

Badania parametrów metrologicznych czujników pneumatycznych

Verification tests of the air gauges metrological characteristics

JANUSZ DEREŻYŃSKI
MICHAŁ JAKUBOWICZ*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.3.20

Omówiono stanowisko badawcze zbudowane na potrzeby wyznaczenia właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości. Stanowisko umożliwia otrzymanie charakterystyk statycznej i przepływowej dla różnych przetworników. Poza jego szczegółowym opisem w artykule podano algorytm przetwarzania danych pomiarowych i zamieszczono przykładowe wyniki badań. **SŁOWA KLUCZOWE:** pneumatyczny przetwornik długości, pomiary długości, parametry metrologiczne

Described in this article is a testing stand designed for verification of readings of the length measuring transducers in air gauges. Provision is made in the stand to plot characteristic curves for both flow and standstill performance of different transducer models. Apart from detailed description of the test stand, the data processing algorithm, and exemplary test results are contained in the article.

KEYWORDS: air gauge, dimensional measurement, metrological characteristics

Wśród wielu metod bezstykowych pomiarów wielkości geometrycznych istotną grupę stanowią metody wykorzystujące pneumatyczne przetworniki długości – PPD [3,4,7,9,10]. Ich szerokie możliwości zastosowania oraz dostępność technicznych środków realizacji pomiarów z użyciem takich przetworników skłaniają do podjęcia badań nad poprawą ich parametrów metrologicznych. W tym celu zaprojektowano i wykonano specjalne stanowisko badawcze, które pozwala na wyznaczenie charakterystyk statycznej $p_k = f(s)$ i przepływowej $q_v = f(s)$ przetworników pneumatycznych (gdzie: p_k – ciśnienie pomiarowe, q_v – przepływ objętościowy, s – wielkość szczeliny pomiarowej). Pomiary na tym stanowisku są realizowane w cyklu automatycznym. Możliwe jest zbadanie wielu typów przetworników wykorzystujących różne konfiguracje dysz pomiarowych i wlotowych oraz komór pomiarowych. Stanowisko o podobnym przeznaczeniu było już omawiane w literaturze [2, 5÷7].

Podczas opracowywania konstrukcji nowego systemu skoncentrowano się na tym, aby zapewnić automatyczne rejestrowanie parametrów metrologicznych badanych przetworników oraz możliwość pomiaru temperatury w komorze pomiarowej i na dolocie sprężonego powietrza. Wyniki pomiarów uzyskane na omawianym stanowisku mogą być wykorzystane do optymalizacji konstrukcji czujników pneumatycznych z uwzględnieniem ich parametrów metrologicznych.

Budowa i zasada działania czujnika pneumatycznego

Pneumatyczny przetwornik długości to narzędzie pomiarowe składające się z dyszy wlotowej połączonej komorą pomiarową z dyszą pomiarową [3, 4, 7, 9, 10]. Zmiana odległości pomiędzy powierzchnią mierzoną (przesłoną) a powierzchnią czoła dyszy pomiarowej powoduje zmianę

parametrów powietrza przepływającego przez przetwornik. Zmiana jest rejestrowana przez odpowiedni czujnik, a następnie przekształcana według określonej procedury i z określoną dokładnością [4, 7, 10].

Najszerze zastosowanie w przemysłowych układach pomiarowych znalazły przetworniki ciśnieniowe, które do pomiarów długości wykorzystują zależność zmiany ciśnienia pomiarowego p_k [4, 7, 10]. Jego wartość jest mierzona w komorze pomiarowej i zmienia się w funkcji wielkości szczeliny pomiarowej s . Przebieg tej funkcji ściśle zależy od geometrii oraz oprofilowania dysz wlotowej i pomiarowej [5,7,9,10]. Zazwyczaj te dysze mają otwory o przekroju kołowym i średnicach odpowiednio d_w i d_k .

Pneumatyczne przetworniki długości powinny być zasilane uzdatnionym powietrzem – o ciśnieniu $p_z \geq 150$ kPa nadciśnienia [7, 10] – spełniającym warunki oczyszczenia według drugiej klasy jakości stanu powietrza technicznego.

