

Czesław Janusz JERMAK¹

OCENA DOKŁADNOŚCI FUNKCJI PRZETWARZANIA STATYCZNEGO PNEUMATYCZNYCH PRZETWORNIKÓW DŁUGOŚCI

W związku z wymaganiami dotyczącymi jakości wyrobów, stawiane są coraz większe wymagania dokładności czujników pomiarowych. Spełnienie tych wymagań jest możliwe tylko wtedy, gdy teoretyczny opis funkcji przetwarzania będzie w pełni odpowiadał charakterystykom rzeczywistym. Literatura z zakresu pneumatycznych przetworników długości proponuje szereg metod, jednak obliczenia na podstawie tych metod, porównane z wynikami doświadczeń, dają błąd aproksymacji kilkadziesiąt procent, sięgający nawet 40 %, a w niektórych przypadkach i więcej. Badania wykazały, że zaproponowany algorytm, który w oparciu o wyznaczone parametry krytyczne drugie uwzględnia rzeczywiste straty przepływu, pozwala na aproksymację charakterystyk z błędem poniżej 5 %.

ACCURACY OF THE AIR GAUGE STATIC CHARACTERISTICS APPROXIMATION

The increasing quality of the manufactured details requires increased accuracy of the measuring devices. Those requirements could be met only when the theoretically described function corresponds with the experimental one. The publications on air gauges proposes a range of theoretical approaches, but compared with experimental results, those functions reveal approximation error of tens per cent, up to 40 %, and sometimes even more. The laboratory investigations proved that the proposed approach based on the second critical parameters and real dissipation effect, allows to approximate the static characteristics with inaccuracy lower than 5 %.

1. WSTĘP

Pneumatyczne przyrządy pomiarowe są urządzeniami realizującymi pomiary metodą bezstykową, co jest ich niewątpliwą zaletą. Dzięki temu jest możliwe wykonanie zadań pomiarowych, niewykonalnych innymi metodami np. stykowymi, optycznymi itp. [1]. Stanowią one ważną grupę narzędzi pomiarowych stosowanych w dokładnych pomiarach części maszyn [2], zainteresowanie którymi wzrosło w ostatnim dziesięcioleciu [3]. Są wykorzystywane zarówno w układach kontroli czynnej [4] jak i w systemach biernej kontroli wymiaru i kształtu [5]. W tych ostatnich ze względu na możliwość pomiaru w trudnych warunkach pracy (drżania i zanieczyszczenia) wykazują zdecydowaną przewagę nad przyrządami wykorzystującymi inne zasady pomiaru [6].

Ponadto pneumatyczne przyrządy pomiarowe cechuje [7-9]:

- niezawodność,
- niewrażliwość na zewnętrzne zanieczyszczenia,
- samooczyszczanie strefy pomiaru,
- prosta konstrukcja i niski koszt wytwarzania głowic pneumatycznych,
- łatwa zmiana parametrów metrologicznych,
- wystarczająca w większości zastosowań dynamika.

Współcześnie wytwarzane przyrządy pneumatyczne wyposażone są w specjalizowaną elektronikę umożliwiającą przetwarzanie sygnału pneumatycznego na elektryczny [10], współpracę z komputerem, archiwizację danych, funkcje sterowania zewnętrznymi urządzeniami itp. [11]. Dorównują w tym względzie najnowszym rozwiązaniom przyrządów z czujnikami indukcyjnymi lub optoelektronicznymi [12].

Elementem przejmującym wartość mierzonej wielkości, czyli długości, jest dysza pomiarowa nazywana głowicą pomiarową lub czujnikiem pneumatycznym [6]. Pojęcia te odnoszą się zarówno do prostych głowic służących do pomiaru zmiany promienia (głowica pomiarowa jednopunktowa) jak i średnicówek pneumatycznych. Należy zaznaczyć, że o ile w obszarze konstrukcji pneumatycznych przyrządów pomiarowych nastąpił w ciągu kilkunastu lat wyraźny skok jakościowy, głównie za sprawą zastosowania nowoczesnych przetworników ciśnienia, to obszar badań elementów przepływowych oraz poszukiwania nowych konstrukcji głowic pomiarowych nie uległ rozszerzeniu.

