

Pomiary pneumatyczne powierzchni walcowych: wyniki badań laboratoryjnych

Air gauging: laboratory investigations on measurements of cylindrical surfaces

CZESŁAW JANUSZ JERMAK
MIROSLAW RUCKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.3.19

Omówiono wyniki badań laboratoryjnych czujników pneumatycznych stosowanych w średnicówkach pneumatycznych. Powierzchnia czoła tych czujników jest zaokrąglona, przy czym promień zaokrąglenia odpowiada promieniowi średnicówki. Badania potwierdziły, że w tych przypadkach przebieg charakterystyk statycznych nieznacznie się różni od przebiegu charakterystyk czujników o płaskim czole, współpracujących z płaską powierzchnią pomiarową. To oznacza, że możliwe jest wzorcowanie przyrządu za pomocą płaskich powierzchni, bez konieczności wykonywania drogich wzorców nastawczych o powierzchni walcowej.

SŁOWA KLUCZOWE: czujnik pneumatyczny, czułość przetwornika, zakres pomiarowy

Presented in the paper are the investigation results as made for the air gauges applied for measurement of cylindrical details. The nozzles were rounded, and their radiuses corresponded to the radius of the plug (measuring head). The investigations proved negligibly small differences between the metrological characteristics of those air gauges and the ones with flat surfaces. The conclusion is that there is no need to produce expensive setting masters in form of the measured cylinder. It is possible to perform setting procedures with flat nozzles and flat flappers.

KEYWORDS: air gauge, sensitivity, measuring range

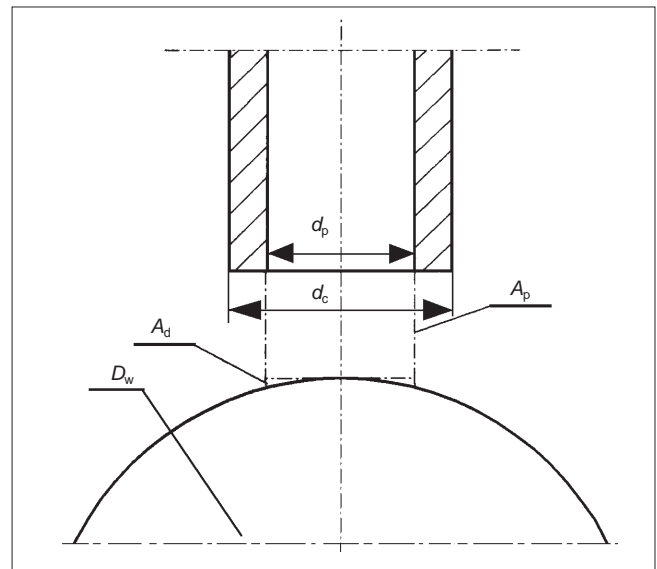
Badania wypływu powietrza z dyszy płaskiej na powierzchnię walcową

W celu uproszczenia obliczeń zazwyczaj zakładano, że powierzchnia wypływu z dyszy pomiarowej jest cylindryczna (rys. 1), a dodatkową powierzchnię obliczano według wzoru [1]:

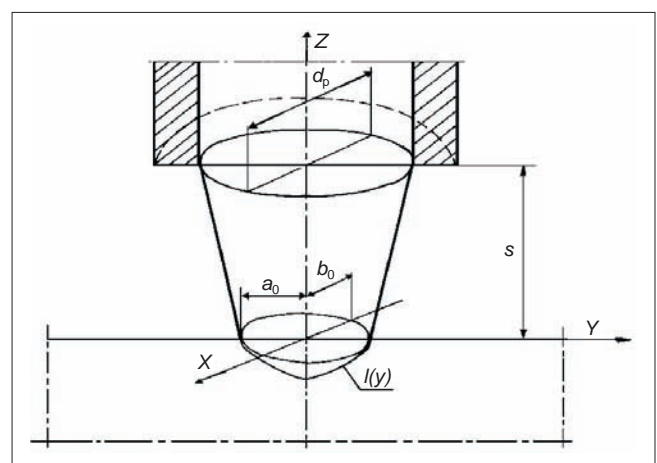
$$A_d = D_w d_p \left[\frac{\pi}{2} - E \left(k, \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

gdzie: D_w – średnica mierzonego przedmiotu, d_p – średnica dyszy pomiarowej, $E(k, \pi/2)$ – całka eliptyczna zależna od stosunku $k = d_p/D_w$

