

*pneumatyczny przetwornik długości,
pomiar bezdotykowy,
niepewność pomiarów*

Michał JAKUBOWICZ¹
Czesław Janusz JERMAK¹

NIEPEWNOŚĆ POMIARU DŁUGOŚCI Z UŻYCIEM PRZETWORNIKA PNEUMATYCZNEGO

W artykule omówiono wybrane aspekty analizy niepewności pomiaru długości z użyciem przetwornika pneumatycznego. W celu wyznaczenia niepewności pomiaru szerokości szczeliny s , przy wykorzystaniu systemu pomiarowego wyposażonego w pneumatyczny przetwornik długości oraz przetwornik ciśnienia, zastosowano procedurę wzorcowania i estymacji współczynników charakterystyki statycznej. Badania przeprowadzono dla przetworników z różnymi zestawami dysz. Przyjęte zestawy umożliwiły uzyskanie parametrów metrologicznych stosowanych w przemysłowych przyrządach pomiarowych. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej i w jej efekcie ustalono, w jakim zakresie znajduje się poprawna wartość mierzonej szerokości szczeliny pomiarowej s .

1. WPROWADZENIE

Rozwój procesów produkcji części maszyn jest ściśle związany z doskonaleniem metod i środków kontroli. Szczególna rola przypada przyrządom realizującym pomiary metodą bezdotykową, do których zaliczane są pneumatyczne przetworniki długości (PPD).

Powietrze zostało po raz pierwszy wykorzystane do pomiarów wielkości geometrycznych pod koniec pierwszej wojny światowej [1]. Prace między innymi Breitingera, Lotzego i Balaksina przyczyniły się do opracowania teoretycznych podstaw działania czujników pneumatycznych [2],[3],[4]. Lata 1980-90 to okres regresu w konstrukcji i stosowaniu przyrządów pneumatycznych – przyczyną była niekorzystna dynamika układów pomiarowych i ograniczone możliwości przetwarzania sygnału pomiarowego [5]. Ponowny wzrost zainteresowania czujnikami pneumatycznymi odnotowano pod koniec XX wieku.

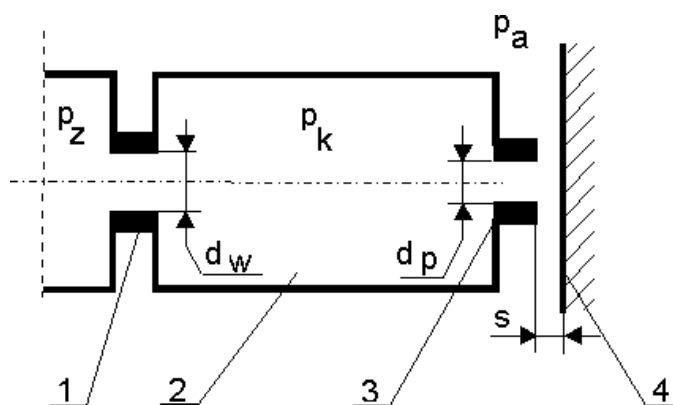
Pneumatyczne przetworniki długości stanowią ważną grupę narzędzi pomiarowych stosowanych w pomiarach części maszyn, w biernych i czynnych układach kontroli wymiaru i kształtu, szczególnie w warunkach zanieczyszczenia strefy pomiaru oraz jego bezdotykowej realizacji.

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych,
E_mail: cz.jermak@interia.pl

Ważnym zagadnieniem w pomiarach jest wyznaczenie niepewności pomiarów, podstawowego parametru określającego przydatność przyrządu do realizacji określonego zadania pomiarowego z zadaną dokładnością. W pomiarach pneumatycznych mierzoną wielkością jest szerokość szczeliny s , stanowiąca odległość pomiędzy czołem dyszy pomiarowej a powierzchnią mierzoną. W celu wyznaczenia niepewności pomiaru szerokości szczeliny zastosowano procedurę wzorcowania i estymacji współczynników charakterystyki statycznej opisaną w [6],[7].

2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA PNEUMATYCZNEGO PRZETWORNIKA DŁUGOŚCI

Przedstawiony na rysunku 1 pneumatyczny przetwornik długości zbudowany jest z dyszy wlotowej 1, komory pomiarowej 2 oraz dyszy pomiarowej 3. W aplikacyjnych rozwiązaniach często występuje większa liczba dysz pomiarowych (średnicówka pneumatyczna) [7].

