

**Czesław Janusz JERMAK, Michał JAKUBOWICZ**

ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, POLITECHNIKA POZNAŃSKA,  
Pl. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

## Ocena właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości (PPD) z dyszami szczelinowymi

Dr inż. Czesław Janusz JERMAK

Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Poznańskiej. Od początku działalności zawodowej zajmuje się problematyką pneumatycznych pomiarów długości. Kierował tematami badawczymi w ramach programów: resortowego RI-07, badań podstawowych CPBP 02-20, grantów w 1996, 2000 i 2006 roku. Twórca lub współtwórca 30 opatentowanych konstrukcji z dziedziny pneumatyki pomiarowej. Autor ponad 60 publikacji z tego obszaru metrologii.



e-mail: cz.jermak@interia.pl

Mgr inż. Michał JAKUBOWICZ

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania. Od 2011 roku doktorant w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania badawcze związane są z pomiarami wielkości geometrycznych z wykorzystaniem pneumatycznych przetworników pomiarowych.



e-mail: michal.jakubowicz@doctorate.put.poznan.pl

### Streszczenie

W artykule opisano problematykę oceny właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości z pomiarową dyszą szczelinową. Jako odniesienie zastosowano dysze o przekroju kołowym. Stwierdzono, że przetworniki wyposażone w dysze szczelinowe charakteryzują się około dwukrotnie większą czułością. Ponadto niesymetryczny wypływ powietrza skutecznie eliminuje zjawisko występowania skoku ciśnienia w strefie szczeliny pomiarowej.

**Słowa kluczowe:** pneumatyczny przetwornik długości, pomiar długości metodą pneumatyczną, charakterystyka statyczna.

### Evaluation of properties of static air length gauges with slotted nozzles

#### Abstract

In this paper the problems of assessment of the static air length gauges with slotted measurement nozzles are described. The parameters which underwent assessment by their static characteristics were sensitivity, measuring range, and coordinate at the beginning of the measurement range calculated for non-linearity error  $\delta_r = 1,5\%$ . The nozzles of circular cross section, commonly used in pneumatic measurements, were used as reference in this study. The study was undertaken because there is a need for implementation of nozzles with a relatively small width of the "measuring end" represented by an air stream, to the systems for the roundness deviation measurement. In this study the nozzle slot width was 0.385 and 0.427 mm, and the geometric cross-section area corresponded to diameters of the orifices of the classical nozzles of 1.020 and 1.441 mm, respectively. The use of inlet nozzles of variable diameters in air gauges allowed to obtain the static characteristics with a large span of meteorological parameters. The results showed that air gauges with slotted measuring nozzles show times greater sensitivity than those with nozzles of circular cross section of the same area. The air gauges with slotted nozzles achieve similar sensitivity, when the diameter of the inlet nozzle is larger by about 20%, which should be considered positive from the viewpoint of dynamics.

**Keywords:** air gauge, dimensional measurement, static characteristic.

### 1. Wstęp

Rozwój mechanizacji i automatyzacji procesów produkcji części maszyn jest ściśle związany z doskonaleniem metod i środków kontroli części. Szczególna rola przypada przyrządom realizującym pomiary metodą bezstykową, do których zaliczane są między innymi pneumatyczne przyrządy pomiarowe. Stanowią one ważną grupę narzędzi pomiarowych stosowanych w dokładnych pomiarach części maszyn, w biernych i czynnych układach kontroli wymiaru i kształtu [6, 8].

W trudnych warunkach pracy – obecność w strefie pomiaru chłodziwa i produktów obróbki – wykazują zdecydowaną przewagę nad innymi przyrządami.

Ponadto cechują je [4]:

- prosta konstrukcja większości głowic pomiarowych współpracujących z pneumatycznymi przyrządami pomiarowymi,
- bardzo duża niezawodność,
- samooczyszczanie strefy pomiaru,
- prosta zmiana parametrów metrologicznych,
- niski koszt wytwarzania głowic pneumatycznych,
- wystarczające w większości zastosowań właściwości dynamiczne.

Współcześnie wytwarzane przyrządy pneumatyczne wyposażone są w układy elektroniczne pozwalające na przetwarzanie sygnału pneumatycznego na elektryczny. Umożliwiają współpracę z komputerem, archiwizację danych, funkcje sterowania zewnętrznymi urządzeniami. Dorównują w tym względzie najnowszym rozwiązaniom przyrządów z czujnikami indukcyjnymi lub optoelektronicznymi.