W latach 90. XX w. w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej przeprowadzono serię badań dotyczących dodatkowej powierzchni wypływu powstającej między płaską dyszą pomiarową a walcową powierzchnią mierzonego przedmiotu [2]. Wykazano wówczas, że minimalna powierzchnia wypływu powietrza nie jest walcowa, lecz stożkowa (rys. 2). W badaniach tych jednak uwzględniano dysze pomiarowe o płaskiej powierzchni czoła, natomiast omawiane dalej badania wykonano dla dysz ukształtowanych zgodnie z praktyką pomiarową stosowaną w średnicówkach – w tym przypadku powierzchnia czoła przyjmuje kształt zewnętrznej powierzchni walcowej.



Rys. 1. Dodatkowa powierzchnia wypływu powietrza A_d (uwzględniająca średnicę przedmiotu) w pomiarach powierzchni walcowych (oznaczenia: A_p – pole powierzchni wypływu powietrza na płaską powierzchnię przedmiotu, D_w – średnica mierzonego przedmiotu, d_p – średnica dyszy pomiarowej, $d_c/d_p = D_c$ – unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej) [2]



Rys. 2. Poboczna stożka reprezentuje minimalną powierzchnię wypływu powietrza $A_{p, \min}$ w pomiarach powierzchni walcowych (oznaczenia: a_0, b_0 – półosie elipsy; s – szczelina pomiarowa; $l(y)$ – krzywa przenikania powierzchni) [2]

Badania wpływu promienia przesłony

Wartości parametrów metrologicznych przetworników wyznaczonych dla błędu nieliniowości 1% zamieszczono w tabl. I i II.

* Dr hab. inż. Czesław Janusz Jerzak (czeslaw.jerzak@put.poznan.pl), dr hab. inż. Mirosław Rucki (miroslaw.rucki@gmail.com) – Politechnika Poznańska

TABLICA. I. Średnie wartości parametrów charakterystyki statycznej oraz statystyki t dla różnych promieni R_w powierzchni przesłaniającej; średnica dyszy pomiarowej $d_p = 1,61$ mm, średnica dyszy wlotowej $d_w = 0,71$ mm

R_w , mm	5	12,5	25	50	∞
D_c	1,5				
\bar{z}_p , μm	51,8	52	52,8	51,6	52,4
\bar{s}_p , μm	40	41	43	42	41
$ \bar{K} $, $\text{kPa}/\mu\text{m}$	0,8970	0,8930	0,8920	0,8986	0,8920
R_w , mm	5	12,5	25	50	∞
D_c	3				
\bar{z}_p , μm	61,2	61,0	61,0	59,8	60,8
\bar{s}_p , μm	46	46	47	46	48
$ \bar{K} $, $\text{kPa}/\mu\text{m}$	1,0174	1,0160	1,0118	1,0212	1,0186

Oznaczenia: D_c – unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej, \bar{z}_p – wartość średnia zakresu pomiarowego, \bar{s}_p – wartość średnia szczeliny pomiarowej, $|\bar{K}|$ – wartość średnia czułości czujnika

TABLICA. II. Średnie wartości parametrów charakterystyki statycznej oraz statystyki t dla różnych promieni R_w powierzchni przesłaniającej; średnica dyszy pomiarowej $d_p = 1,61$ mm, średnica dyszy wlotowej $d_w = 1,211$ mm

