

ANDRZEJ ZELCZAK

Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechnika Warszawska

BŁĘDY DODATKOWE I POJĘCIOWO ZBLIŻONE CIŚNIENIOWYCH SYGNAŁÓW POMIAROWYCH

Poddano analizom, wyrażone funkcjami ogólnymi, modele matematyczne pneumatycznych przetworników pomiarowych, wytwarzających ciśnieniowe sygnały pomiarowe. Wyniki analiz tych funkcji uszeregowały badane obiekty pod względem podatności na przyczyny powstawania błędów dodatkowych, oraz uzasadniły wskazanie przetwornika o optymalnych własnościach metrologicznych i użytkowych.

1. WSTĘP

Dokonanie pomiaru w warunkach fizycznych, odmiennych niż wyworcowano przyrząd pomiarowy, obarcza uzyskany wynik błędami z definicji zwanych błędami dodatkowymi. W zależności od parametrów stanu fizycznego, które w czasie pomiaru były odchyłone od swoich wartości uznawanych za normalne, błędy dodatkowe zyskują w swoich nazwach odpowiednie przymiotniki, np. temperaturowy, ciśnieniowy itd. Całkowita wartość wypadkowego błędu dodatkowego równa się ich sumie a odpowiadający model matematyczny będzie mieć zatem postać funkcji wielu zmiennych. Ogólnym jej wyrażeniem jest suma pochodnych cząstkowych funkcji modeli matematycznych badanych przetworników pomiarowych, w której zmiennymi są parametry stanu fizycznego medium roboczego, elementów budowy przetwornika itp.

Zatem każda obserwowana wartość ciśnieniowego sygnału pomiarowego, wytworzonego przez przetwornik pneumatyczny, może być obarczona sumą błędów dodatkowych, powodowanych zmiennością temperatury i ciśnienia powietrza roboczego i atmosferycznego. Dla zapisania ogólnej postaci tej sumy konieczna jest znajomość funkcji modelujących badane przetworniki pomiarowe. Np. rzeczona funkcję dla jednego z poddanych analizie przetworników, mającego postać kaskady pneumatycznej, można poznać z monograficznej literatury, np. [1, 2]. Jednak dokonanie jej wywodu w oparciu o prawo ciągłości pozbawiło możliwości szczegółowego opisanie strat energetycznych powietrza roboczego, płynącego kanałem przetwornika pneumatycznego. Zdaniem autora jest to główna przyczyna odchylenia charakterystyk przetworzenia, wytuczanych doświadczalnie i obliczeniowo. Dlatego, dla zamierzonych analiz przyczyn błędów dodatkowych,

przyjęto modele matematyczne badanych przetworników, zaczerpnięte z niepublikowanych prac własnych autora. Zasadniczą zaletą tych modeli matematycznych jest wystarczające dla celów technicznych, zbliżenie wyliczonych i wytoczonych doświadczalnie charakterystyk przetworzenia.

Opracowano je z udziałem wspólnej dla wszystkich podstawy, technicznej wersji bilansu energii strumienia gazu, dokonanej na wzór równania Bernoulli'ego; sumującej energię strumienia gazu w przewodzie rurkowym; do czego podobne są przetworniki pneumatyczne.

$$\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{w_i^2}{2} - \sum_1^n \frac{w_i^2}{2} K_i - \sum_1^n \frac{w_i^2 l_i}{2 d_i} K_i - \frac{p_a}{\rho_a} = 0 \quad (1)$$

Równanie (1) pozwala dokładniej opisać przemiany stanu i strat energetycznych pracującego powietrza, zależne od konstrukcji kanałów, przez które przepływa pracujące powietrze. Przyjęta jednolita podstawa ogólna doprowadza do zbliżonych zapisów wynikających z nich funkcji modeli matematycznych, podanych badaniom przetworników pomiarowych. Ponadto prawidłowość zarysowanego stanu podstaw ogólnych potwierdza jednolite ukształtowanie wykresów charakterystyk przetworzenia, wytoczanych rachunkowo i obserwowanych doświadczalnie.

Korzyścią ze wskazanych podobieństw jest możliwość zastosowania wspólnych dla wszystkich badanych przetworników metod opracowania ich modeli matematycznych, analitycznych wywodów opisów własności metrologicznych, oraz podatności na przyczyny wywołujące błędy dodatkowe i nie tylko.

Istotnym postrzeżeniem z wyników doświadczeń, zaznaczonym w literaturze monograficznej, np. [1, 2], jest wspólne dla wszystkich badanych obiektów, ukształtowanie użytecznej części charakterystyk przetwarzania. Mianowicie, przedstawiają ją odcinki wykresów zmienności sygnałów pomiarowych, zawierających w centralnych częściach punkty przebiegu. Można więc uznać opis właściwości metrologicznych charakterystyk przetwarzania w wyróżnionych punktach, jako równoważny dla całego odcinka traktowanego jak praktycznie prostoliniowy.