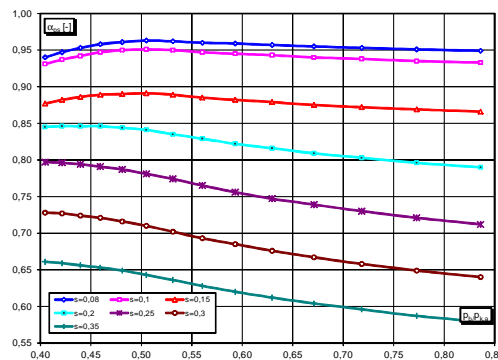
¹ Politechnika Poznańska, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, tel.: 61-6653570, email: czeslaw.jermak@put.poznan.pl

W literaturze przedmiotu brakuje szczegółowej analizy zjawisk przepływowych oraz zaleceń doboru geometrii dysz do konkretnych zadań pomiarowych. Opublikowane zalecenia mają charakter ogólnikowy i nie uwzględniają wielu istotnych czynników metrologicznych [13].

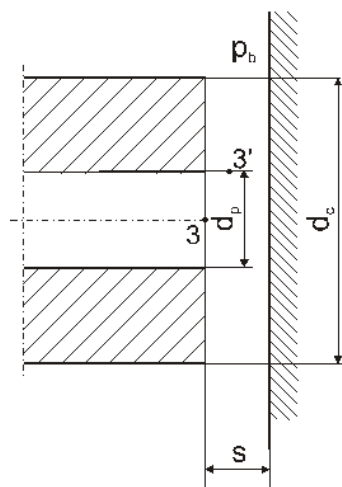
2. PRZEPŁYW POWIETRZA PRZEZ SZCELINĘ POMIAROWĄ

Właściwości przepływowe zespołu dysza pomiarowa – przesłona można opisać za pomocą współczynnika wypływu α_{ps} odpowiadającego współczynnikowi α_w dysz wlotowych [14], zdefiniowanego jako stosunek $\dot{m}_{ps} / \dot{m}_{t,ps}$ rzeczywistego strumienia masy \dot{m}_{ps} do strumienia teoretycznego $\dot{m}_{t,ps}$ charakteryzującego przepływ izentropowy. Na rysunku 1 pokazano przebiegi współczynnika α_{ps} zespołu dysza pomiarowa – przesłona w funkcji ilorazu ciśnień β_a , czyli ilorazu ciśnień absolutnych barometrycznego do kaskadowego, dla dyszy pomiarowej o średnicy $d_p = 1,010$ mm.

Jak widać, przebiegi te nie są jednakowe, i uproszczenie obliczeń poprzez wprowadzenie jednej wartości współczynnika α_{ps} skutkuje zbyt dużymi błędami. Z kolei wyznaczanie przepływu przez każdą dyszę dla poszczególnych szczelin jest uciążliwe i czasochłonne, a matematyczne opisanie otrzymanych zależności wymaga skomplikowanych funkcji. Dlatego też na podstawie analizy danych literaturowych zaproponowano inne podejście opisujące efekty dyssypacyjne między przekrojem, w którym leży punkt 3 (rys. 2), przechodzącym przez otwór wylotowy dyszy pomiarowej, a przekrojem wylotowym ze szczeliny pomiarowej reprezentowanym przez powierzchnię walca o wysokości s i obwodzie wyznaczonym przez średnicę czoła dyszy pomiarowej (punkt 3'). Straty wyrażono przez spadek ciśnienia pomiędzy strefą umiejscowioną w przekroju wylotowym dyszy – reprezentowaną przez punkt 3 – a przestrzenią, w której panuje ciśnienie barometryczne p_b [15].