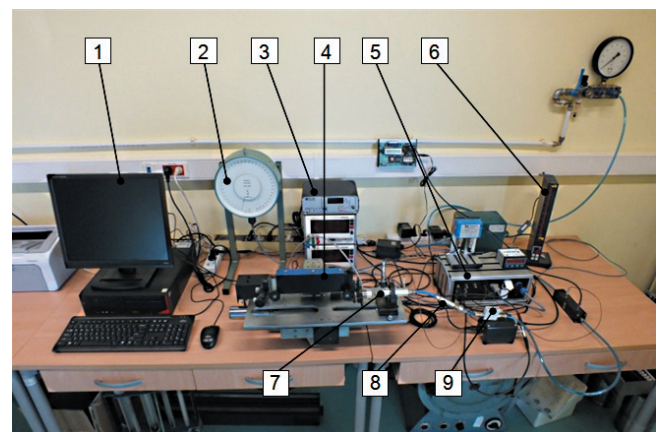
Stanowisko badawcze – struktura systemu

Oprócz automatycznej rejestracji parametrów metrologicznych pneumatycznych przetworników długości konstruktorzy stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 1 postanowili również zapewnić możliwość szybkiej zmiany badanego przetwornika poprzez wymianę takich elementów, jak dysze wlotowa i pomiarowa oraz komora pomiarowa.

W strukturze systemu zastosowano powszechnie dostępne komponenty, aby ułatwić prace serwisowe. Całym systemem steruje komputer klasy PC.

Omawiany system pomiarowy składa się z:

- zespołu mechaniki,
- zespołu pneumatyki,
- zespołu elektroniki,
- komputera PC ze specjalnym oprogramowaniem.



Rys. 1. Widok stanowiska do wyznaczania parametrów metrologicznych pneumatycznych przetworników długości: 1 – komputer PC, 2 – manometr, 3 – termooanemometr, 4 – stół przesuwny, 5 – zespół sterujący, 6 – kolumna pomiarowa, 7 – PPD, 8 – sonda termooanemometryczna, 9 – przepływomierz

* Mgr inż. Janusz Dereżyński (j.derezynski@gmail.com), mgr inż. Michał Jakubowicz (michal.jakubowicz@put.poznan.pl) – Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej

Algorytm przetwarzania danych

System pomiarowy zbiera takie dane, jak: zmiana ciśnienia w komorze pomiarowej p_k , przepływ objętościowy q_v oraz zmiana temperatury w komorze pomiarowej t_{1p} i dolotowej t_{2p} . Te parametry są rejestrowane w funkcji zmiany szczeliny pomiarowej s – od 0 do wartości maksymalnej z zdefiniowanej przez użytkownika. Zarejestrowane dane można przedstawić w postaci funkcji opisanej wzorami (1) i (2):

$$\left. \begin{aligned} p_{k \rightarrow} &= f(s) \\ q_{v \rightarrow} &= f(s) \\ t_{1p \rightarrow} &= f(s) \\ t_{2p \rightarrow} &= f(s) \end{aligned} \right\} s \in \langle 0, z \rangle \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{k \leftarrow} &= f(s) \\ q_{v \leftarrow} &= f(s) \\ t_{1p \leftarrow} &= f(s) \\ t_{2p \leftarrow} &= f(s) \end{aligned} \right\} s \in \langle z, 0 \rangle \quad (2)$$

Pierwsza funkcja przedstawia wyniki pomiarów w chwili zwiększania, a druga – w momencie zmniejszania szczeliny s . Szczelina zmienia się z rozdzielczością 0,2 lub 0,3 μm i w typowym przypadku maksymalnie osiąga 250÷300 μm .

Zebrałe dane są zaszumione i – by wydobyć z nich istotne (z metrologicznego punktu widzenia) informacje – należy je „oczyścić” za pomocą odpowiednich funkcji matematycznych. Analiza danych pomiarowych obejmuje:

- wygładzanie danych,
- ich interpolację,
- obliczenie przebiegu zmian czułości,
- linearyzację przebiegu $p_k = f(s)$.

Poszczególne etapy tej analizy są realizowane równolegle dla obu zarejestrowanych przebiegów. Wyniki mogą być prezentowane dla przebiegu uśrednionego lub obu przebiegów równocześnie (co pozwala na analizę błędów histerezy).

Wygładzanie danych

Zarejestrowane zmiany ciśnienia należy poddać operacji wygładzania w celu wyeliminowania przypadkowych błędów. Ponadto wygładzanie danych umożliwi ich wykorzystanie w operacjach numerycznych, takich jak: interpolacja, całkowanie czy różniczkowanie.