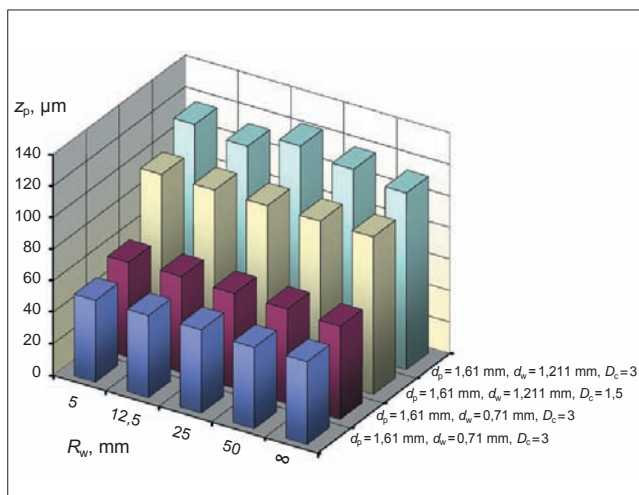
R_w , mm	5	12,5	25	50	∞
D_c	1,5				
\bar{z}_p , μm	99,6	100,0	100,2	100,0	100,6
\bar{s}_p , μm	129	131	133	128	130
$ \bar{K} $, $\text{kPa}/\mu\text{m}$	0,2967	0,2930	0,2469	0,2948	0,2984
R_w , mm	5	12,5	25	50	∞
D_c	3				
\bar{z}_p , μm	115,8	115,6	117,8	117,0	115,8
\bar{s}_p , μm	138	135	145	142	139
$ \bar{K} $, $\text{kPa}/\mu\text{m}$	0,3278	0,3314	0,3314	0,3296	0,3320

Oznaczenia: D_c – unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej, \bar{z}_p – wartość średnia zakresu pomiarowego, \bar{s}_p – wartość średnia szczeliny pomiarowej, $|\bar{K}|$ – wartość średnia czułości czujnika

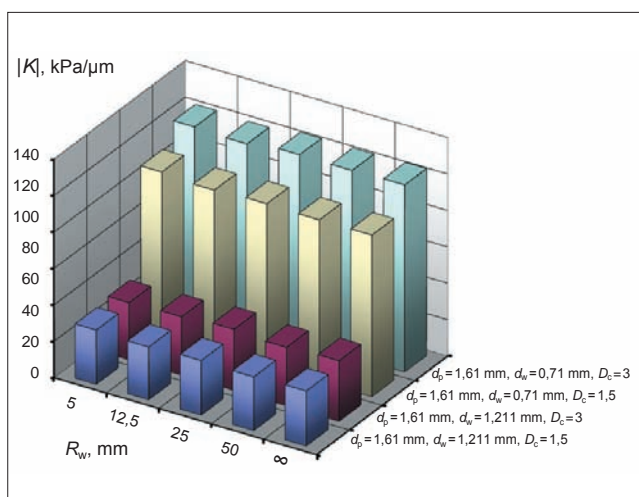
TABLICA III. Wyniki analizy wariancji oraz wartości statystyki F przetworników wg tabl. I–II

$d_p/d_w/D_c$ mm/mm/mm	M – między grupami W – wewnątrz grup	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Wariancja	Test F
1,61/0,71/1,5	M	4,64	4	1,16	0,552
	W	42,00	20	2,10	
1,61/1,211/1,5	M	2,64	4	0,66	0,196
	W	67,20	20	3,36	
1,61/0,71/3	M	6,16	4	1,54	0,527
	W	58,40	20	2,92	
1,61/1,211/3	M	18,40	4	4,60	2,584
	W	35,60	20	1,78	
1,61/0,71/1,5	M	0,00016	4	0,00004	0,664
	W	0,00123	20	0,00006	
1,61/1,211/1,5	M	0,00010	4	0,00002	2,178
	W	0,00022	20	0,00001	
1,61/0,71/3	M	0,00024	4	0,00006	0,374
	W	0,00323	20	0,00016	
1,61/1,211/3	M	0,00006	4	0,00001	0,358
	W	0,00083	20	0,00004	

Oznaczenia: d_p – średnica dyszy pomiarowej, d_w – średnica dyszy wlotowej, D_c – unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej



Rys. 3. Wykres słupkowy wartości zakresu pomiarowego dla różnych promieni R_w powierzchni przesłaniającej; średnica dyszy pomiarowej $d_p = 1,61$ mm, średnica dyszy wlotowej $d_w = 0,71$; 1,211 mm, unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$; 3



Rys. 4. Wykres słupkowy czułości $|K|$ dla różnych promieni R_w powierzchni przesłaniającej; średnica dyszy pomiarowej $d_p = 1,61$ mm, średnica dyszy wlotowej $d_w = 0,71$; 1,211 mm, unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$; 3

Na rys. 3 i 4 pokazano obliczone parametry charakterystyki statycznej $|K|$ i \bar{z}_p dla przetwornika o wymiarach $d_w = 0,71$ mm, $d_p = 1,61$ mm i $D_c = 1,5$. Na wykresach zaznaczono położenia średnich wartości parametrów dla założonych wartości promienia powierzchni przesłaniającej R_w . Wysokość każdego słupka wykresu stanowi średnia z 10 pomiarów.

