

Mirosław RUCKI¹

ZMIENNOŚĆ STAŁEJ CZASOWEJ W CZASIE POMIARU CZUJNIKIEM PNEUMATYCZNYM

Pomiar bezstykowy czujnikami pneumatycznymi wciąż znajduje zastosowanie w przemyśle, głównie w układach kontroli czynnej. W tych warunkach bardzo istotne są ich właściwości dynamiczne, zależne od geometrii elementów przepływowych oraz od aktualnego ciśnienia w komorze pomiarowej. Badania wykazały, że przy mniejszych ciśnieniach odpowiadających szerszym szczelinom pomiarowym, stała czasowa wzrasta, w niektórych przypadkach nawet o 100%. Nieuwzględnienie tego faktu może doprowadzić do zwiększenia błędów pomiaru właśnie w końcowej fazie obróbki.

VARIATIONS OF THE TIME CONSTANT WITHIN THE MEASURING RANGE OF AN AIR GAUGE

Non-contact measurement with the air gauges still takes place in industry, mainly in the in-process inspection. In such work conditions, their dynamic characteristics shaped by geometry of the air gauge and dependent on the actual measuring pressure become of great importance. The investigations proved that when the pressure in the chamber is lower, which corresponds with larger measured slots, the time constant increases, sometimes even up to 100%. If this phenomenon is neglected, the final stage of the machining could bear much larger error than expected.

1. WSTĘP

Jakość urządzeń i wyrobów produkowanych i sprzedawanych na całym świecie na kwotę dziesiątków miliardów EURO bezpośrednio zależy od narzędzi i technik pomiarowych [1]. Wymagania jakościowe, stawiane wyrobom, wymuszają na producentach ciągłe zwiększanie dokładności pomiarów, w związku z czym rozwój metrologii dąży w kierunku pomiarów w skali mikro i nanometrów [2], a także pomiarów wielkości subatomowych [3]. Czujniki pneumatyczne, w których miara długości jest przetwarzana na charakterystykę przepływającego powietrza, w sposób oczywisty nie są w stanie osiągnąć takich wyników, mimo to wciąż znajdują zastosowanie w pomiarach precyzyjnych w przemyśle [4], zwłaszcza w układach regulacji automatycznej [5], kontroli czynnej [6], oraz w pomiarach nietypowych elementów, jak np. długie mikrootwory [7].

Już w latach 70. XX istniała cała gamma różnorodnych konstrukcji bezkontaktowych czujników pneumatycznych [8]. Podstawowe zastosowania, parametry i błędy czujników pneumatycznych zostały ujęte w normie [9], później zaktualizowanej [10]. Wprowadzono układy różnicowe i mostkowe, które zmniejszyły wrażliwość czujnika pneumatycznego na wahania ciśnienia zasilania oraz zmiany temperatury [11]. Prowadzono też badania mające na celu optymalizację właściwości dynamicznych czujników pneumatycznych [12], które są przedmiotem zainteresowania niniejszego artykułu.

2. BŁĄD DYNAMICZNY

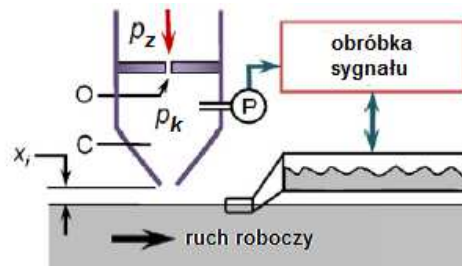
2.1. Określanie właściwości dynamicznych czujników pneumatycznych

Dynamiczne właściwości czujników pneumatycznych są uważane za jedno z poważniejszych ograniczeń w ich zastosowaniu, dlatego doskonalenie tych urządzeń jest związane przede wszystkim z polepszeniem charakterystyki dynamicznej [13]. Do analizy przepływu powietrza przez komorę pomiarową w warunkach niestabilnych wykorzystano model $k-\varepsilon$ [14].

Błąd dynamiczny, nazywany „niepewnością odpowiedzi” może być traktowany jako część składowa ogólnej niepewności pomiarów [15]. Literatura przedmiotu rozróżnia pełną a częściową charakterystyką dynamiczną [16]. Pełna charakterystyka dotyczy zmian sygnału wyjściowego w wyniku zmiany sygnału na wejściu do systemu, jak to ma miejsce w pneumatycznym przetworniku do pomiarów długości (wejściem jest szerokość szczeliny, wyjściem zmierzona wartość ciśnienia przeliczona na jednostki długości). Charakterystyka częściowa