Wyróżnia się kilka metod wygładzania [8]:

- graficzne,
- numeryczne;
- sumacyjne;
- oparte na rachunku najmniejszych kwadratów,
- oparte na teorii prawdopodobieństwa.

Do wygładzania zarejestrowanych danych wykorzystano metodę opartą na rachunku najmniejszych kwadratów. Polega ona na dopasowaniu wielomianu stopnia j (4), na podstawie $2n + 1$ kolejnych wartości zmiennej pierwotnej (3), tak aby suma kwadratów (5) odchyłań wartości obliczonych $y(x_i)$ od wartości pierwotnych y_i osiągnęła wartość minimalną [8]:

$$y_{i-n}, y_{i-n+1}, \dots, y_i, \dots, y_{i+n-1}, \dots, y_{i+n} \quad (3)$$

$$y(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_jx^j \quad (4)$$

$$\sum_{k=-n}^n [y_{i+k} - y(x_{i+k})]^2 = \min \quad (5)$$

Tak obliczone wartości $y(x_i)$ przyjęto za wygładzone wartości zmiennej $y'_i = y(x_i)$.

Do wygładzania danych pomiarowych użyto wielomianów: drugiego stopnia, wykorzystującego siedem punktów (6), oraz trzeciego stopnia, wykorzystującego dziewięć punktów pomiarowych (7):

$$y_{i(2,7)}(x) = \frac{1}{21}(-2y_{i-3} + 3y_{i-2} + 6y_{i-1} + 7y_i + 6y_{i+1} + 3y_{i+2} - 2y_{i-3}) \quad (6)$$

$$y_{i(3,9)}(x) = \frac{1}{231}(-21y_{i-4} + 14y_{i-3} + 39y_{i-2} + 54y_{i-1} + 59y_i + 54y_{i+1} + 39y_{i+2} + 14y_{i+3} - 21y_{i+4}) \quad (7)$$

Warto zauważyć, że im wyższy jest stopień wielomianu i im więcej punktów wykorzystuje się do wygładzania, tym mniejszy jest stopień wygładzenia. Procedurę można wielokrotnie powtarzać dla tych samych danych. Krotność wykorzystania algorytmu wygładzającego dobrano empirycznie na podstawie analizy szeregu obliczeń.

Interpolacja

W celu równomiernego rozłożenia danych pomiarowych przeprowadzono interpolację wyników pomiaru zgodnie z zależnością:

$$L(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (8)$$

W praktyce często wykorzystuje się interpolację kwadratową Bessela, która pozwala na wierniejsze odwzorowanie przebiegu funkcji. Algorytm tej interpolacji opisują równania [1]:

$$f(x) = f(x_0) + k\Delta_0 - k_1(\Delta_1 - \Delta_{-1}) \quad (9)$$

$$k = \frac{x - x_0}{h}, \quad k_1 = \frac{k(1-k)}{4} \quad (10)$$

$$\Delta_{-1} = y_0 - y_{-1}, \quad \Delta_0 = y_1 - y_0, \quad \Delta_1 = y_2 - y_1 \quad (11)$$

Ostatecznie zastosowano interpolację liniową (8), która okazała się wystarczającą.

Obliczenie przebiegu zmian czułości

Poza charakterystyką statyczną przydatna w ocenie liniowości okazuje się charakterystyka czułości $|K| = f(s)$. Prosta linearyzująca rozpatrywany fragment charakterystyki statycznej jest nachylona pod kątem, którego tangens określa czułość K przetwornika. Lokalna czułość jest definiowana zgodnie z zależnością:

$$K(s) = \frac{df(s)}{ds} \approx \frac{\Delta p_k}{\Delta s} \Big|_{s \in (s, s+\Delta s)} \quad (12)$$

W konkretnym systemie zbiór danych ma charakter dyskretny, a czułość wyznacza się jako różnicę pomiędzy daną $(n+1)$ i n :

$$K_n = f(n+1) - f(n) \Big|_{n \in (0, z)} \quad (13)$$

Linearyzacja

Charakterystyki statyczne przetworników pneumatycznych są nieliniowe, zatem przy konstruowaniu głowic pneumatycznych należy dążyć do wykorzystania fragmentu charakterystyki w zakresie liniowym, wyznaczonym z określonym błędem linearyzacji.