W celu stwierdzenia, czy średnie wartości zakresu pomiarowego (względnie czułości) uzyskane dla różnych promieni R_w nie różnią się istotnie, zastosowano test analizy wariancji (w klasyfikacji pojedynczej) dla wielu średnich. Wyniki obliczeń średnich grupowych oraz sumy kwadratów między grupami i wewnątrz grup zamieszczono w tabl. III. W obliczeniach przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Wartość krytyczna statystyki testu F-Snedecora $F_{kryt.}$ wyniosła 2,866 dla liczby stopni swobody $n_1 = 4$ i $n_2 = 20$ oraz poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Po analizie danych zamieszczonych w tabl. III można stwierdzić, że test nie wykazał istotnej statystycznie różnicy między średnimi wartościami parametrów charakterystyki uzyskanymi dla różnych promieni powierzchni walcowej a średnimi wartościami dla powierzchni płaskiej, zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Są natomiast podstawy do sformułowania wniosku, że niezależnie od promienia powierzchni walcowej parametry charakterystyk statycznych nie różnią się od siebie.

Badania wpływu dyszy pomiarowej

Niekiedy ze względów praktycznych, np. w przypadku zastosowania głowicy o małych wymiarach lub nietypowym kształcie, konieczne jest zmniejszenie średnicy dyszy pomiarowej. Zmiana d_p z jednej strony wpływa na parametry statyczne przetwornika, a z drugiej – na zdolność do wykrywania lokalnych wzniesień i zagłębień mierzonego zarysu. Dysza pomiarowa, a właściwie struga powietrza o skończonej średnicy, filtruje odwzorowywany zarys. Aby uzyskać odpowiednią selektywność pomiaru, należy zachować właściwą relację pomiędzy średnicą mierzonego przedmiotu D_w a średnicą dyszy pomiarowej. Przyjmując, że w analizie odchytki uwzględnia się pierwszych 15 harmonicznym rozkładu powierzchni walcowych, dla najmniejszej przyjętej w badaniach średnicy $D_w = 10$ mm długość fal nierówności wynosi ok. 2,1 mm, a średnia wysokość 2 ± 20 μm . Korzystne jest więc stosowanie dysz o średnicy d_p mniejszej – ok. 0,5 długości fali nierówności. W konkretnym przypadku pomiaru odchyłek tulei wielkość średnicy d_p nie ma jednak znaczenia.

Warto zauważyć, że zastosowanie dysz pomiarowych o bardzo małych średnicach, rzędu 0,1–0,2 mm, pozwala nawet na pomiar chropowatości: części po zgrubnej obróbce ubytkowej, płyt wiórowych, elementów z porowatej gumy i tworzyw sztucznych.

Badania miały dać odpowiedź na pytanie, w jakim stopniu średnica d_p wpływa na parametry charakterystyki statycznej, a zwłaszcza na współrzędną początku zakresu pomiarowego s_p , która jest jednym z podstawowych parametrów branych pod uwagę w procesie konstruowania głowicy pomiarowej. Od współrzędnej s_p zależy bowiem wielkość obniżenia czoł dyszy pomiarowej względem płaszcza średnicówki.

Właściwy dobór średnicy d_p ma zasadnicze znaczenie, ponieważ dysza pomiarowa nie jest wymiennym elementem głowicy pomiarowej. Do badań przyjęto następujące średnice d_p : 1,211; 1,405; 1,610 i 1,805 mm. Unormowana średnica czoł wynosiła $D_c = 1,5$. W przetwornikach dysze pomiarowe zestawiono z dyszami wlotowymi o średnicach $d_w = 0,625$ mm oraz 1,211 mm, tak aby czułość $|K|$ była nie mniejsza niż 0,2 kPa/ μm , tj. od wartości zapewniającej wymaganą minimalną rozdzielczość pomiaru. Uzyskane z pomiarów ściśle wartości parametrów zamieszczono w tabl. IV. Uzyskane przebiegi $\rho_k = f(s)$ oraz $|K| = f(s)$ przedstawiono na rys. 5 i 6.