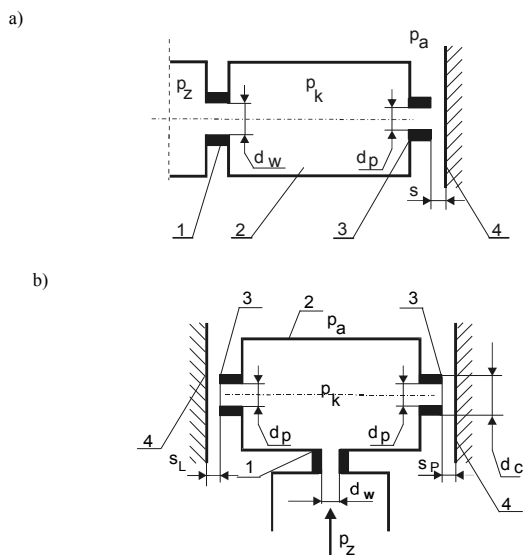
Narzędzia pomiarowe (głowice) w zależności od kształtu i wymiarów mierzonej części posiadają zróżnicowaną konstrukcję. Najprostsze, jednodyszowe stosowane są w pomiarach odchyłki promienia powierzchni walcowych lub wymiarów płaszczyzn. Do pomiaru odchyłek wymiaru otworów stosuje się średnicówki w których liczba dysz wynosi od dwóch do kilkunastu [9].

Działanie pneumatycznych przyrządów do pomiaru długości związane jest ze zmianą parametrów powietrza przepływającego przez elementy przepływowe przyrządu i głowicę pomiarową. W literaturze przedmiotu połączenie tych elementów stanowi pneumatyczny przetwornik do pomiaru długości. W zależności od tego jaki parametr przepływu jest mierzony, przetworniki dzielą się na przepływowe i ciśnieniowe [3], przy czym do przepływowych zaliczane są również takie, w których mierzona jest prędkość przepływu. Zmiana parametrów zależna jest od szczeliny pomiarowej utworzonej pomiędzy czołem dyszy pomiarowej, a powierzchnią mierzonego przedmiotu.

Przetworniki powinny być zasilane uzdatnionym powietrzem spełniającym warunki oczyszczenia wg drugiej klasy jakości stanu powietrza technicznego [9]. Ciśnienie zasilania  $p_z$  wynosi  $p_z \geq 150$  kPa nadciśnienia. Wymagana jest stabilizacja ciśnienia zasilania z dużą dokładnością.

### 2. Budowa i zasada działania PPD

Stosowany powszechnie w pomiarach długości jednokaskadowy pneumatyczny przetwornik długości zbudowany jest z dyszy wlotowej 1, komory pomiarowej 2 oraz dyszy pomiarowej 3 (rys. 1). W praktycznych rozwiązaniach może występować większa liczba dysz pomiarowych. Schematy typowych konfiguracji przetworników jednokaskadowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Jednokaskadowy pneumatyczny przetwornik do pomiaru długości: a) jednokaskadowy, b) dwukaskadowy do pomiaru wymiarów wewnętrznych, 1 – dysza wlotowa, 2 – komora pomiarowa, 3 – dysza pomiarowa, 4 – przesłona

Fig. 1. Single-cascade air gauge for length measurement: a) with one nozzle, b) with two nozzles, for measurement of internal dimensions, 1 – inlet nozzle, 2 – measuring chamber, 3 – measuring nozzle, 4 – flapper

W trakcie pomiaru wpływ powietrza z dyszy (dysz) pomiarowej 3 ograniczony jest przesłoną 4 oddaloną od czoła (czoła) na odległość  $s$ . Stosowane w przetwornikach dysze wlotowa i pomiarowa posiadają z reguły otwory o przekroju kołowym i średnicach, odpowiednio  $d_w$  i  $d_p$ . W komorze pomiarowej panuje ciśnienie pomiarowe (kaskadowe)  $p_k$ , którego wartość zależna jest od szczeliny pomiarowej  $s$  oraz geometrii (wymiarów i opprofilowania) dysz 1 i 3.

Podstawową charakterystyką metrologiczną przetwornika jest charakterystyka statyczna  $p_k = f(s)$  opisująca przebieg zmian ciśnienia kaskadowego w funkcji szczeliny pomiarowej. Do oceny liniowości przydatną okazuje się być charakterystyka czułości informująca o zmianie jej wartości w funkcji szerokości szczeliny  $s$  charakterystyki statycznej.