Linearyzacja polega na wyznaczeniu prostej opisanej równaniem $y = ax + b$ (gdzie a określa czułość funkcji przetwarzania), która z określonym błędem nieliniowości odwzorowuje wybrany fragment charakterystyki statycznej:

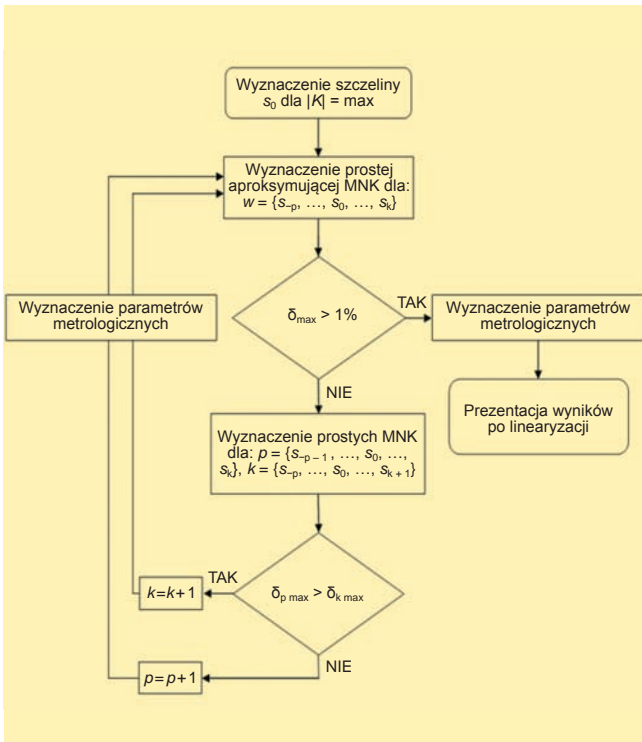
$$\delta_{\max} = \frac{|\Delta s_i|_{\max}}{s_{\max} - s_{\min}} \cdot 100\% \quad (14)$$

W badaniach nad pneumatycznymi przetwornikami długości akceptowalny błąd nieliniowości $\delta_1 \approx 1\%$.

Dzięki wyznaczeniu prostej aproksymującej można określić takie parametry metrologiczne pneumatycznych przetworników długości, jak:

- czułość K ,
- zakres pomiarowy Z_p ,
- współrzędna początku zakresu pomiarowego s_p ,
- współrzędna końca zakresu pomiarowego s_k ,
- ciśnienie odpowiadające wartości początkowej zakresu pomiarowego,
- ciśnienie odpowiadające wartości końcowej zakresu pomiarowego,
- ciśnienie odpowiadające wartości środkowej zakresu pomiarowego.

Prostą aproksymującą oraz parametry metrologiczne przetwornika wyznacza się według algorytmu przedstawionego na rys. 2.