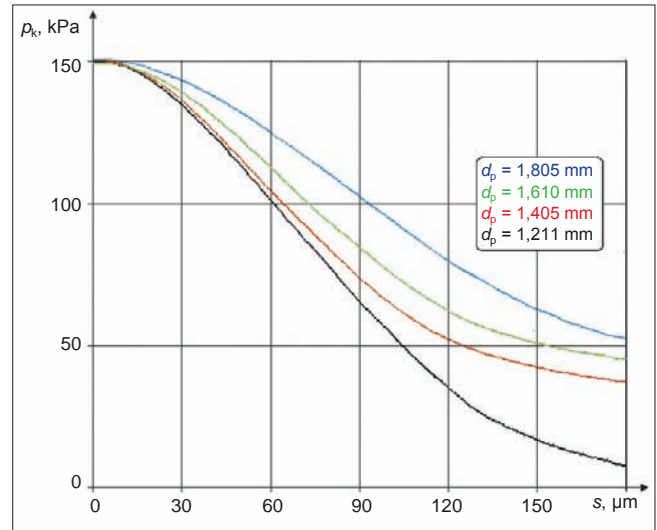
Analiza przebiegów charakterystyk czułości (rys. 6) przetwornika z dyszą wlotową o średnicy $d_w = 0,625$ mm pokazuje, że dla przyjętych wartości średnicy d_p czułość $|K|$ zmieniła się od 0,215 do 1,346 kPa/ μm i zapewniała bardzo wysoką rozdzielczość pomiaru. Z rys. 6 wynika, że przebiegi czułości charakteryzują się stosunkowo dużą regularnością, a wyraźne wahania czułości dotyczą przetwornika o największej czułości ($d_p = 1,805$ mm, $d_w = 0,625$ mm). Uskok czułości występuje bowiem w obszarze, gdzie osiąga ona wartości maksymalne.

Z badań wynika niezbitnie, że wzrost średnicy d_p , przy zachowaniu stałej średnicy d_w dyszy wlotowej, prowadzi do zwiększenia czułości, a jednocześnie do zmniejszenia – przy

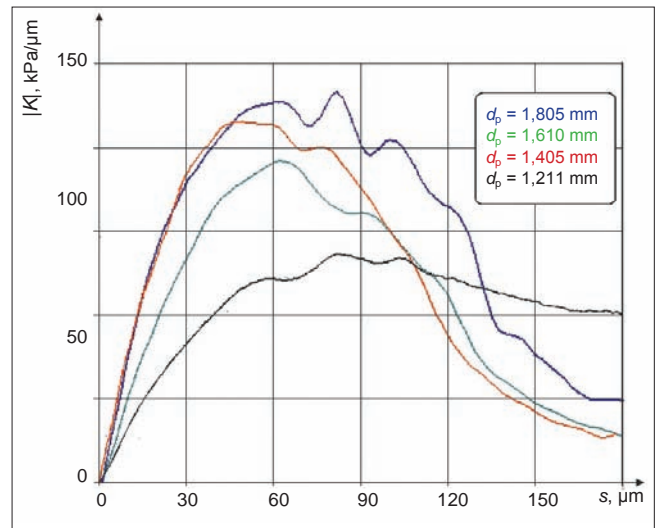
TABLICA IV. Zestawienie parametrów pneumatycznego przetwornika długości dla różnych wartości średnicy dyszy pomiarowej d_p

d_w , mm	Parametry	d_p , mm			
		1,211	1,405	1,610	1,805
0,625	z_p , μm	62,0	30,0	31,6	26,1
	s_p , μm	56,8	40,0	42,1	46,5
	$ K $, kPa/ μm	0,780	1,056	1,252	1,346
1,211	z_p , μm		141,2	74,2	32,4
	s_p , μm		93,8	114,8	108,0
	$ K $, kPa/ μm		0,215	0,272	0,308

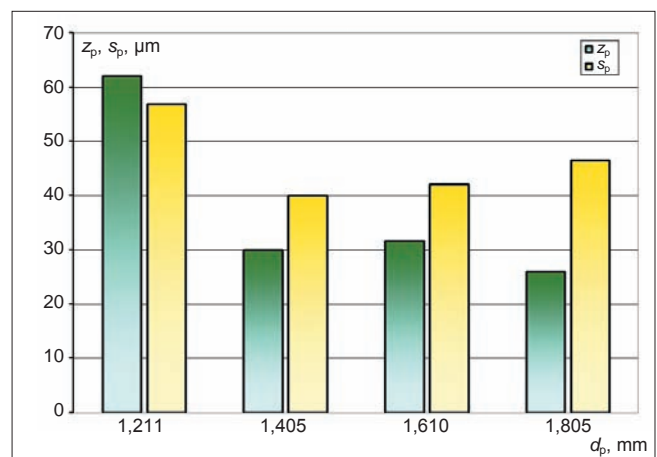
Oznaczenia: d_w – średnica dyszy wlotowej, z_p – zakres pomiarowy, s_p – szerokość szczeliny pomiarowej, $|K|$ – moduł czułości czujnika