Rys. 1. Przebiegi współczynnika α_{ps} zespołu dysza pomiarowa – przesłona w funkcji ilorazu ciśnień β_a , $d_p = 1,010$ mm [15]



Rys. 2. Punkty określania prędkości i ciśnienia w szczelinie [16]

Strata ciśnienia Δp_{3-a} w szczelinie opisana jest przez dwa względne współczynniki strat:

$$\zeta_s = \frac{\Delta p_{3-a}}{0,5 \rho_3 v_3^2} = f(X) \quad (1)$$

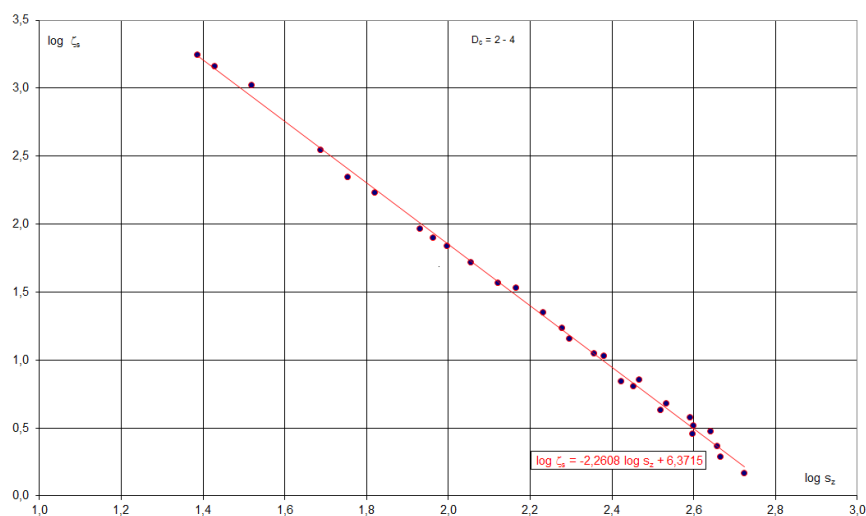
oraz współczynnik pomocniczy służący do uogólnienia strat ciśnienia:

$$\zeta_z = \frac{\Delta p_{3-a}}{P_a} \quad (2)$$

gdzie:

$p_a = p_b$ – ciśnienie atmosferyczne na zewnątrz szczeliny,
 ρ_3 – gęstość powietrza w przekroju wylotowym dyszy.

Stwierdzono, że charakter zależności zmiennych składnikowych strat ciśnienia wyrażonych przez względną szerokość szczeliny $s_z = \frac{2s}{d_p}$ w skali logarymicznej można aproksymować linią prostą (rys. 3), co znacznie upraszcza obliczenia.



Rys. 3. Przebieg zależności zmiennych składnikowych $\zeta_s = f(s_z)$ w skali logarymicznej, $D_c = 2, 3, 4$ [16]

Obliczanie strat przepływu w dyszy wlotowej, w komorze pomiarowej i w zespole dysza pomiarowa – przesłona pozwala na dokładniejsze wyznaczenie teoretyczne charakterystyki statycznej czujnika pneumatycznego niż dotychczas stosowane metody szacunkowe.

3. PRZEGLĄD METOD OBLICZANIA CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH

3.1 Obliczenia na podstawie równań Saint Venanta-Wenzela

W podejściu opartym na równaniach Saint Venanta-Wenzela stosuje się opis zależny od tego, czy na danym elemencie dławiącym wystąpi krytyczny spadek ciśnienia opisany stosunkiem ciśnień absolutnych panujących za i przed elementem dławiącym. Równania wyprowadzone dla czterech możliwych kombinacji krytycznego i dokrytycznego spadku ciśnień na dyszy wlotowej β_w i w szczelinie pomiarowej β_{ps} [17] są przedstawione w tabeli 1.