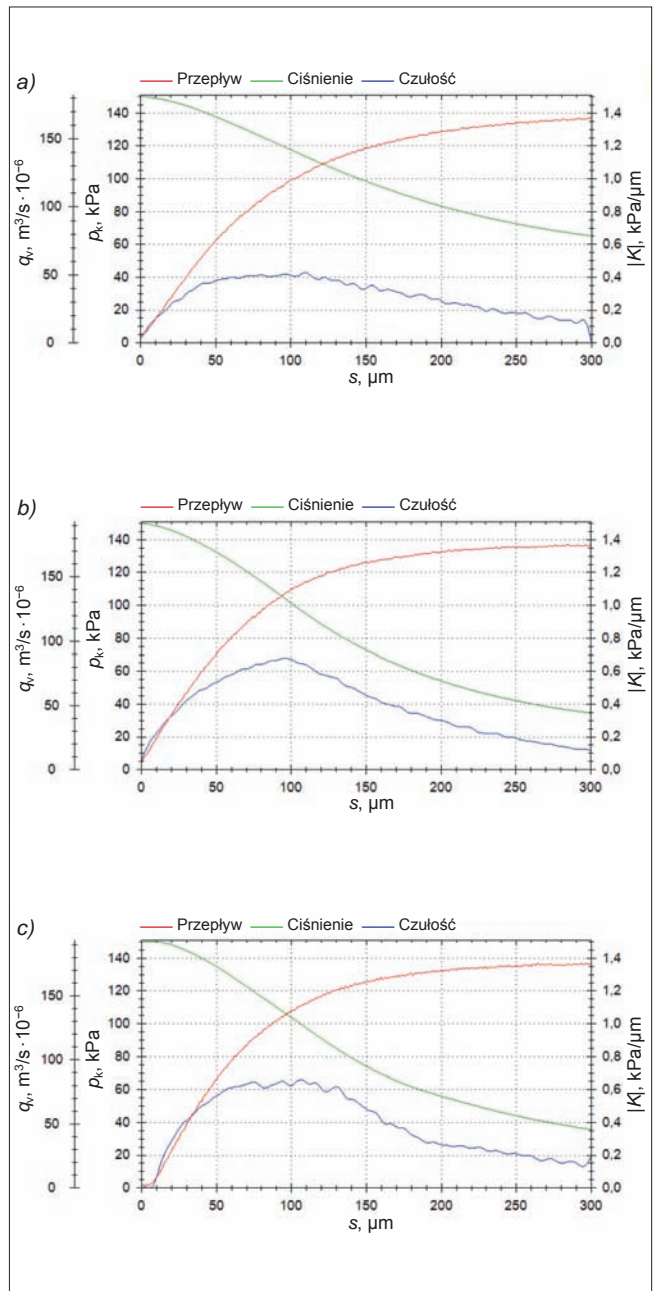


Rys. 2. Algorytm linearyzacji charakterystyk statycznych pneumatycznego przetwornika długości

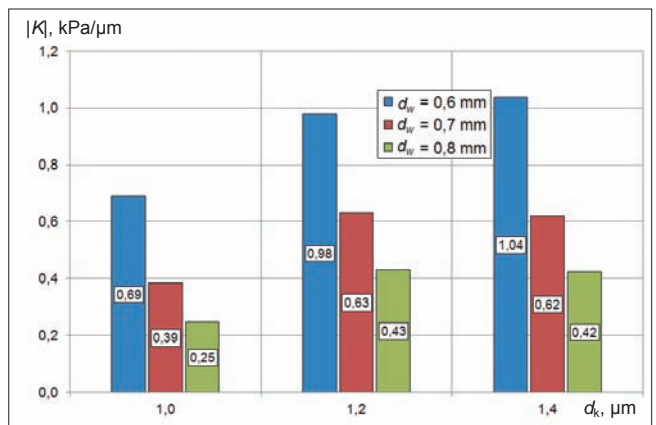
Wyniki badań

W badaniach zastosowano przetwornik z walcową komorą pomiarową o długości 90 mm i średnicy $\varnothing 10$ mm. Zmianę parametrów uzyskiwano za pomocą wymiennych dysz wlotowych o średnicach $d_w = 0,6; 0,7; 0,8$ mm oraz dysz pomiarowych o średnicach $d_k = 1,0; 1,2; 1,4$ mm. Przyjęta kombinacja dysz pozwoliła na jakościową i ilościową analizę wpływu wymiarów dysz pomiarowej i wlotowej na wartości parametrów metrologicznych czujników pneumatycznych. Przykładowe wykresy prezentujące wyznaczone charakterystyki statyczne, czułości i przepływowo przedstawiono na rys. 3.

Zmianę modułu czułości $|K|$ w funkcji średnicy dyszy pomiarowej d_k przy różnych wartościach średnicy dyszy wlotowej d_w pokazano na rys. 4. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy pomiarowej rośnie wartość modułu czułości, natomiast w przypadku zwiększenia średnicy dyszy wlotowej bez zmiany średnicy dyszy pomiarowej moduł czułości zdecydowanie się zmniejsza. Dla dyszy pomiarowej o średnicy $d_k = 1,4$ mm moduł czułości maleje o 0,62 kPa/ μm , gdy średnicę dyszy d_w zwiększy się z 0,6 mm do 0,8 mm. Tę tendencję można zauważyć dla wszystkich rozpatrywanych kombinacji dysz wlotowych i pomiarowych. Okazuje się, że dla $d_w = 0,6$ mm uzyskuje się czułość zdecydowanie wyższą



Rys. 3. Charakterystyki pneumatycznego przetwornika długości – statyczna $p_k = f(s)$, czułości $|K| = f(s)$ i przepływowo $q_v = f(s)$: a) $d_k = 1$ mm, $d_w = 0,7$ mm; b) $d_k = 1,2$ mm, $d_w = 0,7$ mm; c) $d_k = 1,4$ mm, $d_w = 0,7$ mm