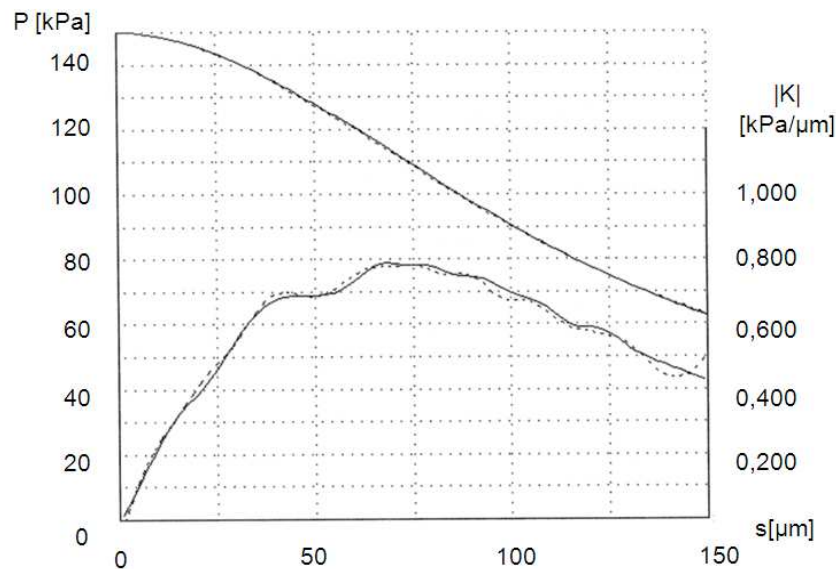


Rys. 1. Schemat pneumatycznego przetwornika długości [7],[8]

Fig. 1. Air gauge scheme [7],[8]

Wpływ powietrza z dyszy pomiarowej 3 ograniczony jest przesłoną 4 (powierzchnia mierzona) oddaloną od czoła o odległość s . W przemysłowych układach pomiarowych powierzchnię przesłony stanowi mierzony przedmiot. Powszechnie stosowane w przetwornikach dysze wlotowa i pomiarowa posiadają otwory o przekroju kołowym i średnicach, odpowiednio d_w i d_p [7],[8]. W komorze pomiarowej występuje ciśnienie pomiarowe (kaskadowe) p_k , którego wartość zmienia się wraz ze zmianą wielkości szczeliny pomiarowej oraz zależy od geometrii dysz [7].

Podstawową charakterystyką metrologiczną PPD jest charakterystyka statyczna $p_k = f(s)$, opisująca zależność ciśnienia kaskadowego, mierzonego w komorze pomiarowej, w stosunku do odległości s czoła dyszy pomiarowej od przesłony (powierzchni mierzonej). Przykładowa charakterystyka statyczna oraz charakterystyka czułości została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy przebieg charakterystyki statycznej $p_k = f(s)$ oraz czułości $|K| = g(s)$; $d_p = 0,830\text{mm}$, $d_w = 0,570\text{mm}$, $D_c = 1,5$ [8]

Fig. 2. Example of static characteristic $p_k = f(s)$ and sensitivity $|K| = g(s)$; $d_p = 0.830\text{mm}$, $d_w = 0.570\text{mm}$, $D_c = 1.5$ [8]

3. PROCEDURA WZORCOWANIA

Zagadnienie wzorcowania (kalibracji) przyrządów pomiarowych, jako kluczowe w metrologii, jest szeroko opisywane w literaturze przedmiotu [6]. Zgodnie z definicją przedstawioną według przewodnika ISO/IEC nr 25:1990 [9] wzorcowanie to „zbiór operacji, za pomocą których ustala się w określonych warunkach, zależności między wartościami wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ pomiarowy, albo wartościami reprezentowanymi przez wzorzec miary lub materiał odniesienia a odpowiadającymi im wartościami wielkości, realizowanymi przez wzorzec odniesienia”. Celem wzorcowania jest wyznaczenie i utrwalenie charakterystyki systemu pomiarowego z zadaną z góry niepewnością.

W przyrządzie pomiarowym o ustalonej charakterystyce statycznej mamy do czynienia z przetwarzaniem szerokości szczeliny pomiarowej s (sygnał wejściowy) na wartość ciśnienia kaskadowego p_k (sygnał wyjściowy), w którym model matematyczny systemu pomiarowego w warunkach odniesienia ma postać [7]:

$$p_{k0} = f(s) = p_{k(s=0)} + Ks \quad (1)$$

gdzie: $p_{k(s=0)}$ – wartość ciśnienia pomiarowego odpowiadająca szerokości szczeliny $s = 0\mu\text{m}$.

Aby przetwornik służył do pomiaru szerokości szczeliny pomiarowej s , wskazaniom zmiany ciśnienia kaskadowego p_k opisanym wzorem:

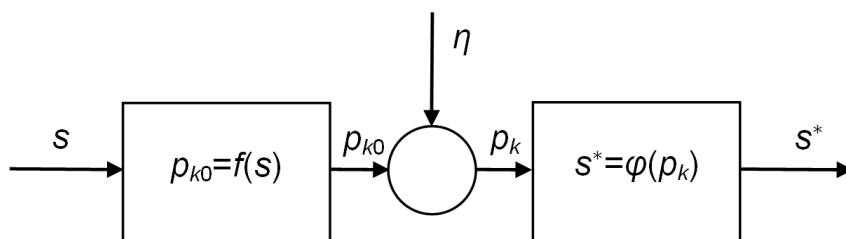
$$p_k = p_{k0} + \eta \quad (2)$$

nadaje się miarę wielkości mierzonej s , wykorzystując określoną procedurę wzorcowania [6],

$$s^* = \varphi(p_k) = c_0 + c_1 p_k \quad (3)$$

gdzie: η – stanowi losowy proces $\{\eta\}$, opisujący błędy przypadkowe generowane przez przetwornik, s^* – wartość wskazania przyrządu wzorcowanego, c_0 – wyraz wolny procedury wzorcowania, c_1 – współczynnik nachylenia charakterystyki wzorcowania.