Ze względów oczywistych jednak zastosowanie dokładnych wzorów jest uciążliwe i czasochłonne, dlatego zaproponowano również wzory uproszczone [17]. Inni autorzy sugerowali pominięcie niektórych stanów przepływu rzeczywistego i obliczenie przepływu np. tylko dla dwóch zakresów pracy: (1) dokrytyczny spadek ciśnienia na dyszy wlotowej i na zespole dysza pomiarowa – przesłona oraz (2) dokrytyczny spadek ciśnienia na dyszy wlotowej i krytyczny na zespole dysza pomiarowa – przesłona [18].

Niektórzy badacze proponowali nawet jednakowe uproszczone wzory dla wszystkich czterech zakresów pracy [19], co nie odzwierciedlało już rzeczywistych warunków przepływu powietrza przez kaskadę pneumatyczną.

Tab. 1. Zależności opisujące charakterystykę statyczną wg wzorów Saint Venanta-Wenzela (za [17])

Zakres pracy	Równanie charakterystyki $\beta_w = f(\beta_{ps}, A_{pw}); \kappa = 1,4$	$\beta_{ps} = \frac{p_a}{p_k}$	$A_{pw} = \frac{C_{ps}}{C_w} \frac{A_{ps}}{A_w}$
I $\beta_w > \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} > \beta_{kr1}$	$\beta_w^2 \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right) - \beta_w \frac{1-\kappa}{\kappa} = \beta_w^2 \left[\left(\frac{A_{pw}}{\beta_w} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{A_{pw}}{\beta_w} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]$	$0,528^2 < \beta_{ps} < 0,528$	$\sqrt{\frac{2}{\kappa+1} \beta_{ps}^2 \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right) - \beta_{ps} \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)} \leq$ $\sqrt{\left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{3-\kappa}{\kappa}} - \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}}$ $\leq A_{pw} \leq \frac{2}{\kappa+1} \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right) - \frac{2}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa-1} \right)$ $\left(\frac{2}{\kappa+1} \right) \beta_{ps}^{\frac{2}{\kappa}} - \beta_{ps}^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}$
		$0,528^2 < \beta_{ps} < 1$	$0 \leq A_{pw} \leq \infty$
II $\beta_w > \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} > \beta_{kr1}$	$\left\{ \sqrt{\left[\frac{A_{pw} \beta_{ps}^{\left(\frac{\kappa+1}{\kappa} \right)} - \beta_{ps}^{\left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)} \right]^2 + \beta_{ps}^{\frac{2}{\kappa}} - \frac{A_{pw}^2 \beta_{ps}^{\left(\frac{\kappa+1}{\kappa} \right)}}{2 \left(\frac{\kappa-1}{\kappa+1} \right) \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} \right\}^{\left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)}$	$0 < \beta_{ps} < 0,528^2$	$0,528 \leq A_{pw} \leq \infty$
		$0,528^2 < \beta_{ps} < 0,528$	$\sqrt{\frac{\left(\frac{1-\kappa}{\kappa+1} \right) \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{3-\kappa}{\kappa}}}{\frac{2}{\kappa+1} \beta_{ps} - \beta_{ps}^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \leq A_{pw} \leq \infty$
III $\beta_w > \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} < \beta_{kr1}$	$\left[0,5 + \sqrt{0,25 + \left(\frac{1-\kappa}{\kappa+1} \right) \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{1-\kappa}} A_{pw}^2} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$	$0 < \beta_{ps} < 0,528$	$0 \leq A_{pw} \leq 1/0,528$
		$0,528^2 < \beta_{ps} < 0,528$	$0 \leq A_{pw} \leq \sqrt{\frac{2}{\kappa+1} \beta_{ps}^2 \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right) - \beta_{ps} \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)}$ $\frac{\kappa-1}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{3-\kappa}{\kappa}}$
IV $\beta_w < \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} < \beta_{kr1}$	$\beta_w = \frac{1}{A_{pw}}$	$0 < \beta_{ps} < 0,528$	$\frac{1}{0,528} \leq A_{pw} \leq \frac{0,528}{\beta_{ps}}$