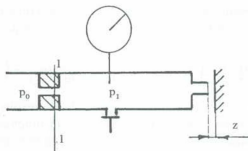
Sprowadza to zamierzone badania do nieskomplikowanych analiz znanych modeli matematycznych przetworników pomiarowych w ich punktach przebiegu, a następnie odniesienia wnioskowania do całego odcinka liniowego. W dalszej treści wliczono do nich niestalość ciśnienia zasilania, co jest niezgodne z definicją pojęcia błędów dodatkowych. Jednak łatwo wyobrażalne, ważne przyczyny techniczne oraz naturalne powiązania aktualnej wartości ciśnienia atmosferycznego i zasilania (uwidocznione również w zapisie modelu matematycznego przetwornika) uzasadniają potrzebę włączenia również i tego parametru do zamierzonych analiz.

Zarysowanemu tokowi badań poddano wybrane ze znanych przetworniki: powszechnie stosowany kaskadowy, kontrowersyjnie oceniany eźektorowy, oraz opracowany przez autora, złożony z dwu kaskad połączonych w szereg.

2. PODSTAWY OGÓLNE ANALIZY PODATNOŚCI PRZETWORNIKA KASKADOWEGO NA PRZYCZYNY BŁĘDÓW DODATKOWYCH

Znajdujący liczne zastosowania w technice pomiarów, regulacji, sterowania, pneumatyczny przetwornik kaskadowy (znany pod niemiecką nazwą Druckteiler) złożony jest z połączonych w szereg dwu oporów przepływowych; wlotowego o stałym przekroju kanału i wylotowego, zmiennego w funkcji mierzonej wielkości, jak przedstawiono to na rys 1. Znany z literatury [1, 2] jego model matematyczny wywiedziono z prawa ciągłości strumienia. Jednak wytyczenie z jego udziałem charakterystyki przetworzenia są znacznie oddalone od naturalnej. Natomiast, jak opisano w wstępie, zadawalająco dla celów technicznych modeluje przetworzenie funkcja wywiedziona z bilansu energii strumienia, zapisanego dla przetwornika kaskadowego równaniem (2).

$$\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} - \frac{p_a}{\rho_a} - F_{st}(z)_k = 0 \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat budowy pneumatycznego przetwornika pomiarowego w formie kaskady

Praktycznie jedynie poprawna a odpowiadająca równaniom (1) i (2) budowa kaskady pomiarowej powinna spełnić warunek Saint-Venant'a, z którego wynikają minimalne wartości wymiarów przestrzeni komór ciśnieniowych kaskad pomiarowych, przy znanym ich stosunku do wymiarów otworów rozdzielających je dysz.

Nieskomplikowane przekształcenia doprowadzają równanie (2) do postaci poszukiwanego modelu matematycznego pneumatycznej kaskady pomiarowej.

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{Az^2}{1 + Az^2} \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_a}{\rho_a} \right) + F_{st}(z)_k \quad (3)$$

Z przyjęciem równoważności własności fizycznych pracującego powietrza i teoretycznego gazu nielepkiego i nieściśliwego, równanie (3) uprości się do postaci (4).

$$p_1 = p_0 - \frac{Az^2}{1 + Az^2} (p_0 - p_a) + F_k(z)_k \quad (4)$$

$F_{\text{str}}(z)_k$ w równaniu (3) jest sumą strat energetycznych, jakie następują podczas przepływu pracującego gazu przez przetwornik; $F_k(z)_k$ w równaniu (4) jest funkcją kompensującą różnice między wyliczonymi charakterystykami przetwornika kaskadowego, zasilanego powietrzem o własnościach jak założone albo fizycznym.

Dla łatwego wyobrażenia celów praktycznych istnieje potrzeba znalezienia jawnego opisu tej funkcji; co jest możliwe z udziałem doświadczeń i nie mieści się w tematyce aktualnie rozpatrywanego zagadnienia.

Z wyrażenia (4), poddanego zarysowanym na wstępie analizom, wylaniają się opisy funkcyjne własności metrologicznych badanych przetworników; a w tym i błędów dodatkowych.

Zgodnie z przyjętym planem analiz (przedstawionym w wstępie), wyliczono z pomocą równania (3) ogólne wyrażenie wartości sygnału pomiarowego w punkcie przebiegu charakterystyki przetworzenia. Suma przyrostów cząstkowych tej funkcji, wyznaczona względem parametrów o wymiarze ciśnienia, tzn. ciśnieniu zasilania i atmosferycznego oraz strat energetycznych powodowanych tarciami itp. przyczynami, wyraża błędy ciśnieniowego sygnału pomiarowego. Jeśli odchylenia parametrów stanu gazu roboczego od ich poziomu normalnego mają nieokreślone wartości oraz znaki, wtedy powodowane nimi składowe błędy dodatkowe nabierają charakteru przypadkowego a szacowanie globalnej ich wartości ma postać sumy geometrycznej.