Schemat modelu matematycznego systemu pomiarowego przedstawiony został na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat modelu matematycznego przyrządu i procedury wzorcowania [6],[7]
Fig. 3. Schema of a mathematical model of the device and calibration procedures [6],[7]

4. OCENA NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

Przyjęto, że właściwości przyrządu dobrze opisuje liniowe równanie przetwarzania o współczynnikach p_k , K [7]:

$$p_{k0} = f(s) = p_{k(s=0)} + Ks \quad (4)$$

i po uwzględnieniu błędów przypadkowych $\{\eta\}$ daje ono przed wzorcowaniem wskazania p_k

$$p_k = f(s) + \eta = p_{k(s=0)} + Ks + \eta \quad (5)$$

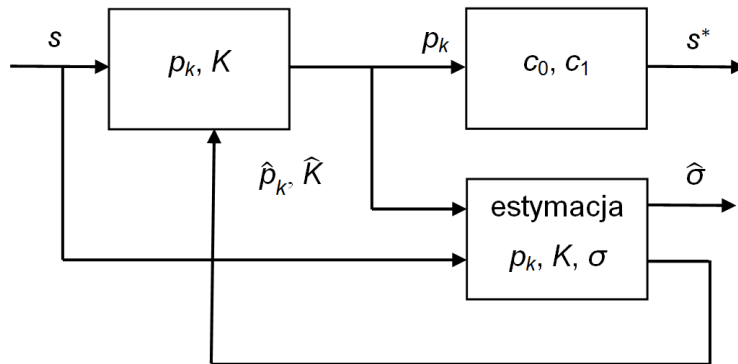
Procedura wzorcowania zakłada odpowiedni dobór [6]:

1. Liczba wzorców, zaleca się 5÷15 punktów kalibracji. Zwiększanie liczby wzorców zmniejsza udział błędów systematycznych, których wartości są stałe, lecz nieznanne.
2. Krotność powtórzenia kalibracji. Zaleca się 2÷4-krotne przejście wszystkich punktów kalibracji od początku do końca zakresu pomiarowego i z powrotem.

3. Lokalizacja punktów kalibracji wyrażona miarami mierzonej wielkości, która może być:

- równomierna, jej zaletą jest dobre pokrycie dziedziny dla wykrycia błędów nieliniowości lub ogólnie błędów systematycznych, natomiast wadą jest zmienność przedziału ufności estymowanej charakterystyki,
- nierównomierna, np. według planu G -optymalnego, dająca stałą wartość przedziału ufności wzdłuż zakresu pomiarowego.

Optymalne wartości współczynników równania przetwarzania wyznacza się metodą regresji. Procedurę ich estymacji ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Procedura estymacji współczynników równania przetwarzania [6]
Fig. 4. Procedure of estimating the coefficients for the processing equation [6]

Estymatory współczynników równania (5) oblicza się ze wzorów:

$$\hat{p}_{k(s=0)} = p_{k(s=0)_{\text{sr}}} - \hat{K}s_{\text{sr}} \quad (6)$$

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - s_{\text{sr}})(p_{k_i \text{sr}} - p_{k \text{sr}})}{\sum_{i=1}^N (s_i - s_{\text{sr}})^2} \quad (7)$$

$$s_{\text{sr}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i ; p_{k \text{sr}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{k_i} \quad (8)$$

Estymator wariancji błędów $\hat{\sigma}_\eta^2$ obliczamy ze wzoru:

$$\hat{\sigma}_\eta^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (p_{k_i \text{sr}} - \hat{p}_{k_i})^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (p_{k_i \text{sr}} - p_{k(s=0)} - \hat{K}s_i)^2 \quad (9)$$

Wariancje estymatorów wynoszą:

$$\text{var}\{\hat{p}_{k(s=0)}\} = \frac{1}{N} \sigma_\eta^2 \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - s_{\text{sr}})^2} \quad (10)$$

$$\text{var}\{\hat{K}\} = \frac{\sigma_\eta^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - s_{\text{sr}})^2} \quad (11)$$

Estymowane równanie przetwarzania ma postać:

$$\hat{p}_k = \hat{p}_{k(s=0)} + \hat{K}s = p_{k \text{ sr}} + \hat{K}(s - s_{\text{sr}}) \quad (12)$$