Charakterystyki statyczne przetworników są nieliniowe, stąd konstruując głowicę pneumatyczną należy dążyć do wykorzystania fragmentu charakterystyki o jak najmniejszej zmianie czułości. Ideałem jest uzyskanie stałowartościowego przebiegu charakterystyki czułości, możliwe tylko w przypadku głowicy stykowych z regulowaną czynnie powierzchnią wypływu. Przebieg charakterystyki statycznej jest w znacznym stopniu kształtowany przez zjawiska termo i gazodynamiczne występujące w strefie wypływu powietrza z dyszy pomiarowej. Na przebiegach charakterystyk można wyraźnie zauważyć nieciągłości zwane w literaturze „skokami” lub „uskokami” ciśnienia. Po raz pierwszy zostały zauważone przez Markowa [7].

Zjawisko nieciągłości skoku ciśnienia zaobserwowane zostało również w badaniach własnych [5]. Obserwowano również i dokumentowano zakłócenia w przebiegu charakterystyki mające charakter histerezy. Skoki ciśnienia oraz histereza stanowią specyficzną trudność do pokonania widzianą w dwóch aspektach.

W pierwszym aspekcie (poznawczym) chodzi o ustalenie przyczyn występowania uskoku i możliwie pełną ich identyfikację. Z drugiego, aplikacyjnego, punktu widzenia wynika potrzeba opanowania umiejętności przewidywania punktu położenia, lokalizacji tego uskoku na charakterystyce statycznej przetwornika, tak by obszar pracy przetwornika nie sięgał tego punktu. Z tego samego aspektu wynika alternatywne zadanie takiego projektowania przetwornika, aby skok ciśnienia na charakterystyce statycznej nie występował lub zlokalizowany był znacznie poza zakresem pomiarowym przetwornika.

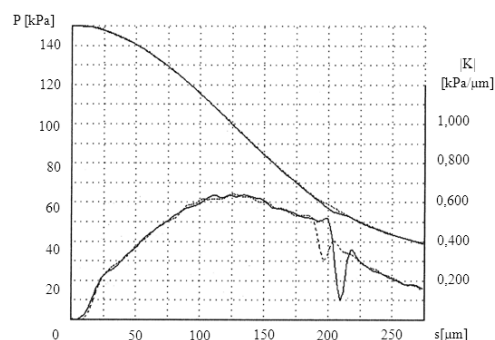
Autorzy pracy [2] sądzą, że przyczyną tego skoku jest skośna fala uderzeniowa powstająca w przekroju wylotowym blisko powierzchni przesłaniającej. Powstanie fali powoduje wzrost oporów

przepływu w obszarze szczeliny pomiarowej  $s$ , co z kolei zmniejsza nieco strumień powietrza przepływającego przez przetwornik. Taki mechanizm zjawisk potwierdzają również prace [1, 9]

Można stwierdzić, że na powstanie skoku ma również wpływ wiele innych czynników takich jak: ciśnienie zasilania  $p_z$ , stosunek średnic  $d_w/d_p$  dysz, wartość szczeliny pomiarowej  $s$  i unormowana średnica czoła  $Dc = d_c/d_p$  dyszy pomiarowej.

Wydaje się, że tak określoną przyczynę traktować można jako jedną z równouprawnionych hipotez.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań przetwornika o wymiarach dysz  $d_p = 1,441$  mm,  $d_w = 0,830$  mm  $Dc = 3$ . Na charakterystyce statycznej można zaobserwować wyraźną pętlę histerezy, ograniczającej zakres pomiarowy. Zwraca uwagę bardzo duża dynamika zjawiska. Na charakterystyce czułości zjawisko to występuje w postaci gwałtownej zmiany czułości – uskoku – przesuniętych względem siebie. Zmianom tym towarzyszy wyraźnie słyszalny efekt akustyczny.

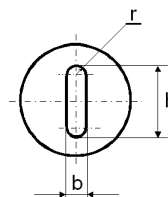


Rys. 2. Przebiegi charakterystyk statycznej  $p_k = f(s)$  i czułości  $|K| = f(s)$ :  $d_{p2} = 1,441$  mm,  $d_w = 0,830$  mm,  $Dc = 3$

Fig. 2. Static characteristics runs of  $p_k = f(s)$  and sensitivity  $|K| = f(s)$ :  $d_{p2} = 1,441$  mm,  $d_w = 0,830$  mm,  $Dc = 3$