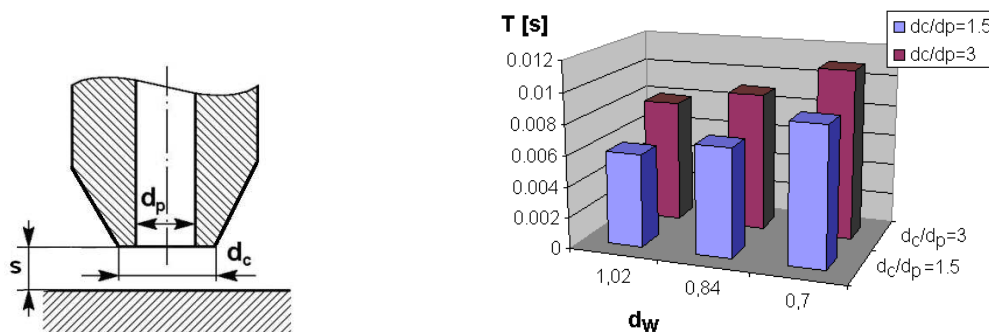
¹ Politechnika Poznańska, adres do korespondencji: Wydawnictwo „Agape”, ul. Panny Marii 4, 60-962 Poznań, tel. 797 002 539, e-mail: miroslaw.rucki@gmail.com

dotyczy komponentów systemu, w tym przypadku przede wszystkim przetwornika ciśnienia. W praktyce jednak błędy dynamiczne są rzadko znane, dlatego rzeczywisty błąd pomiaru może kilkakrotnie przewyższać wartość przewidywaną [17]. Przykładowo, omawiając pneumatyczną metodę pomiaru chropowatości (rys. 1) autorzy pomijają analizę błędów dynamicznych zaznaczając, że ich wartość została określona na podstawie geometrii czujnika [18].



Rys. 1. Pneumatyczny pomiar chropowatości [18].

Jednak takie zgrubne oszacowanie nie uwzględnia wielu czynników, m.in szerokości czoła dyszy pomiarowej określanej jako stosunek jej średnicy zewnętrznej d_c do średnicy otworu d_p (rys. 2a). Jak wynika z danych eksperymentalnych, wielkość ta również wpływa na właściwości dynamiczne czujnika (rys. 2b), a mimo to nie jest uwzględniana. Stała czasowa czujnika pneumatycznego z reguły jest nieco większa w przypadku szerszego czoła (zachowując wszystkie inne parametry bez zmian), i dotyczy to różnych kombinacji dysz wlotowej i pomiarowej [19].



Rys. 2. Różnice stałej czasowej dla czujników o różnej szerokości czoła ($d_p=1,800$ mm) [19].

W sytuacji, kiedy w czujnikach pneumatycznych zastosuje się przetworniki piezorezystancyjne o stałej czasowej poniżej 0,1 ms, wpływ charakterystyk częściowych elementów systemu pomiarowego jest na tyle niewielki, że można skoncentrować się na badaniach pełnej dynamicznej charakterystyki systemu [20]. Z użytkowego punktu widzenia, najbardziej przydatna dla operatora jest informacja, przy jakiej częstotliwości wymuszenia błąd pomiaru nie przekroczy określonej wartości. Mając na uwadze ogólnie przyjętą akceptowalną wielkość błędu 5 %, wyznacza się częstotliwość $f_{0,95}$ i/lub odpowiadającą jej pulsację $\omega_{0,95}$, przy której nie zostanie przekroczony pięcioprocentowy błąd pomiaru [21]. Ze względów praktycznych, związanych z pomiarem ciągłym w czasie obróbki elementów obrotowych, jak również podczas pomiaru takich parametrów jak bicie lub błędy okrągłości, należy uwzględnić czas ustalenia t_u czujnika pneumatycznego, natomiast prędkość obrotowa musi uwzględniać właściwości amplitudowo-częstotliwościowe czujnika [22].

2.2. Korekcja błędu dynamicznego

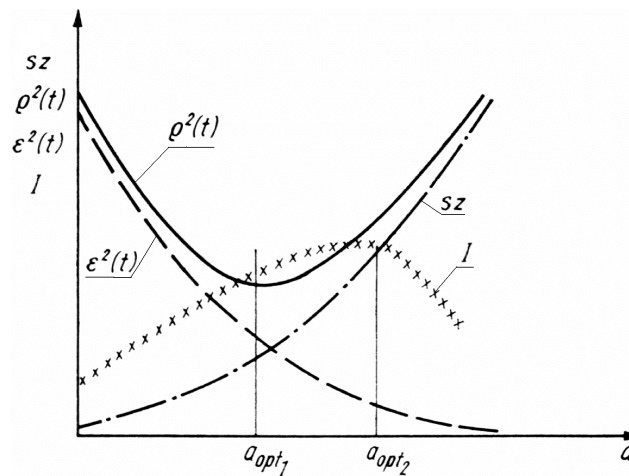
Jeśli dynamika czujnika pomiarowego jest znana i zbliżona do członu inercyjnego pierwszego rzędu, możliwa jest prosta kompensacja w układzie szeregowym [23] lub za pomocą zmodyfikowanego członu różniczkującego [24]. W wirtualnym Centrum Obróbkowo-Pomiarowym (ang. *Virtual Machining and Measuring Center*) modeluje się również system pomiarowy w celu przeanalizowania możliwych błędów obróbki i pomiarów na etapie projektowania [25], a w symulacjach obrabiarek CNC jest uwzględniany błąd dynamiczny [26].

Problem korekcji dynamicznej można przedstawić graficznie (rys. 3). W danym przypadku zastosowano korekcję według algorytmu średniokwadratowego błędu całkowitego $\rho^2(t) \rightarrow \min$ i wykazano, że korekcja optymalna a_{opt2} uwzględniająca przepływ informacji jest większa niż a_{opt1} [27]. Dlatego też Woźniak zaproponował jako kryterium optymalizacji przepływ informacji [28]:

$$I = -f^2 \log \varepsilon^2 \rightarrow \max \quad (1)$$

gdzie:

I – przepływ informacji,
 ε – błąd dynamiczny.