$$\Delta p_{1\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{3}{4} p_0 \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4} p_a \Delta p_a\right)^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{dF_{\text{str}}}{dw_1} \frac{dw_1}{dp_0} \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{dF_{\text{str}}}{dw_1} \frac{dw_1}{dp_a} \Delta p_a\right)^2} \quad (5)$$

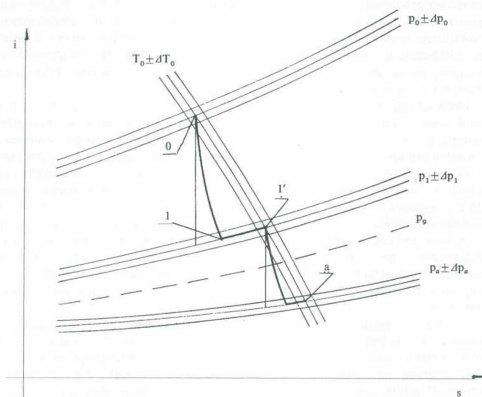
Jak wykazują wyniki rozważań autorów prac [4, 5], możliwe jest przedstawienie funkcji modelującej przetworzenie w powiązaniu ze strumieniem masy pracującego powietrza, wypływającego przez szczelinę pomiarową przetwornika, np. jak w cytowanej funkcji (6)

$$(p_0 - p_1) = T_0 C_0 \dot{m}(z) \quad (6)$$

Funkcja (6) jest wersją modelu matematycznego przetwornika kaskadowego, równoważną uprzedniej. Uwidocznione z jego pomocą powiązanie wartości sygnału ciśnieniowego i temperatury powietrza zasilania, pozwala na wywód analitycznego wyrażenia wielkości błędu dodatkowego, powodowanego odchyleniami wymienionego parametru stanu od jego poziomu normalnego. W tym celu, stosując ustalone w wstępie zasady tworzenia opisu analitycznego błędów dodatkowych, wyłoniono poszukiwane wyrażenie (7).

$$\Delta(p_0 - p_1)_{\text{max}} = \frac{d(p_0 - p_1)_{\text{max}}}{dT_0} \Delta T_0 = -0,5 C_2 \dot{m}(z) \frac{1}{\sqrt{T_0}} \Delta T_0 \quad (7)$$

Podczas pracy przyrządów pomiarowych, odchylenia od normy ciśnień powietrza atmosferycznego i zasilania oraz jego temperatury, mogą zdarzyć się jednocześnie i przybierać wartości ustalone albo zmienne w czasie. Ułatwieniem w przedśledzeniu



Rys. 2. Przebieg rozprężania powietrza roboczego w pneumatycznym przetworniku pomiarowym w formie kaskady, ukazany w układzie współrzędnych entalpia—entropia; p_0 , p_1 , p_a — izobary ciśnień: zasilania, sygnału pomiarowego, atmosferycznego; T_0 , T_1 , T_a — izotermy temperatur: powietrza zasilania równej normalnej, dopuszczalnie od niej odchylonej, atmosferycznego

procesów nakładania się powstających wtedy błędów dodatkowych na wartość sygnału ciśnieniowego są izobary i izotermy przemian stanu termodynamicznego pracującego powietrza, przedstawione na rys. 2 w polu współrzędnych entalpia—entropia. Graficzne wyobrażenia wszystkich, zachodzących wtedy procesów mieszczą się między izobarą ciśnienia zasilania i atmosferycznego. Jak wiadomo w warunkach technicznych pracy pneumatycznych przetworników pomiarowych dopuszcza się pewne odchylenia parametrów stanu od ich wielkości odniesienia. Odpowiadające im izobary $p_0 \pm \Delta p_0$ oraz izotermy $T_0 \pm \Delta T_0$ ograniczają pewien niewielki obszar, leżący wokół punktu przecięcia tego rodzaju krzywych dla stanu normalnego. Obszar ten można traktować jak zbiór punktów, z których każdy, jak w zdarzeniu przypadkowym, może stać się prawdopodobnym początkiem procesu rozprężania pracującego powietrza w przetworniku kaskadowym. Pierwszy jego stopień następuje podczas przepływu powietrza roboczego przez dyszę wlotową,

oznaczoną przekrojem 1—1 na rys. 1. Współistniejące z ruchem gazu, pokonywanie oporów tarcia wytwarza ciepło ogrzewające pracujące medium, konsekwentnie spowodowując spadek entalpii przy jednoczesnym wzroście entropii. Na rys. 2. proces ten uwidoczniiony jest odcinkiem grubiej zarysowanej politropy, stopniowo odchylającej się od pionowej izentropy, ukazującej proces rozprężania pracującego powietrza o założonych własnościach gazu teoretycznego