Charakterystykę wzorcowania opisuje następujący wzór:

$$\hat{s}^* = c_0 + c_1 \hat{p}_k = c_0 + c_1 (\hat{p}_{k(s=0)} + \hat{K}s) \quad (13)$$

gdzie:

$$c_0 = -\frac{\hat{p}_{k(s=0)}}{\hat{K}}; \quad c_1 = \frac{1}{\hat{K}} \quad (14)$$

Po doprowadzeniu na wejście przetwornika wielkości mierzonej s o nieznaną wartość s_0 na wyjściu otrzymamy wskazanie:

$$s_0^* = c_0 + c_1 p_k(s_0) = c_0 + c_1 (p_{k0} + Ks_0 + \eta_0) \quad (15)$$

Miarą niedokładności wyniku jest wariancja, którą można wyznaczyć za pomocą następującego wzoru:

$$\begin{aligned} \text{var}\{s_0^*\} &= \frac{1}{\hat{K}^2} \left[\text{var}\{p_{k \text{ sr}}\} + (s_0 - s_{\text{sr}})^2 \text{var}\{\hat{K}\} + \text{var}\{\eta_0\} \right] = \\ &= \frac{\hat{\sigma}_\eta^2}{\hat{K}^2} \left[\frac{1}{N} + \frac{(s_0 - s_{\text{sr}})^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - s_{\text{sr}})^2} + 1 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Znaczenie poszczególnych składników wyrażenia (16) jest następujące: pierwszy składnik charakteryzuje błąd w punkcie skupienia charakterystyki. Wartość drugiego

składnika zależy od oddalenia punktu s od punktu skupienia s_{sr} w proporcji $(s - s_{sr})^2$. W miarę oddalania się od tego punktu wariancja błędu wartości prognozowanej zwiększa się z szybkością zależną od lokalizacji punktów wzorcowania. Trzeci składnik stanowi błąd wnoszony przez przyrząd przy pomiarze s_0 [6],[7].

Stąd ostateczny wynik pomiaru ma postać:

$$s_0^* - t \frac{\hat{\sigma}_\eta}{\hat{K}} \sqrt{\frac{N+1}{N} + \frac{(s_0 - s_{sr})^2}{N\sigma_s^2}} \leq s_0 \leq s_0^* + t \frac{\hat{\sigma}_\eta}{\hat{K}} \sqrt{\frac{N+1}{N} + \frac{(s_0 - s_{sr})^2}{N\sigma_s^2}} \quad (17)$$

gdzie: t jest kwantylem rozkładu t Studenta, a wariancję σ_s^2 obliczono ze wzoru:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - s_{sr})^2 \quad (18)$$

Przy M -krotnym pomiarze tej samej wartości s_0 , proces $\{\eta_0\}$ ma M realizacji i wariancję oblicza się ze wzoru:

$$\text{var}\{s_M^*\} = \frac{\hat{\sigma}_\eta^2}{\hat{K}^2} \left\{ \frac{1}{N} \left[1 + \frac{(s_0 - s_{sr})^2}{\sigma_s^2} + \frac{1}{M} \right] \right\} \quad (19)$$

5. STANOWISKO DO WYZNACZANIA DOŚWIADCZALNYCH CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH

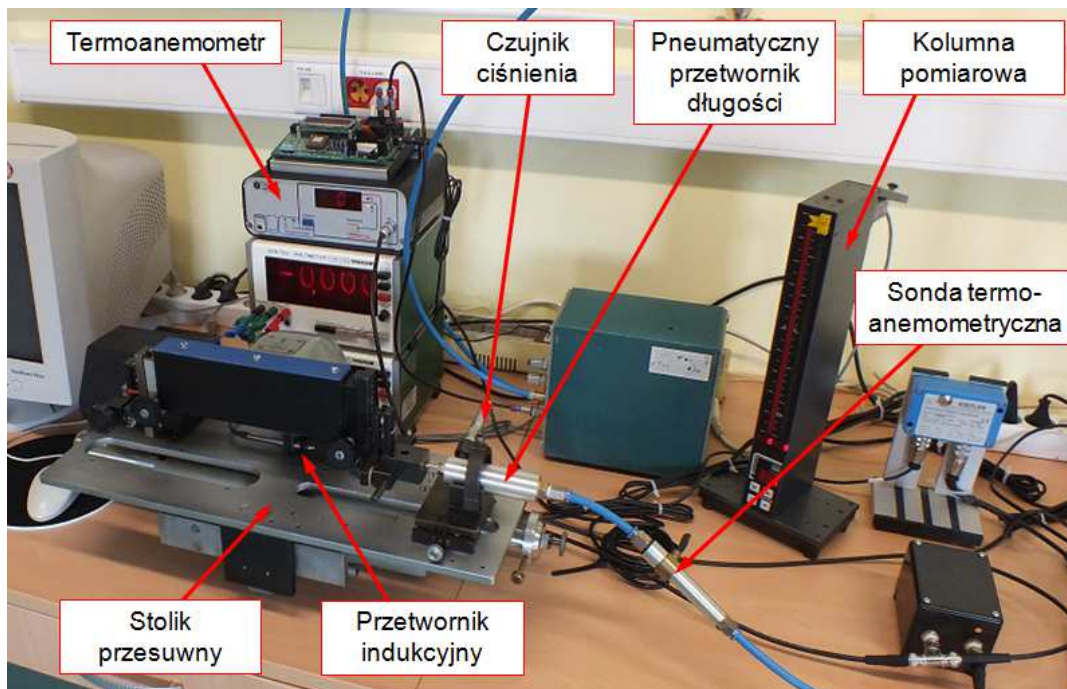
Charakterystyki statyczne przetwornika pneumatycznego zostały wyznaczone na specjalnym stanowisku badawczym [7]. Rysunek 5 przedstawia stanowisko składające się z następujących elementów: fizycznego modelu pneumatycznego przetwornika długości, piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia Kistler 4043 A5, współpracującego ze wzmacniaczem Kistler 4801 A.