Rys. 5. Charakterystyki statyczne czujnika z dyszą wlotową o średnicy $d_w = 0,625$ mm dla różnych wartości średnicy dyszy pomiarowej d_p ; unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$, ρ_k – ciśnienie pomiarowe, s – szerokość szczeliny pomiarowej



Rys. 6. Zmiany funkcji $|K| = f(s)$ czujnika z dyszą wlotową o średnicy $d_w = 0,625$ mm dla różnych średnic dyszy pomiarowej d_p ; unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$



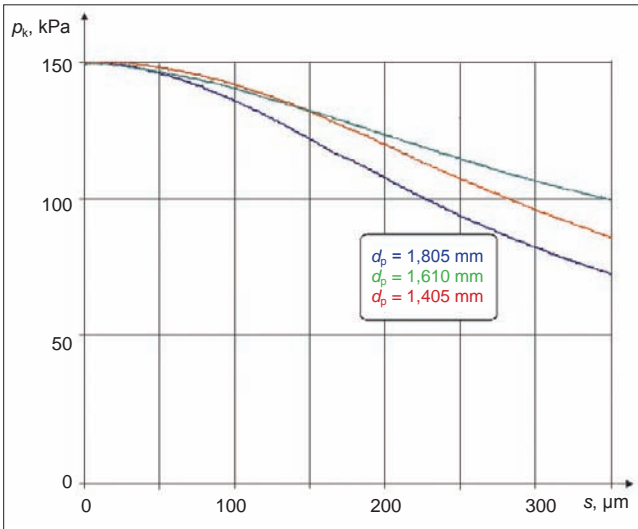
Rys. 7. Wykres wartości zakresu pomiarowego z_p i współrzędnej początku zakresu pomiarowego s_p dla różnych wartości średnicy dyszy pomiarowej d_p ; średnica dyszy wlotowej $d_w = 0,625$ mm, unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$



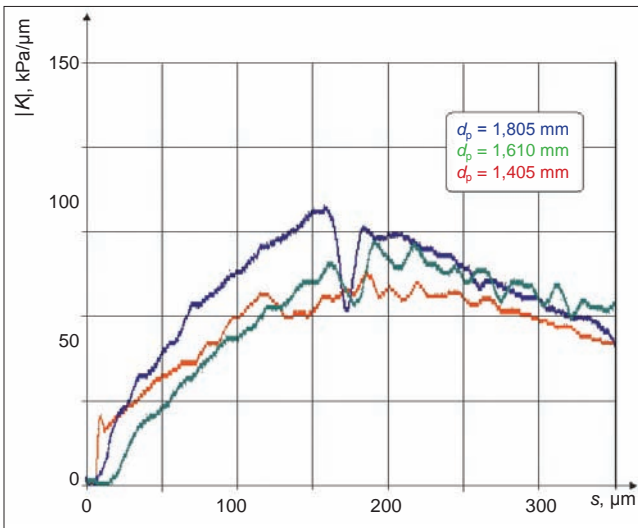
czym nie jest ono wyraźne – zakresu pomiarowego z_p (rys. 7). Przyczyn tego należy upatrywać w zjawiskach gazodynamicznych występujących w strefie szczeliny pomiarowej.

W badaniach przyjęto również inną wartość średnicy dyszy wlotowej: $d_w = 1,211$ mm. Odpowiadające jej charakterystyki statyczne i czułości pokazano na rys. 8 i 9. Zastosowanie dyszy wlotowej o większej średnicy spowodowało wyraźne zintensyfikowanie uskoku czułości w przypadku każdej z zastosowanych w badaniach dysz pomiarowych. Szczególnie gwałtowne zmiany czułości (uskoki) dotyczyły przetwornika o największej czułości.