W literaturze brak jest opisu sposobów jakimi producenci głowic eliminują negatywne skutki opisanych zjawisk. Z badań prowadzonych w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych wynikają dwa podstawowe kierunki działań. Pierwszy, polegający na doboru unormowanej średnicy czoła dyszy pomiarowej, jest skuteczny, jeżeli towarzyszy temu odpowiednia wartość średnicy dyszy wlotowej [5]. Drugi sposób zakłada eliminację osiowosymetrycznego wypływu powietrza z dyszy pomiarowej uzyskana na drodze zamiany kanału przepływowego o przekroju kołowym na inny, np. trójkątny. Ta zamiana skutkuje ograniczeniem głębokości skoku ciśnienia i efekcie przyczynia się do powiększenia zakresu pomiarowego. Z praktycznego punktu widzenia, mając na uwadze zastosowanie przetworników do pomiarów zarysu kształtu, należy dążyć do minimalizacji wymiarów strugi napływającej na mierzoną powierzchnię. Poprawia się właściwość przetwornika, którą można porównać do wzrostu selektywności pomiaru. Jest to cecha szczególnie pożądana w pomiarach elementów o niewielkiej długości fal nierówności.

Dyszami spełniającymi ten warunek są dysze pomiarowe szczelinowe charakteryzujące się tym, że otwór dyszy w przekroju prostopadłym do osi, posiada kształt fasolowy (rys. 3).



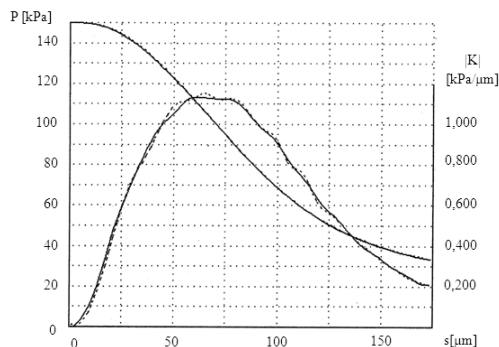
Rys. 3. Kształt i wymiary dyszy szczelinowej.  
Fig. 3. The shape and dimensions of the slotted nozzle

### 3. Opis i analiza wyników badań

W badaniach zastosowano przetwornik z walcową komorą pomiarową o długości 50 mm i średnicy 10 mm.

Zmianę parametrów uzyskiwano za pomocą wymiennych dysz wlotowych o średnicach  $d_w$ :

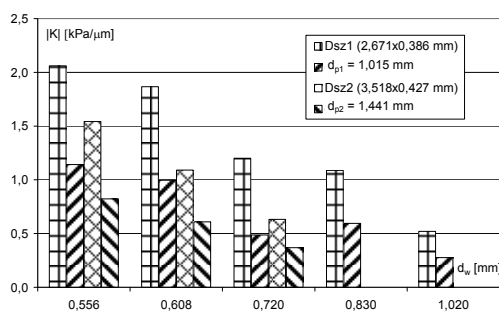
- 0,556; 0,608; 0,720; 0,830 i 1,020 mm skojarzonych w przetworniku z dyszami, szczelinową  $Dsz1$  i klasyczną o średnicy  $d_{p1}$ ,
- 0,720; 0,830 i 1,020 mm skojarzonych w przetworniku z dyszami szczelinową  $Dsz2$  i klasyczną o średnicy  $d_{p2}$ .



Rys. 4. Przebiegi charakterystyk statycznej  $p_k = f(s)$  i czułości  $|K| = g(s)$ : dysza szczelinowa  $Dsz2$ ,  $d_w = 0,830$  mm

Fig. 4. Static characteristics runs of  $p_k = f(s)$  and sensitivity  $|K| = g(s)$ : nozzle  $Dsz2$ ,  $d_w = 0,830$  mm

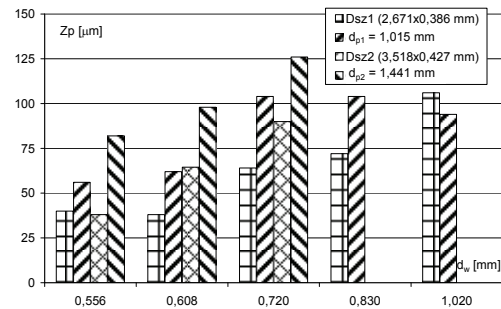
Przyjęta kombinacja dysz pozwoliła na jakościową i ilościową analizę wpływu wymiarów i kształtu dyszy pomiarowej. Zaobserwowano, że zastosowanie dysz szczelinowych o takim samym polu przekroju eliminuje skutecznie niekorzystne zjawisko skoku ciśnienia (rys. 2 i 4). Jednak największe zmiany dotyczą parametrów określających właściwości metrologiczne. Rysunek 6 przedstawia zmianę w funkcji średnicy dyszy wlotowej  $d_w$  modułu czułości  $|K|$  przetworników z dyszami szczelinowymi i o przekroju kołowym. Można zauważyć, że zastosowanie w przetworniku z dyszą wlotową  $d_w = 0,556$  mm dysz szczelinowych skutkuje znaczącym wzrostem czułości odpowiednio o 180% i 187%. Dla przetwornika z dyszą o średnicy  $d_w = 0,720$  mm przyrosty czułości osiągają wartości 246% i 171%. Są to znaczące zmiany w odniesieniu do przetworników z „klasycznymi” dyszami pomiarowymi, skutkujące możliwością zastosowania przetworników w pomiarach, w których wymagana jest rozdzielczość poniżej 0,1  $\mu\text{m}$ .