3.2. Wzory dla zmniejszonych komór

W praktyce coraz częściej mają zastosowanie kaskady pneumatyczne, w których komora pomiarowa ma niewielkie rozmiary. W tej sytuacji można zastosować wzory oparte na stosunkach ciśnień przed i za elementem dławiącym. Zastosowanie tych wzorów wprawdzie pomija zakresy pracy związane z przepływem krytycznym, jednak napotyka na poważną trudność z wyznaczeniem wspomnianego w rozdziale 2 współczynnika wypływu powietrza α_{ps} , dlatego też obok nich zaproponowano wzory (tab. 2) pozwalające na obliczenie przybliżone [18].

Tab. 2. Zależności przybliżone opisujące charakterystykę statyczną kaskady pneumatycznej [16]

Zakres pracy	Równanie charakterystyki	Oznaczenia
I $\beta_w > \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} > \beta_{kr1}$	$y = \sqrt{\frac{bx^2 - \left(1 + \frac{1}{F}\right) \left(1 + \frac{2}{F}\right)}{2 \left(1 + \frac{1}{F}\right)^2}} + \frac{(bx)^2 - \frac{1}{F} \left(1 + \frac{1}{F}\right)}{\left(1 + \frac{1}{F}\right)^2} - \frac{bx^2 - \left(1 - \frac{1}{F}\right) \left(1 + \frac{2}{F}\right)}{2 \left(1 + \frac{1}{F}\right)^2}$	$F = \frac{1}{2\alpha_w^2 \frac{A_w}{A_k} \left(1 - \frac{A_w}{A_k}\right)} - 1$
III $\beta_w > \beta_{kr1}$ $\beta_{ps} < \beta_{kr1}$	$y = \frac{1}{1 + \frac{F}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{F+1}}\right)}$	

3.3. Analiza porównawcza metod obliczeniowych

W celu porównania omówionych metod obliczeniowych przeprowadzono badania rzeczywistych charakterystyk statycznych uzyskanych na stanowisku opisanym w pracy [16]. Po zmierzeniu wartości ciśnienia kaskadowego p_k odpowiadających zadanym szerokościom szczeliny pomiarowej s program oblicza następujące wartości dotyczące charakterystyki statycznej badanego przetwornika:

- **SrBl** – błąd nieliniowości wyznaczany metodą najmniejszych kwadratów, obliczony ze wzoru:

$$SrBl = \frac{2s_y}{p_{k \max} - p_{k \min}} 100\% \quad (3)$$

gdzie: $p_{k \max}$, $p_{k \min}$ – początkowa i końcowa wartość ciśnienia kaskadowego na badanym odcinku charakterystyki statycznej,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{k_i} - \hat{p}_{k_i})^2} \quad (4)$$

gdzie:

p_{k_i} – zmierzona wartość ciśnienia kaskadowego odpowiadającego danej szerokości szczeliny s_i ;

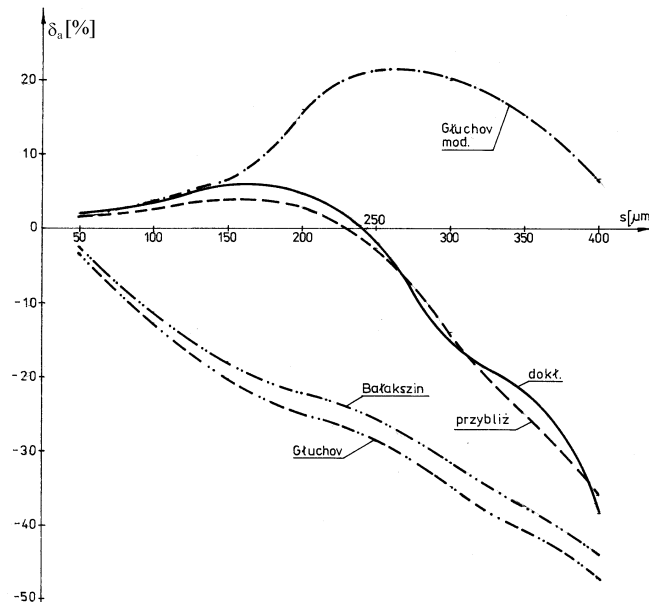
$\hat{p}_{k_i} = a_0 + a_1 s_i$ – obliczona wartość ciśnienia kaskadowego odpowiadającego danej wartości szczeliny s_i

dla prostej o współczynnikach a_0 i a_1 ;