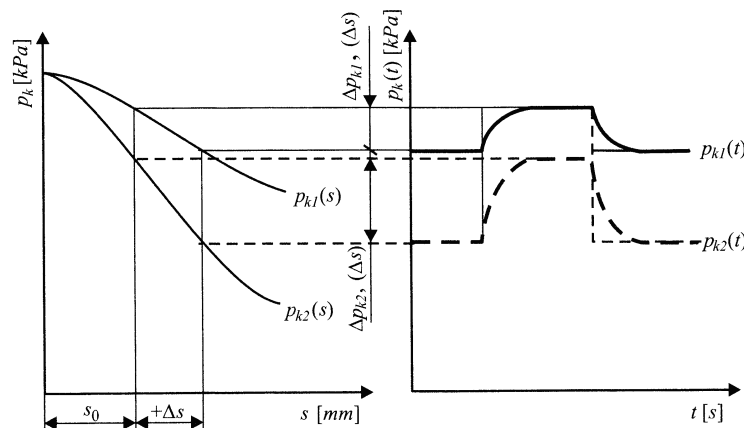


Rys. 3. Przebiegi funkcji błędów dynamicznego $\varepsilon^2(t)$ i całkowitego $\rho^2(t)$ oraz szumu sz i przepływu informacji I w zależności od korekcji a [27]

Najbardziej powszechnie używa się elementów korekcyjnych, które są kombinacjami członów o działaniu różniczkującym i inercyjnym, o postaci transmitancji:

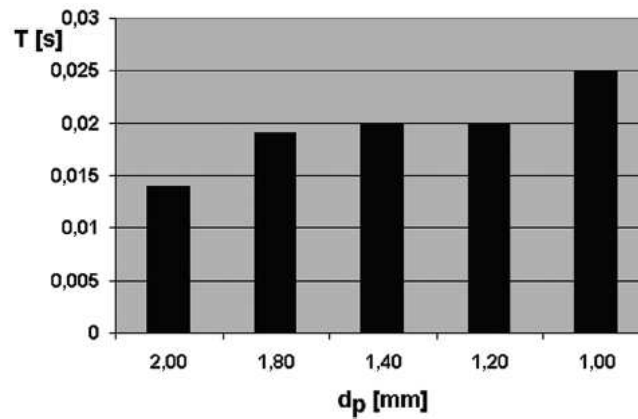
$$\frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}, \quad (2)$$

przy czym wnoszone wyprzedzenie i opóźnienie fazy mają związek z charakterystykami częstotliwościowymi [29]. Układ korekcyjny błędów dynamicznych został skutecznie zastosowany w czujniku pneumatycznym dwukaskadowym [30].



Rys. 4. Zmiany ciśnienia w czujniku po skokowej zmianie szczeliny pomiarowej [31]

Na rysunku 4 [31] przedstawiono pracę czujnika w stanie nieustalonym: skokowa zmiana szczeliny pomiarowej Δs (lewy wykres) powoduje zmianę ciśnienia $p(t)$ (prawy wykres), zależną od przebiegu charakterystyki statycznej $p_k(s)$. Uważa się, że stała czasowa jest proporcjonalna do czułości statycznej przetwornika pneumatycznego [12]. Jednak dane doświadczalne wskazują na coś innego: jeśli czujnik pneumatyczny A ma taką samą czułość jak czujnik B, ale przepływ masy powietrza przez czujnik A jest mniejszy (mniejsze dysze pomiarowa i wlotowa), to stała czasowa czujnika A będzie większa [32]. Widać to na wykresie (rys. 5) stałej czasowej dla czujników o różnych przepływach masowych, przy czułości zbliżonej do $K=1,0$ kPa/ μm .



Rys. 5. Wartości stałej czasowej dla różnych czujników o czułości zbliżonej do $K = 1,0 \text{ kPa}/\mu\text{m}$ [32]

2.3. Czynniki warunkujące błąd dynamiczny

Generalnie błąd dynamiczny czujnika pneumatycznego będzie wzrastał wraz z czułością statyczną K i wzrostem stałej czasowej. Różnica w warunkach przepływu powietrza pomiędzy poszczególnymi punktami charakterystyki statycznej powoduje, że czas przejścia ciśnienia kaskadowego z wartości $p_k(s_0)$ do wartości $p_k(s_0 + \Delta s)$ może być inny w zależności od wartości s_0 [33]. Wynika to również z rozważań przedstawionych w [34], gdzie stała czasowa dla mniejszych początkowych nadciśnień p_0 jest inna niż dla wyższych, według proporcji:

$$T = \frac{1}{M} \left(1 - \frac{p_a}{p_0} \right), \quad (3)$$

gdzie:

- M – współczynnik proporcji,
- p_a – ciśnienie atmosferyczne,
- p_0 – nadciśnienie początkowe.

Znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości dynamicznych odgrywa linia transmisji sygnału pneumatycznego [35]. Figliola i Beasley [36] podają uproszczony wzór opisujący właściwości dynamiczne kaskady pneumatycznej, uwzględniający ściśliwość powietrza:

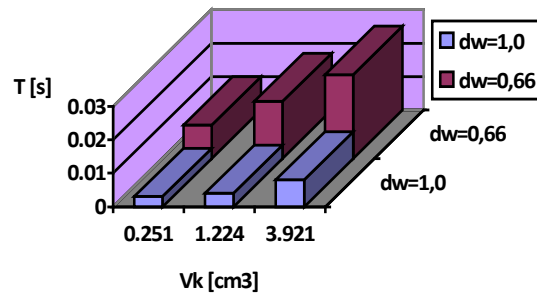
$$\frac{4L\rho V_k}{\pi E_m d^2} \ddot{p}_m + \frac{128\mu L V_k}{\pi E_m d^4} \dot{p}_m + p_m = p(t) \quad (4)$$

gdzie:

- L – współczynnik proporcji,
- d – średnica króćca transmisyjnego,
- p_m – ciśnienie mierzone wewnątrz komory przetwornika,
- V_k – objętość komory przetwornika,
- p – ciśnienie przyłożone (zaaplikowane),
- E_m – moduł sprężystości płynu (powietrza).

Ze wzoru (4) wynika, że dynamika czujnika pneumatycznego w znacznej mierze zależy od długości i średnicy linii transmisji (stała czasowa jest proporcjonalna L/d^4) [37]. Znajduje to odzwierciedlenie również w danych technicznych urządzeń pomiarowych. Dla przykładu, urządzenie Millimar S1840PE, według danych katalogowych [38] zapewnia czas ustalenia rzędu 0,3 sekundy oraz 0,5 s dla długości przewodu odpowiednio 1 i 2 m.

Analogicznie, objętość samej komory pomiarowej ma bezpośredni wpływ na dynamikę czujnika pneumatycznego. W literaturze można spotkać konstrukcje czujników pneumatycznych o małej komorze, dających możliwość zmniejszenia stałej czasowej do kilku ms [39]. Rys. 6 pokazuje eksperymentalną zależność stałej czasowej od objętości komory pomiarowej dla czujników z dyszą pomiarową $d_p=1,00 \text{ mm}$ współpracującą z dyszą wlotową $d_w=1,00 \text{ mm}$ (czułość takiego czujnika wynosi $K=0,23 \text{ kPa}/\mu\text{m}$) oraz $d_w=0,66 \text{ mm}$ ($K=0,97 \text{ kPa}/\mu\text{m}$).



Rys. 6. Wartości stałej czasowej dla czujników z dyszą pomiarową $d_p=1,00$ mm przy różnych objętościach komór pomiarowych v_k

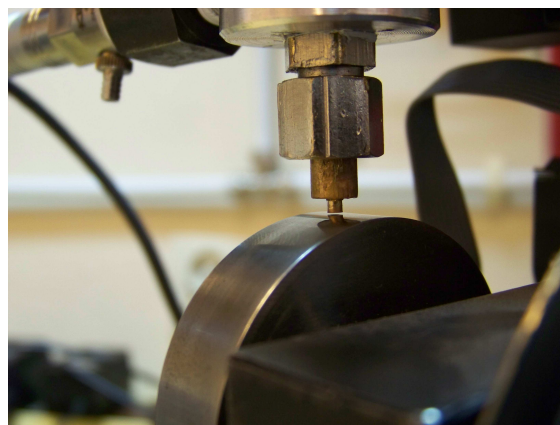
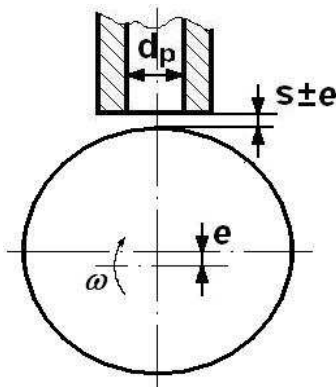
3. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK DYNAMICZNYCH

Eksperymentalnie stałą czasową T można wyznaczyć dzięki wzajemnej zależności pomiędzy charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową a stałą czasową [40]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1 - A^2(\omega)}{A^2(\omega)}}{\sum_{i=1}^n \left(\omega \sqrt{\frac{1 - A^2(\omega)}{A^2(\omega)}} \right)} \quad (5)$$

gdzie $A(\omega) = \frac{A(\omega)}{A(\omega_0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}$ jest stosunkiem amplitudy dla kolejnej częstotliwości wymuszenia do amplitudy odpowiadającej stanowi ustalonemu.

Zależność (5) została wykorzystana do badania właściwości dynamicznych czujników różnej konstrukcji na stanowisku pomiarowym generującym wymuszenie sinusoidalne (rys. 7). Z różnych możliwości generowania sygnału okresowego wybrano realizację wymuszenia amplitudowo-częstotliwościowego zrealizowane za pomocą mimośrodków, umieszczonych przed dyszą pomiarową. W czasie obrotu mimośrodów ze znaną prędkością n_{obr} szczelina pomiarowa zmienia swoją szerokość s o wartość $2e$ (rys. 4, 5). Średnica wałka mimośrodkowego wynosi $\varnothing 50,000$ mm.



