1 z obliczeniami niepewności całkowitej wykazują, że jednoznaczna ocena globalna wilgotności generatora nie jest sprawą oczywistą. Niepewność poszczególnych punktów pomiarowych generatora jest różna, dlatego trudno przeprowadzić globalną ocenę.
- W związku z tym, że mamy do czynienia z wzorcem wysokiej klasy, sprawdzanie jego sprowadzić można jedynie do badań porównawczych.
- Wprowadzenie niepewności rozszerzonej powoduje jej wzrost i znaczne rozszerzenie przedziału zmian. Ten fakt jest dla wielu producentów trudny do przyjęcia i dlatego nie dokonują analizy, którą przytoczyliśmy.

- W laboratoriach akredytowanych, gdzie znajdują się podobne generatory powinno się rozważyć celowość stosowania wyżej przytoczonej analizy. Może być ona sensowna, jeżeli posiadamy potrzebę oceny wyników na granicy niepewności wzorca. Oddzielnym zagadnieniem jest, gdy żądają analizy audytorzy laboratorium.

## LITERATURA

- [1] Katalog firmy E+E ELEKTRONIK
- [2] Kostyrko K, Łobzowski A.: Klimat Pomiary Regulacja wyd. PAK Warszawa, wrzesień 2002.
- [3] Guide to meteorological instruments and method of observation. Six ed., WMO – No 8. Geneva 1996
- [4] <http://www.heraeus-sensor-nite.com>
- [5] Wexler A: Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 to 100°C. A Revision, Journal of Research of NBS 1976, vol, 80A, No5 and 6 775÷-785.
- [7] Greenspan L: Funkcional Equations for Enhancement Factor for CO<sub>2</sub> – Free Moist Air. Journal of Research of the NBS 1976, vol.80A, No1,41÷44
- [8] [http:// www.reteronic-usa.com](http://www.reteronic-usa.com)
- [9] Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej PWN, Warszawa 2000 t.1
- [10] Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii. wyd. GUM 1996
- [11] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. GUM 1999.