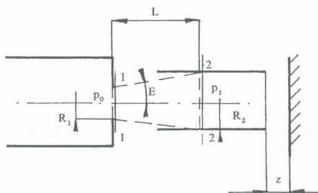
Obserwowanym skutkiem nieodwracalnego, adiabatycznego przepływu przez kanał dyszy wlotowej jest rozprężenie i oziębienie się pracującego powietrza. Następujący po tym pobór ciepła z otoczenia, doprowadza do zrównania temperatur powietrza zasilania i pracującego. W tym procesie entalpia i entropia gazu roboczego narastają do czasu zrównania się temperatur wszystkich wymienionych mas powietrza. Na rys. 2 tą część procesu rozprężania przedstawia pogrubiony odcinek izobary sygnału pomiarowego sięgający izotermę T_0 , temperatury normalnej powietrza otoczenia. Zrównanie się stanów termodynamicznych powietrza roboczego i otoczenia, jest początkiem dalszego ciągu jego rozprężania, jaki następuje w dyszy pomiarowej i przyległej do niej szczelinie. Uaktywniające się podczas ruchu powietrza: różnorodne opory tarcia, odchylenia kierunku jego przepływu itp. przyczyny, powodują zamianę na ciepło traconej części energii początkowej gazu roboczego.

Zjawisko to pogłębione złożonością konstrukcji kanału, nasila się bardziej niż analogia w uprzednio opisanej dyszy wlotowej. Na rys. 2. uwidoczniają to zróżnicowania odchyleń politrop od pionowych izentrop, zaczynających się z punktów leżących na izobarach ciśnienia zasilania p_0 i sygnału pomiarowego p_1 . Natomiast zakończenie procesu rozprężania w przestrzeni przetwornika wskazane jest wspólnym punktem politropy i izobary ciśnienia atmosferycznego p_a . Cały proces jest nieodwracalnym adiabatycznym przepływem, podczas którego następuje rozprężanie i oziębianie się pracującego powietrza, zakończone nieuwidocznioną na rys. 2, izotermą, przechodzącą przez punkt kończący politropę na izobarze ciśnienia atmosferycznego. Następujące po tym ogrzewanie się powietrza roboczego ciepłem przenikającym z otoczenia, przebiega z przyrostami entropii i entalpii; kończącymi się osiągnięciem temperatury T_a . Na rys. 2. proces obrazowany jest pogrubionym odcinkiem izobary p_a ; zachodząc na zewnątrz przestrzeni przetwornika, nie wpływa na wartość ciśnieniowego sygnału pomiarowego.

Przedstawiony proces rozprężania jest jednym z możliwych, jakie zdarzają się przy odmiennych wartościach ciśnienia i temperatury powietrza zasilania; technicznie uznawanych za poprawne jeśli nie przekroczą granic $+/- \Delta p_0$ i $+/- \Delta T_0$. Skutkiem jest przypadkowy rozrzut izobar sygnału pomiarowego $+/- \Delta p_1$. Praktycznym wyrazem powyższego są straty energii, wywołane przypadkowymi odchyleniami temperatury powietrza zasilania i otoczenia. Analiza uprzednio przedstawionych modeli matematycznych tych procesów wylania wnioski i zalecenia istotne dla racjonalizacji budowy pneumatycznych przetworników pomiarowych, szczegółowo przedstawione w podsumowaniu, rozdział 5.

3. PODSTAWY OGÓLNE ANALIZY PODATNOŚCI PNEUMATYCZNEGO PRZETWORNIKA EŻEKTOROWEGO NA PRZYCZYNY BŁĘDÓW DODATKOWYCH

Pneumatyczny przetwornik eżektorowy, przedstawiony schematem na rys. 3, polecany jest w relacjach z prac badawczych np. [4, 5, 6], jako obdarzony własnościami metrologicznymi, najkorzystniejszymi wśród konstrukcji porównywalnych; jednak nie potwierdziło się to w próbach zastosowań praktycznych. Zdaniem autora, powodem niespełnienia zapowiedzi literaturowych są skutki funkcjonowania przyczyn powstawania błędów dodatkowych silniejsze niż w innych przetwornikach pneumatycznych.



Rys. 3. Schemat budowy pneumatycznego przetwornika pomiarowego, wzorowanego na strumienicy, zwanego eżektorowym

W przetworniku eżektorowym, ciśnieniowy sygnał pomiarowy formowany jest przez odcinek strugi pracującego powietrza, przepływającej między wylotem dyszy zasilającej i wlotem pomiarowej, oznaczonych 1–1 i 2–2 na rys. 3. Względnie małe oddalenie obu przekrojów czyni, iż prędkości drobin pracującego powietrza w całej długości odcinka 1–2 różnią się pomijalnie mało. Jednak okalająca go wolna przestrzeń zamkniętej komory pozwala na naturalną ekspansję, skutkiem której jest rozszerzenie się strumienia powietrza w sposób pokazany z pomocą kąta E na rys. 3. Kres rozprzestrzeniania strumienia następuje w przekroju 2–2 dyszy pomiarowej przez tłumienie sztywnością jej ścian. Jak opisano, wyróżniony odcinek strugi pracującego powietrza musi przybrać kształt stożka ściętego. Rysuje to wyobrażenie o proporcjach wymiarowych elementów przepływowych oraz ich konfiguracjach, zapewniających prawidłową budowę przetwornika eżektorowego. Dla uniknięcia zjawiska fal stojących, niweczących funkcję eżektora jako przetwornika pomiarowego ustala się stosowanie ciśnień zasilania, przy których nie występują przepływy krytyczne. Ponadto, dla wyjaśnionych dalej przyczyn, rozpatruje się przykład pracy przetwornika eżektorowego, w którym strumień roboczego powietrza płynie ruchem