Rys. 6. Stanowisko generujące wymuszenie sinusoidalne [20]

W skład stanowiska pomiarowego do wyznaczenia charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych wchodzi komputer wyposażony w odpowiednie oprogramowanie pomiarowo-sterujące, połączonego z układem napędowym, wymuszającym obroty mimośrodów [21]. Zebrane dane ulegają procesowi obróbki według następujących procedur [41]:

- wygładzanie sygnału,
- wyznaczenie częstotliwości przebiegów analizowanego sygnału,
- wyznaczenie amplitud przebiegów analizowanego sygnału,
- wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowo-amplitudowej,

- aproksymacja charakterystyki do początku układu współrzędnych,
- wyznaczenie stałej czasowej.

Niepewność rozszerzona wyznaczenia stałej czasowej badana metodą A, dla poziomu ufności $p = 0,95$, wynosi $U_{0,95} = 0,0022$ s, a współczynnik otrzymany w wyniku analizy wariancji dla poziomu ufności 99% wynosi $EV = 0,0043$ [20].

W wyniku obróbki otrzymanych wyników, uzyskuje się charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową. Zbudowana na jej podstawie amplitudowa charakterystyka logarymiczna $A(\omega) = A/A_0$ jest zbliżona do charakterystyki członu inercyjnego pierwszego rzędu.

Kąt przesunięcia fazowego można obliczyć metodą przejścia przez zero (*zero-crossing method*) [42]. Opóźnienie fazowe dla systemu hydraulicznego oblicza się następująco [36]:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{N_1 \omega}{1 - N_2^2 \omega^2} \quad (6)$$

gdzie:

$$N_1 = \frac{8\pi\mu l_{\Sigma} V_{\Sigma}}{k_s f^2};$$

$$N_2^2 = \frac{l_{\Sigma} \rho V_{\Sigma}}{k_s f};$$

- ω – pulsacja,
- f – częstotliwość drgań,
- μ – współczynnik lepkości dynamicznej,
- ρ – gęstość,
- l_{Σ} – długość sumaryczna przewodów,
- V_{Σ} – objętość sumaryczna systemu,
- k_s – współczynnik ściśliwości.

Dla członu inercyjnego pierwszego rzędu [36]:

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}(\omega T) \quad (7)$$

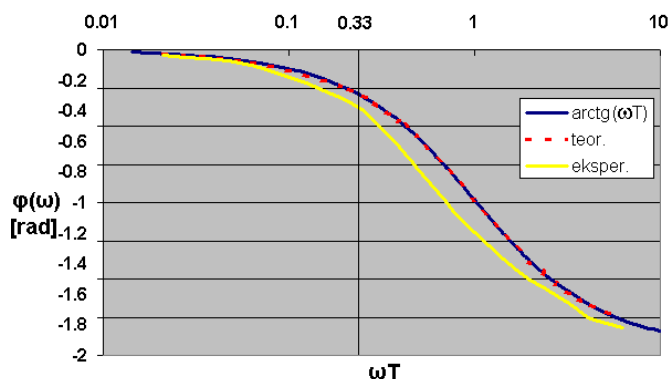
oraz

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \quad (8)$$

Zatem odpowiedź na wymuszenie sinusoidalne można opisać wzorem:

$$y(t) = C e^{-t/T} + \frac{KA}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \sin[\omega t - \varphi(\omega)] \quad (9)$$

Wykres przebiegu opóźnienia fazowego, obliczonego ze wzoru (7), przedstawiono na rysunku 7 w zestawieniu z przebiegami, obliczonymi ze wzoru (8) dla wartości teoretycznych i uzyskanych eksperymentalnie.



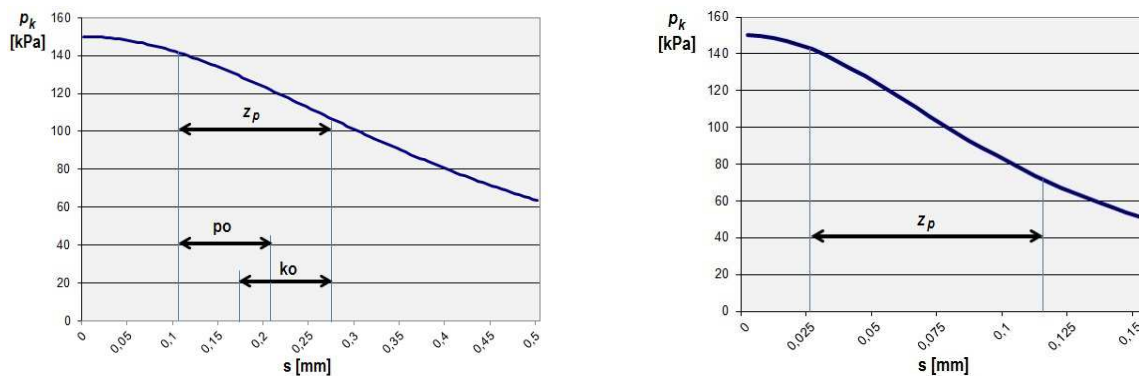
Rys. 7. Przebieg charakterystyki fazowej czujnika o stałej czasowej $T = 0,020$ s [43]

Wprawdzie przebieg doświadczalny w sposób widoczny różni się od teoretycznego, jednakże częstotliwość powodująca 5% błąd amplitudy wynosi $f_{0,95} = 2,6$ Hz, co odpowiada pulsacji $\omega = 16,3$ rad/s oraz $\omega T = 0,33$ rad. Na tej podstawie można uznać, że dla częstotliwości pracy czujnika pneumatycznego (czyli mniejszych niż $f_{0,95}$)