Zmianę szerokości szczeliny zapewniał przesuwany stół, sterowany z komputera. Ponadto stanowisko wyposażone było w kolumnę pomiarową Tesa T500, współpracującą z przetwornikiem GT21HP do pomiaru przemieszczenia stołu, dla którego błąd graniczny wynosił $U_{0,95} = \pm 0,17 \mu\text{m}$.

Za pomocą sondy termoanemometrycznej, mierzącej prędkość przepływu w przewodzie doprowadzającym powietrze do przetwornika i współpracującej z termoanemometrem PAT 88 – prod. Instytutu Górotworu PAN w Krakowie, zainstalowanej na przewodzie zasilającym przetwornik, sprawdzano dokładność przylegania czoła dyszy pomiarowej z powierzchnią przesłony dla szczeliny $s = 0 \mu\text{m}$.

Charakterystyki statyczne i parametry metrologiczne przetworników wyznaczono na podstawie zbioru wartości szerokości szczeliny i ciśnienia pomiarowego. W tym celu

zastosowano oprogramowanie *StanBad*, opracowane w Zakładzie Metrologii Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Do obliczania parametrów metrologicznych oraz graficznej prezentacji wyników obliczeń wykorzystano program *LinStat*.



Rys. 5. Stanowisko do wyznaczania charakterystyki statycznej pneumatycznego przetwornika długości
Fig. 5. Apparatus for static characteristics of air gauges

6. ANALIZA WYNIKÓW

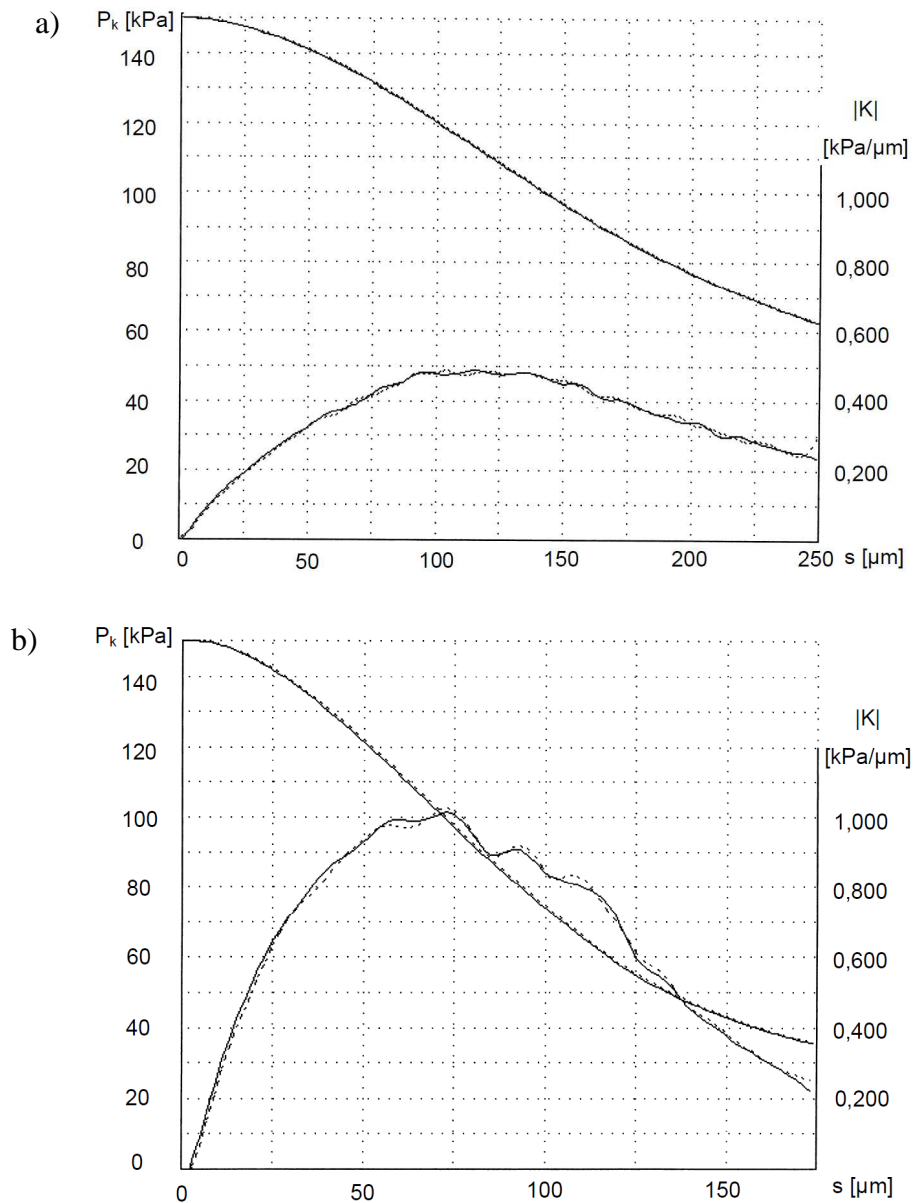
Procedurę wzorcowania wykonano przy następujących założeniach [5]:

- wartość oczekiwana η jest równa zero ($E\{\eta\} = 0$),
- wariancja η jest stała i nie zależy od s ($\text{var}\{\eta\} = \sigma_\eta^2$),
- rozkład prawdopodobieństwa błędów jest normalny ($p(\eta) = N(0, \sigma_\eta^2)$),
- błędy η są nieskorelowane z wielkością mierzoną s ($\text{cov}\{\eta, s\} = 0$),
- błędy wzorców są pomijalnie małe.

W badaniach zastosowano następujące zestawy dysz:

- zestaw nr 1 – $d_p = 1,208\text{mm}$; $d_w = 0,830\text{mm}$, $D_c = 1,5$ o parametrach: zakres pomiarowy $z_p = 107\mu\text{m}$, czułość $|K| = 0,459\text{kPa}/\mu\text{m}$, wyznaczonych dla błędu nieliniowości $\delta_1 = 1,5\%$,
- zestaw nr 2 – $d_p = 1,810\text{mm}$; $d_w = 0,720\text{mm}$, $D_c = 1,5$ o parametrach: zakres pomiarowy $z_p = 65\mu\text{m}$, czułość $|K| = 0,951\text{kPa}/\mu\text{m}$, wyznaczonych dla błędu nieliniowości $\delta_1 = 1,5\%$.

Na rysunku 6 przedstawiono uzyskane charakterystyki statyczne $p_k = f(s)$ i charakterystyki czułości $K = g(s)$.



Rys. 6. Charakterystyka statyczna $p_k = f(s)$ oraz charakterystyka czułości $K = g(s)$:
 a) $d_p = 1,208\text{mm}$, $d_w = 0,830\text{mm}$, $D_c = 1,5$; b) $d_p = 1,810\text{mm}$, $d_w = 0,720\text{mm}$, $D_c = 1,5$

Fig. 6. Static characteristic $p_k = f(s)$ and sensitivity $K = g(s)$:

a) $d_p = 1.208\text{mm}$, $d_w = 0.830\text{mm}$, $D_c = 1.5$; b) $d_p = 1.810\text{mm}$, $d_w = 0.720\text{mm}$, $D_c = 1.5$

Zastosowane w badania przetworniki umożliwiły uzyskanie granicznych wartości parametrów metrologicznych, stosowanych w pneumatycznych przyrządach pomiarowych. Pomiary wykonano w warunkach odniesienia. Przyjęto odpowiednio 16 i 12 równomiernie ułożonych punktów wzorcowania. Wykonano po $N = 15$ powtórzeń dla każdego punktu liniowej części charakterystyki.

Wartości średnie współrzędnych charakterystyki przetworników s_i , $p_{k\ \acute{s}r}$ zamieszczono w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Współrzędne punktów charakterystyki statycznej dla zestawu dysz nr 1
Table 1. Coordinates of the static characteristic for a set of nozzles No. 1

s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]
74	132,320	98	121,780	122	110,500	144	99,340
80	129,900	104	118,940	128	107,660	150	96,667
86	127,340	110	116,127	134	104,860	156	93,993
92	124,640	116	113,313	140	102,073	162	91,373

Tabela 2. Współrzędne punktów charakterystyki statycznej dla zestawu dysz nr 2
Table 2. Coordinates of the static characteristic for a set of nozzles No. 2

s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]	s_i [μm]	$p_{k\ \acute{s}r}$ [kPa]
40	130,360	58	113,707	76	95,760	94	79,173
46	120,107	64	107,780	82	90,020	100	73,993
52	119,520	70	101,787	88	84,613	106	69,033

Na podstawie wzoru (6) i (7) wyznaczono estymatory współczynników równania (5) i utrwalono procedurę wzorcowania.