laminarnym. Również i przy tym ciśnieniu zasilania, uprzednio zauważone zwiększenie się przekroju strumienia, następuje także na skutek pracy sił tarcia lepkiego, stycznych do jego powierzchni zewnętrznej. Poruszają one coraz bardziej odległe od osi kanału dyszy, warstwy okalającego powietrza, wprawiając je w ruch ku wylotowi do atmosfery. Zachodzi więc proces, którego uproszczoną formą jest model Maxwell'a przepływu uwarstwionego płynu lepkiego, opartego na założeniu Newton'a, określającego rozkład naprężeń stycznych między warstwami ośrodka płynnego. Istnieją więc podstawy do przyjęcia założenia analogicznego jak uczyniono dla wywodu prawa Hagen-Poiseuilla. Oparte jest ono na myślowym wyodrębnieniu osiowosymetrycznej części strumienia pracującego powietrza, umiejscowionej między przekrojami 1-1 i 2-2 na rys. 3. Jak opisano uprzednio, uformowany jest on na kształt stożka ściętego, na powierzchni którego w stanie statycznym pracy przetwornika istnieje równowaga sił czynnych i biernych, opisanych równaniem (8), analogicznym jak inicjujące wywód prawa Hagen-Poiseuilla.

$$p_0 \pi r_1^2 - p_2 \pi r_2^2 = H \frac{\pi}{2} \frac{L}{\cos E} (d_1 + d_2) \quad (8)$$

Uwzględniając naturalnie istniejące równości: $r_1 = r_2$, $r_2 = r_1 + L \operatorname{tg} E$, oraz założenie Newton'a, określające zależność przyrostu naprężeń stycznych między warstwami płynu, od gradientu ich prędkości $H = u \, dw/dr$, oraz traktując kąt E jako bardzo mały, równanie (8) uprości się do postaci (9).

$$(p_0 - p_1) r_1 = -2 L u_1 \frac{dw}{dr} \quad (9)$$

Równanie (9) znane jest w literaturze podstawowej, np. [7, 8], jako element wywodu prawa Hagen-Poiseuilla, określającego prędkość a następnie strumień masy płynu przepływającego przewodem rurowym. Ponieważ w zamierzeniu czynionych analiz oczekuje się poznania parametrów stanu gazu, płynącego w kanale o kształcie zbliżonym do modelu rozważanego w literaturze, możliwe jest dokonanie skrótu wywodu przez cytowanie odpowiednich wyników, np. z [8]. Mianowicie, strumień masy powietrza przepływający laminarnie między przekrojami 1-2 kanału komory eżektoru na rys. 3, przedstawia wyrażenie (10).

$$\dot{m}_1 = (p_0 - p_1) \frac{\pi \rho_1 d_1^4}{128 L \mu_1} \quad (10)$$

Z uwzględnieniem, naturalnej dla przepływu ustalonego równości $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ oraz przyjęciem postaci sygnału pomiarowego jako różnicy ciśnień $(p_0 - p_1)$, równanie (10) osiągnie wyraz modelu matematycznego przetwornika eżektorowego.

$$(p_0 - p_1) = \dot{m}_2 \frac{128 L \mu_1}{\pi \rho_1 d_1^4} \quad (11)$$

Funkcja (11) wykazuje zależność wartości sygnału pomiarowego od stosunku lepkości do gęstości pracującego powietrza. Naturalna zmienność tych parametrów, następująca jako skutek przypadkowych odchyłen temperatury i ciśnienia powietrza zasilania od ich stanu normalnego, jest przyczyną błędów dodatkowych ciśnieniowego sygnału pomiarowego ($p_0 - p_1$).