Można wysnuć wniosek, że zwiększenie natężenia przepływu powietrza przez czujnik i większy spadek ciśnienia w zespole dysza pomiarowa – przesłona (w porównaniu z zastosowaniem dyszy wlotowej o średnicy $d_w = 0,625$ mm)



Rys. 8. Przebiegi charakterystyk statycznych czujnika z dyszą wlotową $d_w = 1,211$ mm dla różnych wartości średnicy dyszy pomiarowej d_p ; unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$

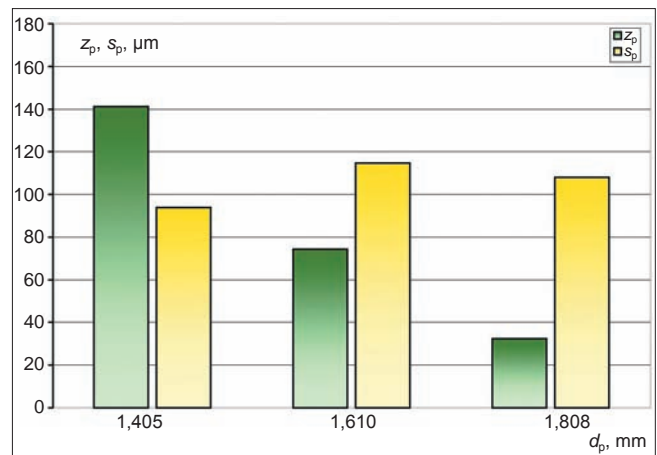


Rys. 9. Zmiany funkcji $|K| = f(s)$ czujnika z dyszą wlotową $d_w = 1,211$ mm dla różnych wartości średnicy dyszy pomiarowej d_p ; unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$

niekorzystnie wpływają na przebieg charakterystyki statycznej. Uzyskane maksymalne wartości czułości $|K|$ wyniosły: $0,215$ kPa/ μm – dla dyszy pomiarowej o średnicy $d_p = 1,405$ mm; $0,308$ kPa/ μm – dla dyszy pomiarowej o średnicy $d_p = 1,610$ mm; $0,32$ kPa/ μm – dla dyszy pomiarowej o średnicy $d_p = 1,805$ mm.

Przebiegi zakresu pomiarowego z_p i współrzędnej początku zakresu pomiarowego s_p przedstawia rys. 10. Gdy porówna się wyniki pokazane na rys. 7 i 10, widać, że w drugim przypadku wzrost średnicy d_w spowodował wyraźne zwiększenie zakresu pomiarowego (dla tej samej średnicy d_p) oraz wzrost wartości współrzędnej s_p .

Można odnotować, że wraz ze wzrostem średnicy d_p zachowanie się współrzędnej początku zakresu pomiarowego zależy od średnicy d_w – w przetwornikach z dyszą wlotową $d_w = 0,625$ mm początkowo maleje, by dla średnic $d_p = 1,610$ i $1,805$ mm nieznacznie wzrosnąć. Maksymalna różnica wartości współrzędnych wynosi 30 μm . Wzrost średnicy d_w do wartości $1,211$ mm zmniejszył tę różnicę do 20 μm .



Rys. 10. Wartości zakresu pomiarowego z_p i współrzędnej początku zakresu pomiarowego s_p dla różnych średnic d_p dyszy pomiarowej; średnica dyszy wlotowej $d_w = 1,211$ mm, unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = 1,5$

Podsumowanie

Analiza wyników przeprowadzonych badań prowadzi do wniosku, że przy projektowaniu średnicówki pneumatycznej pod kątem konkretnego zadania pomiarowego można wykorzystać rezultaty wzorcowania z zastosowaniem płaskiej dyszy pomiarowej współpracującej z płaską powierzchnią przesłaniającą.

LITERATURA

1. Bartoszewicz H., Fita S., Nowicki J. „Zastosowanie dysz z otworem o przekroju prostokątnym w głowicach pneumatycznych do pomiaru wałków”. *Prace Naukowe IMiA Politechniki Wrocławskiej*. Nr 52 (1993): s. 83-86.
2. Jermak Cz.J., Rucki M. „Problematyka pomiaru zewnętrznych powierzchni walcowych czujnikami pneumatycznymi”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej (seria Mechanika)*. Nr 63, t. 1 (1997): s. 85-93. ■