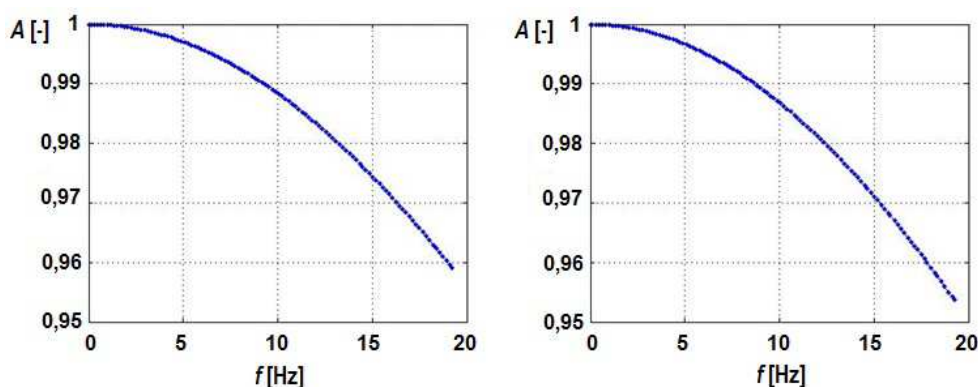
przesunięcie fazowe jest zbliżone do przesunięcia fazowego członu inercyjnego pierwszego rzędu. W tym punkcie eksperymentalna charakterystyka fazowa odbiega od charakterystyki teoretycznej o niecałe 8%. Zatem uzyskane wyniki potwierdzają możliwość aproksymowania właściwości dynamicznych badanych czujników pneumatycznych jako członu inercyjnego pierwszego rzędu.

4. ZMIENNOŚĆ STAŁEJ CZASOWEJ

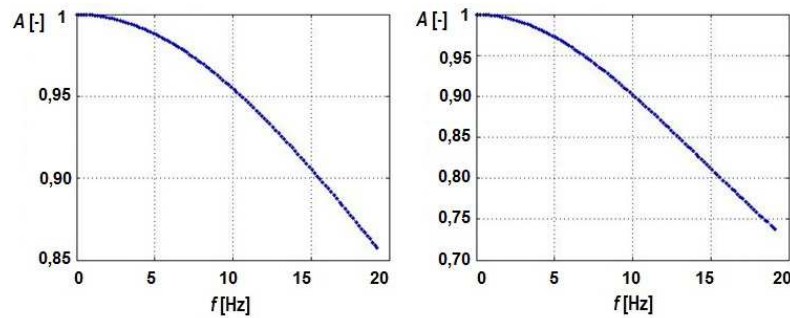
Niezwykle ważne dla poprawnego pomiaru, a w konsekwencji prawidłowego sterowania procesem w układach kontroli czynnej, jest zależność stałej czasowej od wielkości ciśnienia pomiarowego p_k , czyli od szerokości szczeliny pomiarowej s . Oznacza to, że w czasie pomiarów szczeliny zmieniającej się w czasie stała czasowa T również będzie ulegała zmianom. Na drodze eksperymentów z wymuszeniem sinusoidalnym stwierdzono, że kiedy pomiary są wykonywane w końcowej części zakresu pomiarowego (odpowiadającej niższym wartościom ciśnienia p_k), stała czasowa jest większa. Na rysunku 8 pokazano charakterystyki statyczne z zaznaczeniem początkowego (po) i końcowego (ko) zakresu wielkości s , w którym zachodziły zmiany o charakterze sinusoidalnym (wymuszenie sinusoidalne). Przebieg charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przy mniejszych komorach (poniżej 1 cm^3) niewiele się różni dla początkowego i końcowego odcinka zakresu pomiarowego (rys. 9), jednak przy większych komorach (kilku cm^3) ta różnica staje się znaczna (rys. 10). Oznaczenia badanych czujników, ich czułość K oraz średnice dysz pomiarowej d_p i wlotowej d_w , a także objętości komór v_k są podane w tabeli 1.



Rys. 8. Określenie początkowej (po) i końcowej (ko) części zakresu pomiarowego



Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa $A(f)$ dla zestawu 2D2 z komorą pomiarową o objętości $v_k = 0,402 \text{ cm}^3$: a) w początkowej części zakresu pomiarowego (po), b) w końcowej części zakresu (ko)

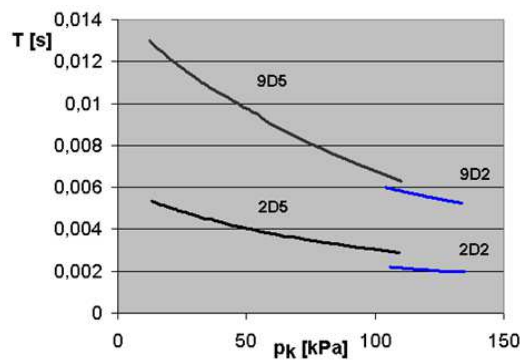


Rys. 10. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa $A(f)$ dla zestawu 9D2 z komorą pomiarową o objętości $v_k = 3,921 \text{ cm}^3$: a) w początkowej części zakresu pomiarowego (p_0), b) w końcowej części zakresu (k_0)