Rys. 5. Zmiana czułości dla różnych wartości średnicy  $d_w$   
Fig. 5. Variation of sensitivity for different values of diameter  $d_w$

Stosowanie dyszy wlotowej o średnicy praktycznie równej średnicy dyszy pomiarowej nie jest praktykowane w konstrukcjach przyrządów pneumatycznych z racji niewielkiej czułości. Wynika to między innymi z wykresu na rys. 5, gdzie czułość przetwornika z dyszami  $d_{p1} = 1,015$  mm i  $d_w = 1,020$  mm wynosi zaledwie 0,275 kPa/ $\mu\text{m}$ . Zastosowanie dyszy szczelinowej zwiększa czułość do akceptowalnej w warunkach przemysłowych war-

tości 0,521 kPa/ $\mu\text{m}$ . Kolejną pozytywną stroną takiego zestawienia dysz jest znacząca poprawa właściwości dynamicznych, co skłania do zastosowania ich w układach kontroli czynnej.



Rys. 6. Zmiana zakresu pomiarowego dla różnych wartości średnicy  $d_w$   
Fig. 6. Variation of measuring range for different values of diameter  $d_w$

Trend zmiany zakresu pomiarowego w zależności od średnicy dyszy wlotowej jest zgodny z opisanym w literaturze [9] – zwiększeniu średnicy dyszy wlotowej odpowiada rozszerzenie zakresu pomiarowego niezależnie od rodzaju zastosowanej dyszy pomiarowej (rys. 6). Jedynie w przetworniku z dyszami o zbliżonych średnicach dysz pomiarowej i wlotowej ( $d_{p1} = 1,015$  mm i  $d_w = 1,020$  mm) zaobserwowano zmniejszenie zakresu pomiarowego i czułości w stosunku do analogicznych parametrów przetwornika z dyszą szczelinową.

### 4. Wnioski

1. Przetworniki z pomiarowymi dyszami szczelinowymi charakteryzują się około dwukrotnie większą czułością w stosunku do rozwiązań z dyszami o równoważnym przekroju kołowym.
2. Zastosowanie dysz szczelinowych skutecznie eliminuje zjawisko skoku ciśnienia w strefie szczeliny pomiarowej.
3. Zakres pomiarowy przetworników z pomiarowymi dyszami szczelinowymi jest średnio 30% mniejszy od przetworników z dyszami o przekroju kołowym.

### 5. Literatura

- [1] Breiteringer R.: Fehlerquellen beim pneumatischen Langmessen, Dissertation, TU Stuttgart, 1969.
- [2] Crnojevic C. et al.: The Influence of the Regulator Diameter and Injection Nozzle Geometry on the Flow Structure in Pneumatic Dimensional Control Systems. "Journal of Fluids Engineering" Vol. 119, p. 609-615, 1997.
- [3] Farago F.T., Curtis M.A.: Handbook of Dimensional Measurement. Industrial Press Inc., New York, 2004.
- [4] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych (wydanie czwarte zmienione), WNT, Warszawa, 2004.
- [5] Jermak Cz.J., Rucki M.: Ocena wpływu wielkości czola dyszy pomiarowej na właściwości metrologiczne czujnika prostego. Materiały konferencyjne XXVII Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'95, Zielona Góra, t. 2, s. 144-149, 1995.
- [6] Kondaszewski W.W., Lotze W.: Urządzenia pomiarowo-sterujące obrabiarek. WNT, Warszawa, 1979.
- [7] Markow B.N.: Pneumatic Dimensional System with Measuring Nozzle (in German), Feingerätetechnik, 20. Jg. Heft 4., pp. 160-161, 1971.
- [8] Menzies I., Koshy P.: In-process detection of surface porosity in machined castings, "International Journal of Machine Tools & Manufacture" Vol. 49, Issue 6, p. 530-535, 2009.
- [9] Zelczak A.: Pneumatyczne pomiary długości. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2002.