Wprowadzenie do funkcji (11) wzorów Clapeyron'a i Reyleigh'a wyrażających zależności gęstości i lepkości powietrza od parametrów jego stanu, panujących za wylotem dyszy zasilającej, tzn. za przekrojem 1—1 schematu na rys. 3, utworzy nową jej postać.

$$(p_0 - p_1) = \dot{m}_z \frac{128 R u_0}{(273)^{0.75} p_0} \frac{L}{d_1^4} (T_0)^{1.75} \quad (11a)$$

Prawą stronę wyrażenia (11a) uporządkowano, zapisując jako iloczyn trzech czynników. Pierwszy z nich jest strumieniem masy pracującego powietrza, zależnym od szerokości szczeliny pomiarowej; w następnym zgromadzono wszystkie stałe obliczeniowe stanu termodynamicznego pracującego czynnika; trzeci czynnik wyraża istotną dla wywiedzionych analiz proporcjonalną zależność wartości sygnału pomiarowego od temperatury powietrza w potęgę 1,75, amplifikowanej sumą długości kanałów elementów przepływowych, tworzących przetwornik. Jak udowodniono w publikacji [9] stworzenie konstrukcji poprawnie działającego przetwornika eżektorowego wymaga stosowania dyszy pomiarowej o długości nie krótszej niż 10 jej średnic. Jak wpływa ta konstrukcja na wielkość błędu dodatkowego wykazuje porównanie z sumą długości kanałów dysz, użytych przy tworzeniu przetwornika kaskadowego, gdzie zwykle nie przekracza dwu średnic kanałów użytych elementów przepływowych. Zdaniem autora dokonane porównanie wyjaśnia jedną z przyczyn, działaniem której przetworniki eżektorowe nie znalazły zastosowań w praktyce techniki pomiarów pneumatycznych.

Drugim parametrem konstrukcyjnym przetwornika eżektorowego, silniej wpływającym na wartość ciśnieniowego sygnału pomiarowego, jest średnica dyszy wlotowej d_1 . Czwarta potęga z jaką współtworzy ona wyrażenie modelowe (11a), jest miarą porównawczą mocy wpływu na kształtowanie charakterystyki przetworzenia oraz amplifikowania niesionych przez powietrze zasilania, przyrostów ciepła, nie tylko powodujących błędy dodatkowe. Mianowicie, średnica dyszy wlotowej podniesiona do czwartej potęgi, współtworzy również zapisy modeli matematycznych innych przetworników pneumatycznych. Tzn. ciepłe zmiany jej średnicy z uwidoczniomym zwielokrotnieniem, wpływają na odchylenia własności metrologicznych przetworników pneumatycznych. Z powyższego wynika istotne zalecenie wykonania dysz wlotowych we wszystkich przetwornikach pomiarowych z materiałów o małych współczynnikach rozszerzalności cieplnej.

Potwierdzeniem i rozszerzeniem przytoczonych wniosków są wyniki dalszych analiz uprzednio przyjętego modelu przetwornika eżektorowego, w którym powietrze stopniowo zmienia charakter ruchu, przechodząc od laminarnego w turbulentny; obserwowane przy powolnym zwiększaniu ciśnienia zasilania. Początkowo powoduje to pojawienie się turbulencji w osi strumienia. Następnie, w miarę wzrostu potencjału

zasilania, zbliżają się one do ścian kanału przetwornika, aż do kresu, którym jest zawsze występująca warstwa adhezyjna.

Zbliżenie do wyjaśnienia tej strony zagadnienia następuje po przekształceniu równania (11a) do postaci wyrażającej zależność strumienia masy od parametrów wymiarowych kanałów dysz przetwornika i stanu termodynamicznego powietrza zasilania. Z czego, na podstawie znanych, np. [3], analogii tej odmiany ruchu gazu do przepływów ładunków elektrycznych, pozwalają, przez podobieństwo do odpowiedniego modelu matematycznego w wymienionej dziedzinie fizyki, na zapisanie wyrażenia (12):

$$\Omega_z = \frac{128 R u_0}{(273)^{0.75}} \frac{L}{d_1^4} \frac{T_1^{1.75}}{p_0} \quad (12)$$

jako analogię do oporności przewodów elektrycznych, wynikającą z prawa Ohma. Po prawej stronie równania (12) zapisany jest iloczyn trzech czynników; pierwszy tworzą stałe określone wartościami normalnymi stanu fizycznego powietrza roboczego; wartość drugiego zależy od parametrów konstrukcyjnych kanałów przepływowych przetwornika pomiarowego; trzeci jest ilorzem temperatury i ciśnienia powietrza pracującego, których niestałość jest przyczyną błędów dodatkowych. Ostatni czynnik wyjaśnia, iż pozostająca na zewnątrz strumienia turbulentnego, warstwa gazu płynąca laminarnie, doznaje oporności mnożonej jego temperaturą w potęgę 1,75 oraz długością i odwrotnością średnicy w czwartej potęgę dyszy pomiarowej, która tworzy główną część kanału przepływowego przetwornika czektorowego.

Ułożenie pozostałych elementów przepływowych wzdłuż wspólnej dla wszystkich osi, na podobieństwo przewodu rurkowego, zakończone sensorem pneumatycznym typu dysza — przesłona ułatwia spisanie, według pierwowzoru (1), bilansu energetycznego, płynącego w nim strumienia powietrza; oraz wykształcenie funkcji (13), stanowiącej model matematyczny przetwornika czektorowego.