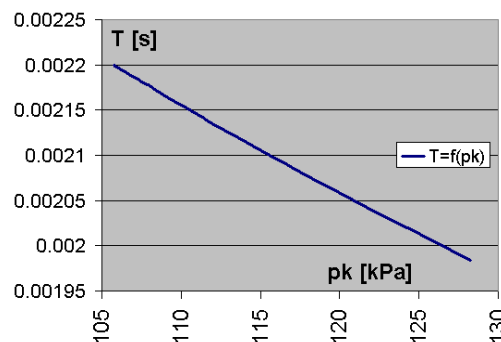
Tab. 1. Parametry badanych czujników [20]

Nr	d_p [mm]	d_w [mm]	K [kPa/ μm]	v_k [cm^3]
2D2	1,200	1,200	0,15	0,402
9D2	1,200	1,200	0,15	3,921
2D5	1,200	0,625	0,88	0,402
9D5	1,200	0,625	0,88	3,921

Przekładając tę obserwację na wartości stałej czasowej (rys. 11), możemy zauważyć, że czujnik pneumatyczny o większej czułości i mniejszym zakresie pomiarowym (oznaczony w tab. 1 jako 2D2) wykazuje najmniejszą zmienność stałej czasowej, podczas gdy dla zestawu 9D5 (duży zakres pomiarowy i duża objętość komory v_k) stała czasowa wzrasta o 100%. Zależność stałej czasowej od aktualnie mierzonego ciśnienia dla zestawu 2D2 pokazano na rysunku 12.



Rys. 11. Zmienność stałej czasowej T w zależności od aktualnego ciśnienia kaskadowego p_k



Rys. 12. Przebieg funkcji $T=f(p_k)$ dla zestawu 2D2 [20]

5. WNIOSKI

Dynamiczne właściwości czujników pneumatycznych są uznawane za jedno z ważniejszych ograniczeń w ich stosowaniu i rozwoju. Badania jednak wykazują, że zastosowanie czujników piezorezystancyjnych oraz zmniejszonych komór pomiarowych i skróconych linii transmisji sygnału pneumatycznego znacząco polepsza dynamikę czujników.

Badania potwierdziły, że czujnik pneumatyczny może być traktowany jako człon inercyjny pierwszego rzędu. Należy jednak brać pod uwagę, że wartość stałej czasowej czujnika zależy od aktualnego ciśnienia w komorze pomiarowej, czyli zmienia się wraz ze zmianą szerokości mierzonej szczeliny. Ma to ogromne znaczenie dla układów kontroli czynnej operacyjnej, gdzie pomiar jest wykonywany w czasie obróbki ubytkowej. Największy błąd dynamiczny czujnika pneumatycznego zostanie osiągnięty pod koniec obróbki, kiedy szczelina pomiarowa jest największa, a ciśnienie najmniejsze (końcowa część zakresu pomiarowego). Jest to obszar najbardziej odpowiedzialny, gdyż właśnie wtedy wynik pomiaru decyduje o przełączeniu układu sterującego. Przyjęcie uśrednionej wielkości stałej czasowej może prowadzić do błędów dynamicznych nawet o 50% większych niż się szacuje.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Osanna H.: *Metrology in general and form measurements for applications in modern industry, for medical applications and for technological development*. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2007.
- [2] Ramsden J.J., Freeman J.: *The nanoscale*. "Nanotechnology Perceptions", Vol. 5, nr 1 (2009), s. 3-26.
- [3] Mazzeo A.D. et al.: *Atomic force microscope for accurate dimensional metrology*. "Precision Engineering", Vol. 33 (2009), nr 2, s. 135-149.
- [4] Hennessy R.: *Use air to improve measurements; manufacturers turn to air gaging for high-resolution measurements*, "Quality Magazine" (May 2005), s. 30-33.
- [5] Wiczorkowski S.: *Automatyczna regulacja prędkości obrotów wrzecion napędzanych mikroturbinami pneumatycznymi*. Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 703, Łódź 1995.
- [6] Shiraishi M., Yasui A.: *In-process Measurement of Dimensional Error for stepped workpiece profile*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, nr 120 (1998), s. 202-206.
- [7] Jablonski R.: *Measurement of Extremely Long Microbores by Application of Laser Metrology*, "Measurement", Vol. 28 (2000), s. 139-145.
- [8] Сентяков Б.А., Исупов Г.П.: *Классификация бесконтактных пневматических датчиков положения*. «Станки и инструмент» № 1 (1977), s. 27-28.
- [9] DIN-2271, *Pneumatische Längenmessung*. Nov. 1977.
- [10] DIN-2271-3, *Pneumatische Längenmessung*. Feb. 2000.
- [11] Kondaszewski W.W., Lotze W.: *Urządzenia pomiarowo-sterujące obrabiarek*. WNT, Warszawa 1979.
- [12] Педь Е.И.: *Оптимизация выбора конструктивных элементов пневматических преобразователей при динамических измерениях*. «Измерительная техника», № 7 (1981), s. 29-31.
- [13] Волков А.Л., Серко А.Л.: *Пути улучшения метрологических характеристик пневматических приборов активного контроля*. «Измерительная техника», № 10 (1980), s. 24-26.
- [14] Jermak Cz.J., Spyra A., Rucki M.: *Mathematical model of the dynamic work conditions in the measuring chamber of an air gauge*, "Metrology and Measurement Systems", Vol. XIX, nr 1 (2012), s. 29-38.
- [15] Hessling J.P.: *A novel method of estimating dynamic measurement errors*. "Measurement Science and Technology", Vol. 17, nr 10 (2006), s. 2740-2750.
- [16] Rabinovich S.G.: *Measurement errors and uncertainties*. AIP Press, New York 2000.
- [17] Denisenko V.V.: *The dynamic error of a multichannel measurement system*, "Measurement Techniques", Vol. 52, nr 1 (2009), s. 3-6.
- [18] 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.
- [19] Rucki M., Jermak Cz.J., Bogorosz A.: *Dynamika czujnika pneumatycznego w układach kontroli czynnej*. „Pneumatyka”, nr 2(75), 2010, s. 10-14.
- [20] Rucki M.: *Właściwości dynamiczne wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych o zmniejszonych komorach pomiarowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
- [21] Rucki M., Barisic B., Ocnasova L.: *Dynamic calibration of air gauges*. "Archives of Mechanical Technology and Automation", Vol. 30, nr 2 (2010), s. 129-134.
- [22] Волосов С.С.: *Приборы для автоматического контроля в машиностроении*. Изд-во Машиностроение, Москва 1972.
- [23] Blackwell C.: *Effective speed-up of slowly responding measurement systems*. "Advances in Space Researches", Vol. 22, nr 10 (1998), s. 1437-1441.
- [24] Пинхусович Р.Л., Кузнецов Б.Ф.: *Минимизация динамической погрешности измерительных преобразователей*. «Измерительная техника», № 1 (2004), s. 12-14.