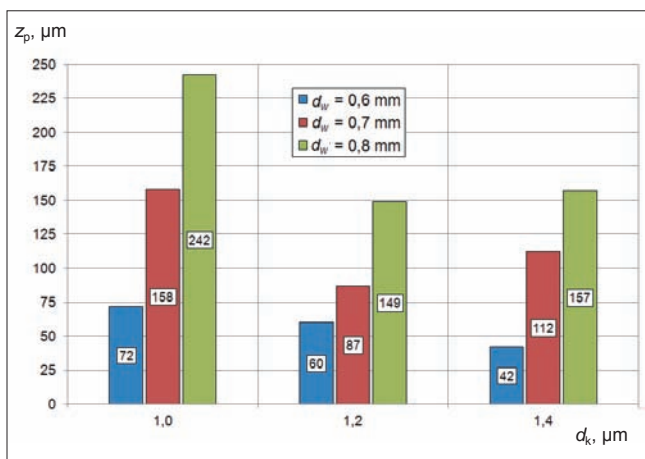
Rys. 4. Zestawienie porównawcze wartości modułu czułości $|K|$ pneumatycznego przetwornika długości dla różnych zestawów dysz pomiarowych i wlotowych

niż w pozostałych przypadkach – na tyle wysoką, że przetworniki o takiej geometrii dyszy wlotowej można wykorzystać do pomiarów, w których wymagana jest rozdzielczość poniżej 0,1 μm .

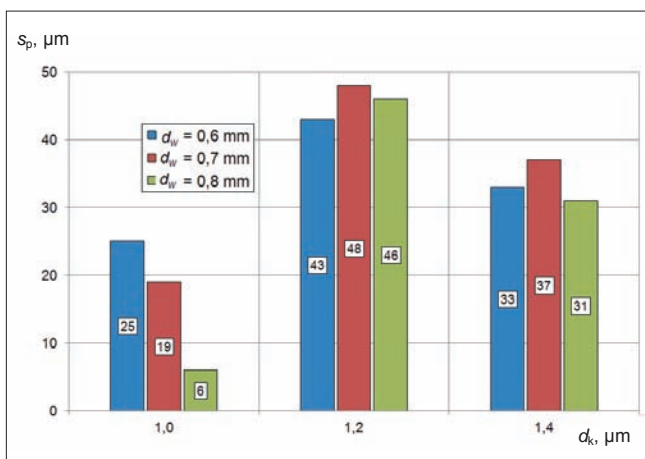
Wartość zakresu pomiarowego z_p zmienia się odwrotnie do czułości: maleje wraz ze wzrostem średnicy dyszy pomiarowej (rys. 5). Gdy natomiast analizuje się wpływ zmiany średnicy dyszy wlotowej d_w (przy stałej średnicy dyszy pomiarowej d_k) wyraźnie widać, że wraz z jej wzrostem zwiększa się wartość zakresu pomiarowego. Z kolei przy stałej średnicy dyszy pomiarowej $d_k = 1\text{ mm}$ zwiększenie średnicy dyszy wlotowej d_w o 0,2 mm powoduje wzrost zakresu pomiarowego o 336%.

Sposób, w jaki zmieniają się wartości modułu czułości i zakresu pomiarowego w zależności od średnicy dyszy wlotowej, jest zgodny z opisanym w literaturze [5, 7] – zwiększeniu średnicy dyszy wlotowej towarzyszy spadek czułości i rozszerzenie zakresu pomiarowego niezależnie od rodzaju zastosowanej dyszy pomiarowej.