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{BCz^2}{1+Bz^2} + \frac{Bz^2}{1+Bz^2} F_{st}(z)_e \quad (13)$$

Podobnie jak dla przetworników innych odmian z przyjęciem równoważności własności fizycznych pracującego powietrza i gazu nielepkiego i nieściśliwego, wyrażenie (13) uprości swój zapis do postaci (14). $F_{st}(z)_e$ zmieni swoje znaczenie, stając się zmienną korygującą różnice charakterystyk przetworzenia: wyliczoną z funkcji (14) i z pomocą doświadczenie.

$$p_1 = p_0 - \frac{BCz^2}{1+Bz^2} + \frac{Bz^2}{1+Bz^2} F_k(z)_e \quad (14)$$

Dla zadań innych niż aktualnie rozpatrywane, postać $F_k(z)_e$, należy wyznaczyć z pomocą doświadczenia. Natomiast dla analiz przyczyn powstawania błędów dodatkowych istotny jest zapis $F_{st}(z)_e$, wynikający z technicznej wersji równania Bernoulli'ego, przedstawiony i omówiony w podsumowaniu.

Jak wykazano w wstępie, rozeznania zjawisk, których wynikiem są błędy dodatkowe, można wiarygodnie dokonać dla całego zakresu pomiarowego, analizując funkcję modelu matematycznego w punkcie jej przebiegu. Dla przetwornika czektorowego wskazaną wartość sygnału pomiarowego przedstawia wyrażenie (15), wykształcone z równania (13).

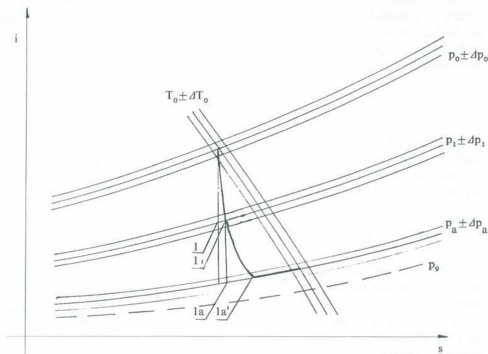
$$p_{1\max} = \frac{3}{4}p_0 + \frac{1}{4}p_a + \frac{1}{4}F_{\text{str}}(z)_e \quad (15)$$

Przy nieokreślonych wartościach i znakach przyrostów parametrów ciśnieniowych, wynikające błędy dodatkowe nabierają charakteru wielkości przypadkowych. Ich wartości i wzajemne proporcje można ocenić z pomocą sumy geometrycznej (16), zapisanej na podstawie funkcji (15).

$$\Delta p_{1\max} = \sqrt{\left(\frac{3}{4}\Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\Delta p_a\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\frac{dF_{\text{str}}}{dw_i}\frac{dw_i}{dp_0}\Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\frac{dF_{\text{str}}}{dw_i}\frac{dw_i}{dp_a}\Delta p_a\right)^2} \quad (16)$$

Sposób, w jaki sumują się składowe błędów dodatkowych pochodzenia cieplnego oraz ciśnieniowego i nakładają się na wartości ciśnieniowego sygnału pomiarowego, uwiadcniają procesy zmian wartości entalpii i entropii pracującego powietrza. Graficzny obraz przemian wzajemnych zależności wymienionych parametrów przedstawiają wykresy na rys. 4. Całokształt obserwowanych procesów przemian fizycznych przedstawiony jest wykresami, położonymi między izobarą ciśnienia zasilania oraz charakterystycznego dla zjawiska czekcji, niższego od atmosferycznego. Osiągane jest ono w komorze czektora przy szerokości szczeliny pomiarowej Z , kończącej jego reakcję, wyrażaną zmianami wartości sygnału pomiarowego. Ciśnienie pomiarowe, obserwowane podczas pracy przetwornika pneumatycznego, zmienia się w wyniku procesu rozprężania powietrza roboczego. Początkiem toku jego przemian jest punkt wspólny izobary i izotermy stanu powietrza zasilania; na rys. 4 oznaczony 1_0 na izobarze p_0 . Przy teoretycznie możliwym zasilaniu gazem nielepkiem i nieściśliwym proces rozprężania przedstawia izentropa teoretyczna o stałej wartości, dążąca przez punkt 1_1 na izobarze sygnału pomiarowego p_1 , do punktu wspólnego z izobarą ciśnienia atmosferycznego p_a . Natomiast podczas przepływu gazu fizycznego przez ten sam kanał w wyniku pracy pokonywania oporów tarcia wewnętrznego, wytwarza się ciepło powiększające entropię i zwalniające spadek entalpii. Zachodzący wtedy przepływ adiabatyczny o nieodwracalnym charakterze, którego skutkiem, uwiadczonym na rys. 4, jest odchylenie się od izentropy teoretycznej politropy fizycznej, kończą się w punkcie $1'_1$ na izobarze p_1 .

Charakterystyczna dla czektora, bliskość wlotu dyszy pomiarowej i wylotu dyszy zasilającej, utrudnia zrównanie się temperatur powietrza otoczenia i roboczego w przestrzeni międzyszybowej. Dlatego kolejny stopień rozprężania, przebiegający wewnątrz kanału dyszy pomiarowej, zaczyna się od stanu fizycznego powietrza roboczego w jakim zakończyło się rozprężanie w dyszy zasilającej.