- [25] Yao Y. et al.: *VMMC: a test-bed for machining*. "Computers in Industry", Vol. 47, nr 3 (2002), s. 255-268.
- [26] Yau H.T., Ting J.Y., Chuang C.M.: *NC simulation with dynamic errors due to high-speed motion*. "International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol. 23, nr 7-8 (2004), s. 577-585.
- [27] Woschni E.G.: *Developments of measurement due to tendencies of microelectronics and a new optimization criterion*. Proceedings of IMEKO World Congress, Rio de Janeiro 2006, CD-ROM.
- [28] Woschni, E.G.: *Informationstechnik*. 4th ed., Verlag Technik, Berlin 1990, s. 235-238.
- [29] Takahashi Y., Rabins M.J., Auslander D.M.: *Sterowanie i systemy dynamiczne*. WNT, Warszawa 1976.
- [30] Jermak Cz. J.: *Dwukaskadowy czujnik pneumatyczny z układem korekcji dynamicznej*. Materiały konferencji „V Krajowa konferencja naukowo-techniczna Forum prac badawczych Metrologia w procesach wytwarzania”, Kraków 1994, s. 291-296.
- [31] Zelczak A.: *Pneumatyczne pomiary długości*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [32] Rucki M., Jermak Cz.J.: *Dynamic Properties of Small Chamber Air Gages*. "Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control", Vol. 134, nr 1 (2012), 011001 (6 pages) doi:10.1115/1.4005043.
- [33] Rucki M.: *Step Response of the Air Gauge*, "Metrology and Measurement Systems", Vol. 14, nr 3 (2007), s. 429-436.
- [34] Kościelny W., Woźniak C.: *Eksperymentalna ocena modeli przepływu w oporach pneumatycznych*. Materiały konferencji PNEUMA'95, Koszalin – Kielce 1995, s. 83-92.
- [35] *Dynamika pneumatycznych układów napędowych*, red. F. Siemieniako, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2007.
- [36] Figliola R.S., Beasley D.E.: *Theory and Design for Mechanical Measurements*, John Wiley & Sons Inc., Clemson University, USA 2006.
- [37] Ciepłucha J.: *Transmisja sygnału ciśnienia przez długą linię pneumatyczną*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, nr 8(47), 1994, s. 37-43.
- [38] *Millimar. Length Metrology Components and Systems*. Catalogue on Dimensional Metrology, Mahr GmbH, Esslingen – Göttingen 2005.
- [39] Zhang H. et al.: *An Ultra-Precision Air-Pin Sensor and Its Dynamic Characteristics*. "Key Engineering Materials", Vols. 295-296 (2005), s. 557-562.
- [40] Soboczyński R.J.: *Badania właściwości metrologicznych wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych*. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.
- [41] Jermak Cz.J., Majchrowski R.: *Opracowanie procedury wyznaczania charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przetworników pneumatycznych*. Materiały XIII Krajowej i IV Międzynarodowej Konferencji „Metrologia w technikach wytwarzania”, Poznań – Żerków 2009, s. 201-206.
- [42] Gajda J.: *A multipoint algorithm to estimate the phase shift angle by the signal zero-crossing method*. "Systems Analysis, Modelling, Simulation: a journal of mathematical modelling and simulation in systems analysis", Vol. 43, No. 12 (2003), s. 1615-1624.
- [43] Ермак Ч., Мазур К., Руцкий М.: *Бесконтактные измерения геометрических параметров профиля пневматическим датчиком*. «Мир Техники и Технологий», № 2(99), 2010, s. 38-39.