Przy M -krotnym pomiarze tej samej wartości s_0 procesu $\{\eta_0\}$ przyjęto dwa warianty $M = 1$ oraz $M = 15$.

Niepewność wzorcowanego systemu została wyznaczona jako wielokrotność przedziału ufności błędów $\Delta = s^* - s$.

Ostatecznie modele przetwarzania statycznego mają w zakresie liniowym następującą postać:

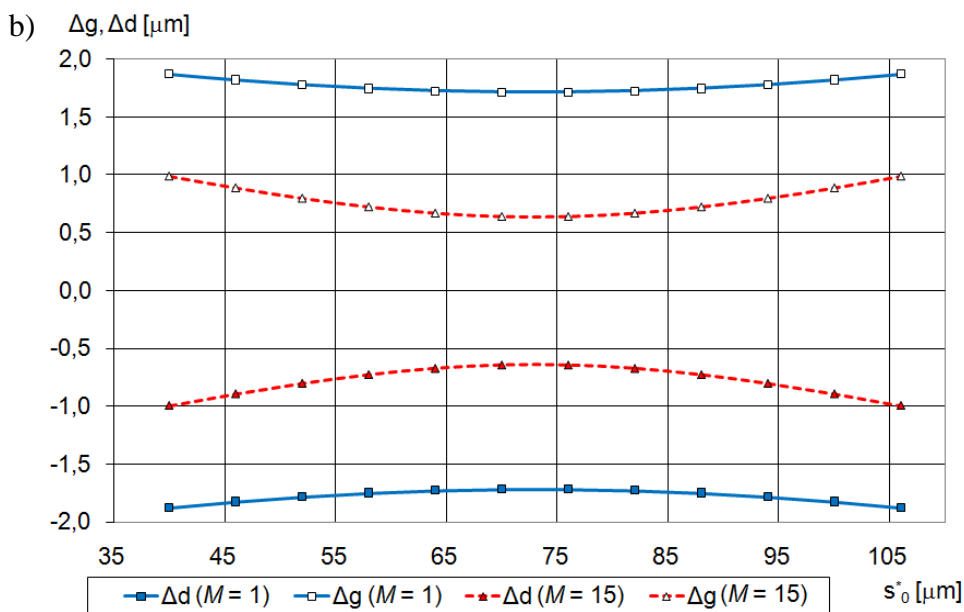
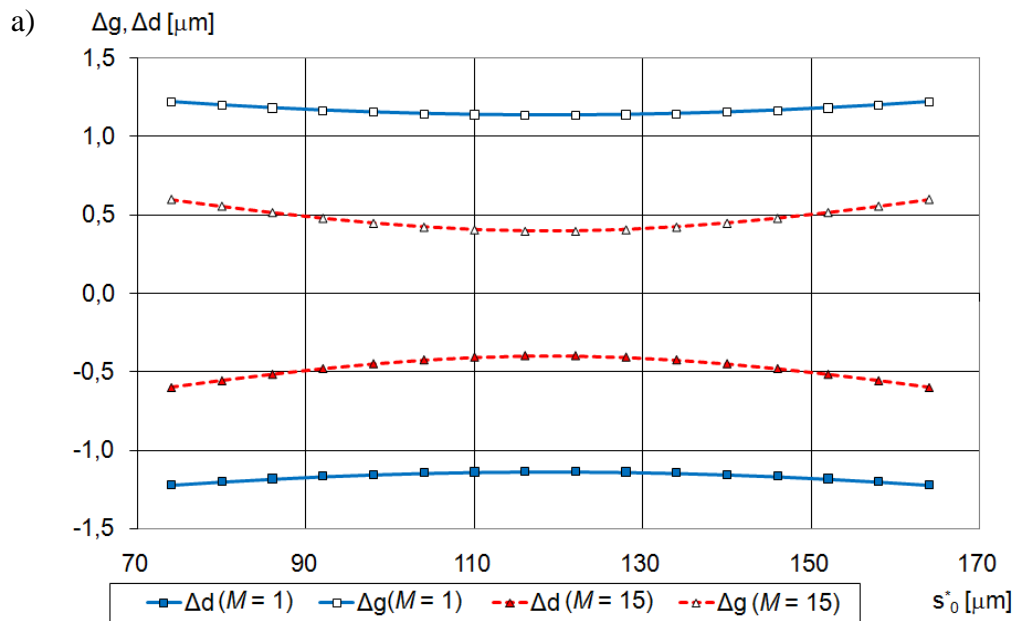
- zestaw nr 1: $p_k = [-0,4614(\pm 0,015)s + 166,84(\pm 0,19)] \pm 0,17$ [kPa],
- zestaw nr 2: $p_k = [-0,9451(\pm 0,072)s + 168,23(\pm 0,55)] \pm 0,52$ [kPa].