- **MaxBl** – błąd nieliniowości definiowany jako:

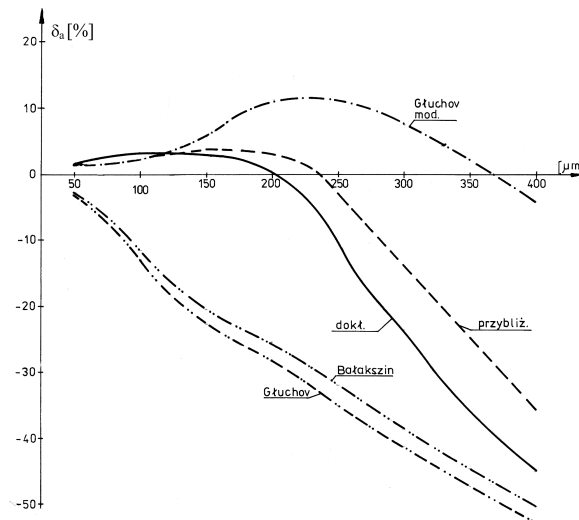
$$MaxBl = \frac{|\Delta p_{k, \max}|}{p_{k \max} - p_{k \min}} 100\% \quad (5)$$

Uzyskana w ten sposób charakterystyka statyczna została porównana z obliczeniową wyznaczoną na podstawie wzorów zaproponowanych w literaturze i omówionych powyżej. Miarą różnicy między wartością rzeczywistą a teoretyczną jest błąd aproksymacji δ_a wyrażony w procentach mierzonej aktualnie wartości ciśnienia kaskadowego. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wartości błędu aproksymacji zależnie od aktualnie mierzonej średnicy pomiarowej.



Rys. 4. Błąd aproksymacji charakterystyki statycznej metodami zaproponowanymi w literaturze dla czujnika o parametrach: $d_p = 1,518 \text{ mm}$, $d_w = 1,002 \text{ mm}$, $D_c = 4$

Jak widać z powyższych wykresów, błędy aproksymacji sięgają kilkudziesięciu procent, i przeważnie zwiększają się przy większych szczelinach pomiarowych. Można też zauważyć, że obliczenia nie uwzględniają takiego parametru jak unormowana szerokość czoła dyszy pomiarowej $D_c = d_w/d_p$; błędy przeważnie się zwiększają po zmianie czoła dyszy na mniejsze.



Rys. 5. Błąd aproksymacji charakterystyki statycznej metodami zaproponowanymi w literaturze dla czujnika o parametrach: $d_p = 1,518 \text{ mm}$, $d_w = 1,002 \text{ mm}$, $D_c = 2$