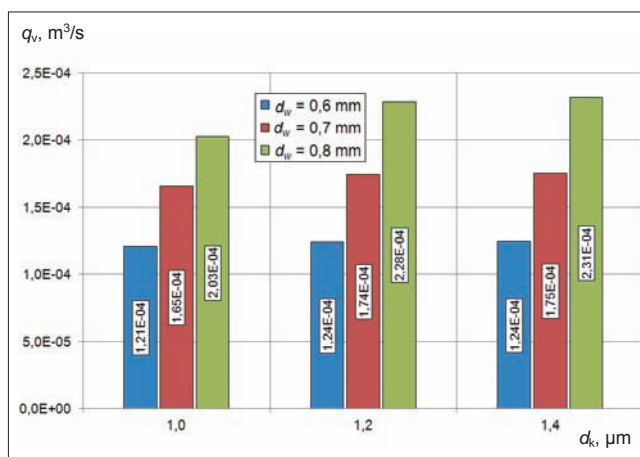
Na rys. 6 pokazano otrzymane wartości współrzędnej początku zakresu pomiarowego s_p – parametru, który ma istotne znaczenie w projektowaniu głowic pomiarowych wyposażonych w pneumatyczne przetworniki długości. Jak widać, wartości s_p przetwornika z dyszą pomiarową o średnicy $d_k = 1\text{ mm}$ są mniejsze w porównaniu z przetwornikami o średnicy d_k równej 1,2 mm lub 1,4 mm. Tak małe wartości współrzędnej początku zakresu pomiarowego, zwłaszcza dla kombinacji $d_k = 1\text{ mm}$ i $d_w = 0,8\text{ mm}$, powodują, że wykonanie głowic pomiarowych jest technicznie niemożliwe.



Rys. 5. Zestawienie porównawcze wartości zakresu pomiarowego z_p pneumatycznego przetwornika długości dla różnych zestawów dysz pomiarowych i wlotowych



Rys. 6. Zestawienie porównawcze wartości współrzędnej początku zakresu pomiarowego s_p pneumatycznego przetwornika długości dla różnych zestawów dysz pomiarowych i wlotowych



Rys. 7. Zestawienie porównawcze wartości strumienia objętości q_v dla szczeliny pomiarowej $s = 300\text{ }\mu\text{m}$ pneumatycznego przetwornika długości w zależności od średnicy dyszy wlotowej d_w

Wartość strumienia objętości q_v nie zależy od średnicy dyszy pomiarowej d_k (rys. 7) – jego zmiany są pomijalnie małe. Zauważono natomiast, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej rośnie także q_v – dotyczy to wszystkich rozpatrywanych przetworników.

Wnioski

- Charakterystyki statyczne wyznaczone dla różnych zestawów dysz wlotowych i pomiarowych potwierdziły, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej zwiększa się zakres pomiarowy, a czułość ulega zmniejszeniu, co jest zgodne z literaturą przedmiotu [5, 7].
- Określenie współrzędnej początku zakresu pomiarowego ma istotne znaczenie z punktu widzenia konstruowania głowic pomiarowych.
- Jak wynika z przedstawionych charakterystyk przepływowych, średnica dyszy pomiarowej nie ma wpływu na wartość strumienia objętości, natomiast zwiększenie średnicy dyszy wlotowej powoduje jego wzrost.
- Otrzymane wyniki wskazują na konieczność głębszego poznania zjawisk i zależności omawianych w artykule, a także na potrzebę precyzyjnego określenia zakresu stosowania metody pneumatycznej w pomiarach długości.

LITERATURA

1. Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A. „*Matematyka. Poradnik encyklopedyczny*”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.
2. Cellary A., Jermak C.J., Wieczorowski M. „Komputerowy system identyfikacji właściwości metrologicznych pneumatycznych czujników do pomiaru długości”. *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Metrologiczne problemy w technikach wytwarzania”*, Koszalin – Mielno 13÷16 czerwca 1996 r.: s.105÷110.
3. Farago F.T., Curtis M.A. „*Handbook of Dimensional Measurement*”. New York: Industrial Press Inc, 2004.
4. Jakubiec W., Malinowski J. „*Metrologia wielkości geometrycznych*” (wyd. czwarte zmienione). Warszawa: WNT, 2004.
5. Jakubowicz M., Jermak C.J. „Ocena właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości (PPD) z dyszami szczelinowymi”. *Pomiary Automatyka Kontrola*. R. 58, nr 11 (2012): s. 994÷997.
6. Jakubowicz M., Jermak C.J. „Niepewność pomiaru długości z użyciem przetwornika pneumatycznego”. *Inżynieria Maszyn*. R. 18, z. 3 (2013): s. 48÷59.
7. Jermak C.J. „*Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości*”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012.
8. Piotrowski J., Kostyrko K. „*Wzorcowanie aparatury pomiarowej*”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
9. Rucki M. „*Właściwości dynamiczne wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych o zmniejszonych komorach pomiarowych*”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011.
10. Zelczak A., „*Pneumatyczne pomiary długości*”. Warszawa: WKŁ, 2002. ■