Wartości graniczne pomiaru szczeliny (graniczne wartości przedziałów) [10] są równe:

- zestaw nr 1: $\Delta g = +1,2\mu\text{m}$, $\Delta d = -1,2\mu\text{m}$ dla $M = 1$ i $\Delta g = +0,6\mu\text{m}$, $\Delta d = -0,6\mu\text{m}$ dla $M = 15$,
- zestaw nr 2: $\Delta g = +1,9\mu\text{m}$, $\Delta d = -1,9\mu\text{m}$ dla $M = 1$ i $\Delta g = +1,0\mu\text{m}$, $\Delta d = -1,0\mu\text{m}$ dla $M = 15$.

Przebiegi zmian błędów Δg i Δd wartości przewidywanej dla przetwornika z zestawem dysz nr 1 przedstawiono na rysunku 7a, natomiast z zestawem nr 2 przedstawiono na rysunku 7b.

Można zauważyć, że wartości graniczne są zależne od przyjętych parametrów przetwornika i od liczby powtórzeń. Należy zwrócić uwagę, że w przyjętych warunkach badań zwiększenie liczby powtórzeń stanowi skuteczną metodę zmniejszenia niepewności pomiaru długości.



Rys. 7. Wykresy błędów wskazania przetwornika z zestawem dysz: a) $d_p = 1,208\text{mm}$, $d_w = 0,830\text{mm}$, $D_c = 1,5$;

b) $d_p = 1,810\text{mm}$, $d_w = 0,720\text{mm}$, $D_c = 1,5$

Fig. 7. Errors of indications for sensor with a set of nozzles: a) $d_p = 1.208\text{mm}$, $d_w = 0.830\text{mm}$, $D_c = 1.5$;

b) $d_p = 1.810\text{mm}$, $d_w = 0.720\text{mm}$, $D_c = 1.5$

7. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników można sformułować następujące wnioski:

- błędy graniczne Δg i Δd pomiaru szerokości szczeliny zależą od parametrów stosowanego przetwornika,
- dla przyjętych przetworników z wybranymi zestawami dysz mniejsze wartości błędów granicznych Δd i Δg uzyskano dla zestawu nr 1 o następujących parametrach: $d_p = 1,208\text{mm}$; $d_w = 0,830\text{mm}$, $D_c = 1,5$,
- zwiększenie liczby powtórzeń wpływa na zmniejszenie niepewności pomiaru długości za pomocą przetwornika pneumatycznego,
- w pneumatycznych pomiarach długości należy wziąć pod uwagę zmiany wartości błędów granicznych w zależności od parametrów metrologicznych: zakresu pomiarowego z_p i czułości $|K|$ przetwornika.

LITERATURA

- [1] TANNER C. J., 1958, *Air gauging – history and future developments*, Institution of Production Engineers Journal, 37/7, 448-462.
- [2] BREITINGER R., 1969, *Fehlerquellen beim pneumatischen Langenmessen*, Stuttgart, Dissertation, TU Stuttgart.
- [3] LOTZE W., 1968, *Kritische Einschätzung und Beiträge zur Entwicklung der Pneumatischen Langenmesstechnik*, Dresden, Habilitation, TU Dresden.
- [4] BALAKSIN O. B., 1964, *Avtomatizacia pnevmaticheskogo kontrola razmerov v masinostroenii*, Moskva, Masinostroenie.
- [5] RUCKI M., 2011, *Właściwości dynamiczne wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych o zmniejszonych komorach pomiarowych*, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 459.
- [6] PIOTROWSKI J., KOSTYRKO K., 2000, *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*, Warszawa, Wyd. Naukowe PWN.
- [7] JERMAK CZ. J., 2012, *Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości*, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 476.
- [8] JAKUBOWICZ M., 2012, *Zastosowanie pneumatycznych przetworników długości do pomiarów wielkości geometrycznych*, Inżynieria Wytwarzania, pod. red. M. Dudziak, A Kołodziej; Kalisz, Wyd. PWSZ Kalisz, 81-86.
- [9] Przewodnik ISO/IEC nr 25, 1990, *Wymagania ogólne dotyczące kompetencji laboratoriów pomiarowych i badawczych*.
- [10] ARENDARSKI J., 2006, *Niepewność pomiarów*, Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej.

MEASUREMENT UNCERTAINTY OF AIR GAUGES FOR LENGTH MEASUREMENT

This paper discusses some aspects of measurement uncertainty analysis in air gauges for measurement of length. Investigations was conducted on selected transducers with different sets of nozzles. Adopted combinations of nozzles enabled estimation of metrological parameters used in measuring instruments in conditions corresponding to those applied in industrial applications. The slot size was determined by the measurement system equipped with the air gauge equipped with pressure transducer. In order to evaluate the measurement uncertainty calibration procedure using the estimation of coefficients for static characteristics were applied. The results were statistically analyzed and the range in which there is a correct value of the measured slot size s was determined.