4. KOMPLEKSOWE UWZGLĘDNIENIE STRAT PRZEPIYWU

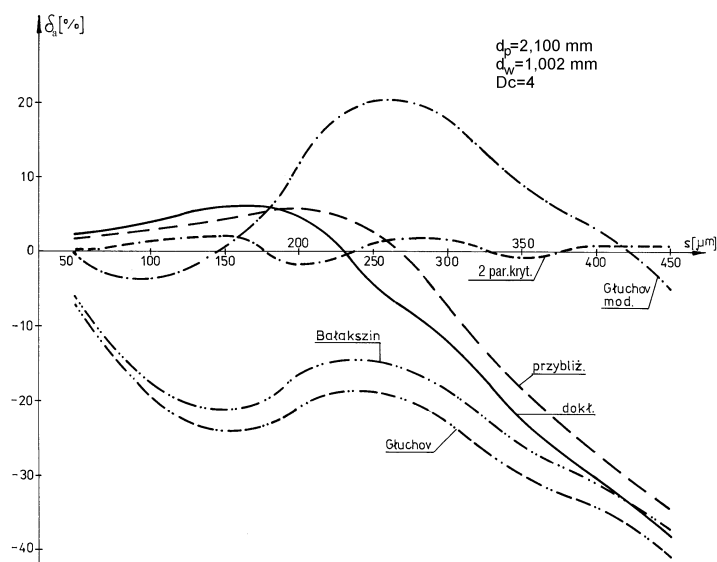
Na podstawie wieloletnich doświadczeń opracowano algorytm wyznaczania strat w elementach przepływowych kaskady pneumatycznej [16] z uwzględnieniem drugich parametrów krytycznych [15]. Algorytm zawiera kilka opcji, które dotyczą:

- wyboru geometrii dysz wlotowej i pomiarowej,
- wyboru z katalogu dysz o znanych drugich parametrach krytycznych a_{kr2} i β_{kr2} ,
- wyboru toku liczenia z uwzględnieniem jako argumentu ciśnienia kaskadowego p_k lub szerokości szczeliny s (wybór ten powoduje, że ciśnienie kaskadowe p_k lub szerokość szczeliny s przybierają wartości całkowite zmieniające się ze stałym krokiem, odpowiednio, od: $p_k = p_z = p_{max}$ do $p_k = p_a$ lub od $s = 0$ do $s = s_{max}$).

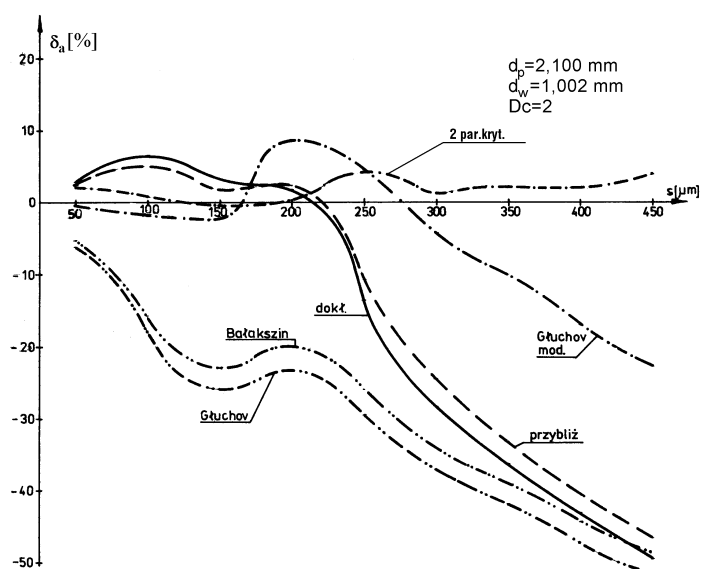
Oprócz tego istnieje możliwość uwzględnienia warunków zasilania i otoczenia (symulacja pracy w warunkach przemysłowych), a także parametrów gazu innego niż powietrze przepływającego przez kaskadę i jego właściwości termodynamicznych.

Wykorzystując współczynnik strat ζ_s w zespole dysza pomiarowa – przesłona opisany wzorem (1), którego zależność od względnej szerokości szczeliny s_z jest pokazana na rysunku 3, algorytm pozwala uzyskać dobre przybliżenie rzeczywistych charakterystyk statycznych. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono błędy aproksymacji tą metodą dla tego samego czujnika z dyszą pomiarową $d_p = 1,518 \text{ mm}$ o szerokości czoła $D_c = 2$, i z dyszą wlotową $d_w = 1,002 \text{ mm}$.

Jak widać z wykresów (rys. 6 i 7), uwzględnienie parametrów krytycznych drugich pozwala przewidzieć przebieg charakterystyki statycznej z błędem aproksymacji nie przekraczającym 5%. Można zauważyć też, że błędy aproksymacji nie ulegają znaczącym zmianom w przypadku różnych szerokości czoła dyszy pomiarowej.



Rys. 6. Błąd aproksymacji charakterystyki statycznej metodami zaproponowanymi w literaturze dla czujnika o parametrach: $d_p = 2,100$ mm, $d_w = 1,002$ mm, $D_c = 4$



Rys. 7. Błąd aproksymacji charakterystyki statycznej metodami zaproponowanymi w literaturze dla czujnika o parametrach: $d_p = 2,100$ mm, $d_w = 1,002$ mm, $D_c = 2$

5. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza proponowanych w literaturze przedmiotu metod aproksymacji charakterystyk statycznych pneumatycznych przetworników długości wykazała, że zarówno dokładne wzory, jak i uproszczone, nie dają możliwości uzyskania dobrego przybliżenia (błędy aproksymacji sięgają 40 %). Badania potwierdziły, że podejście uwzględniające parametry krytyczne drugie i rzeczywiste straty w elementach przepływowych kaskady pneumatycznej pozwala oszacować przebieg charakterystyki statycznej z błędem nieprzekraczającym 5 %.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Grandy D., Koshy P., Klocke F.: *Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces*, „CIRP Annals – Manufacturing Technology”, Vol. 58/1 (2009), s. 515-518.
- [2] Destefani J.: *Air Gaging*, “Manufacturing Engineering”, Vol. 131, Issue 4 (2003), s. 5-9.
- [3] Hennessy R.: *Use air to improve measurements; manufacturers turn to air gaging for high-resolution measurements*, “Quality Magazine”, May 2005, s. 30-33.
- [4] Menzies I., Koshy P.: *In-process detection of surface porosity in machined castings*, “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, Vol. 49, Issue 6 (2009), s. 530-535.
- [5] Jun Liu et al.: *Design and accuracy analysis of pneumatic gauging for form error of spool valve inner hole*, “Flow Measurement and Instrumentation” 23 (2012), s. 26-32.
- [6] Kondaszewski W. W., Lotze W.: *Urządzenia pomiarowo-sterujące obrabiarek*, WNT, Warszawa 1979.
- [7] Goldberg R.: *New Products*, “IEEE Instrumentation and Measurement Magazine” Vol. 12 (2009), s. 54-59.
- [8] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych (wydanie V)*, WNT, Warszawa 2007.
- [9] *Handbook of Measuring System Design*, Vol. 1, ed. by P.H. Sydenham & R. Thorn. Wiley, London 2005.
- [10] Jaskólska Z., Jermak Cz. J., Rucki M.: *Development of the Air Gauges Integrated with Dimensional Inspection Systems*, “Strojárská Technologie”, R. XII (2007), s. 102-105.
- [11] Rucki M., Barisic B., Varga G.: *Air Gauges as a Part of the Dimensional Inspection Systems*, “Measurement” Vol. 43, Issue 1 (2010), s. 83-91.
- [12] Schuetz G.: *Air Gaging Gets Better with Age*, “Quality Magazine”, 3 (2008), p. 28-32.
- [13] Zelczak A.: *Pneumatyczne pomiary długości*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [14] *Theory and Practice of Air Gauging*, ed. by Cz. J. Jermak, Poznan University of Technology, Poznań 2011.
- [15] Jermak Cz. J., Rucki M.: *Air Gauging: Static and Dynamic Characteristics*, IFSA, Barcelona 2012.
- [16] Jermak Cz. J.: *Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [17] Soboczyński R. J.: *Badania właściwości metrologicznych wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych*. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1978.
- [18] Балакшин О. Б.: *Автоматизация пневматического контроля размеров в машиностроении*. Изд-во Машиностроение, Москва 1964.
- [19] Глухов В. И.: *Расчет характеристик пневматических систем высокого давления для измерения размеров*, «Измерительная техника», № 6 (1971), s. 107.