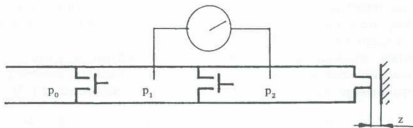
Rys. 4. Przebieg rozprężania powietrza roboczego w pneumatycznym przetworniku eżektorowym, ukazany w układzie współrzędnych entalpia – entropia; p_0 , p_1 , p_a — izobary ciśnień: zasilania, sygnału pomiarowego, atmosferycznego; T_0 , T_1 , T_a — izoterm temperatur: powietrza zasilania równej normalnej, dopuszczalnie od niej odchylonej, atmosferycznego

Na wykresach rys. 4, owym końcem i początkiem jest punkt $1'$, leżący na izobarze sygnału pomiarowego i w którym kończy się politropa procesu rozprężania w dyszy zasilania. Dołączenie do dyszy pomiarowej zespołu dysza – przesłona, spełniającego rolę sensora pneumatycznego, czyni bardziej złożoną budowę jej kanału, powoduje zwiększenie strat energetycznych płynącego w niej strumienia pracującego powietrza. Na rys. 4 uwidoczniło to zwiększeniem odchylenia politropy fizycznego rozprężania od teoretycznej izentropy, zaznaczonych różnicą odległości punktów $1-1'$ oraz $a-a'$.

Za wylotem zespołu dyszy – przesłony pracujące powietrze rozprasza się, tracąc wpływ na wartość ciśnienia sygnału pomiarowego. Na wykresach rys. 4 odpowiada temu pogrubiony odcinek izobary p_a między punktem „1” a izotermą temperatury otoczenia; przedstawiający proces dopelnienia do stanu równowagi temperatury powietrza, które wypłynęło z przetwornika do otoczenia. W jaki sposób na opisany proces narastania strat energetycznych strumienia powietrza, wpływa konstrukcja przetwornika eżektorowego, przedstawia sumujące je wyrażenie (22) oraz związane komentarze podsumowania rozważań.

4. PODSTAWY OGÓLNE ANALIZY PODATNOŚCI PRZETWORNIKA KASKADOWEGO SZEREGOWEGO NA PRZYZYNY BŁĘDÓW DODATKOWYCH

W praktyce szerzej jeszcze nie stosowany, znany nielicznym jako wynik badań i początkowych, całkowicie udanych, zastosowań praktycznych, przetwornik pneumatyczny pokazano na rys. 5. Utworzono go łącząc dwie kaskady w szereg; co stwarza możliwość jednoczesnej obserwacji również dwu ciśnieniowych sygnałów pomiarowych, zmiennych w funkcji szerokości jednej, wspólnej szczeliny pomiarowej Z . Korzystniejsze dla celów praktycznych, własności metrologiczne osiąga się traktując różnicę wspomnianych sygnałów ciśnieniowych również jak sygnał pomiarowy.



Rys. 5. Schemat budowy pneumatycznego przetwornika pomiarowego, złożonego z dwu kaskad połączonych w szereg

Relację z badań analitycznych i doświadczalnych własności metrologicznych nowej odmiany przetworników przedstawiono w pracy [6], oraz w innych pracach autora, co obecnie dopełniane jest analizą błędów dodatkowych.

Podobnie jak w uprzednio użytych metodach badań zagadnień błędów dodatkowych, postrzega się przetwornik kaskadowy szeregowy jak kanał łączący w szereg trzy elementy przepływowe, z których wlotowy i pośredni mają przełoty stałe, natomiast trzeci jest dyszą pomiarową opatrzoną sensorem pneumatycznym, np. typu dysza – przesłona. Odpowiadający tej konstrukcji model matematyczny, odwzorowujący sygnał pomiarowy o postaci różnicy ciśnień, wywiedziono jak poprzednie z równania (1).

Wyrażeniem jego jawnej postaci jest funkcja (17).

$$(p_1 - p_2) = \frac{1}{4} \left(\frac{p_0 - p_a}{\rho_a} - F_{st(z)_{2k}} \right) \frac{Dz^2}{1 + BDz^2} \quad (17)$$

$F_{st(z)_{2k}}$ w funkcji (17), podobnie jak w uprzednich analogiach, jest sumą narastających z długością kanału, strat energii pracującego strumienia gazu, opisaną zgodnie z techniczną wersją równania Bernoulli'ego. Dla celów praktycznych, wzorem rozważań uprzednich, $F_{st(z)_{2k}}$ można zastąpić funkcją korygującą różnice charakterystyk przetworzenia: wyliczoną przy założeniu stosowania gazu roboczego nielepkiego i nieściśliwego, oraz wytyczonej doświadczalnie. Natomiast dla zadań

nakreślonych tytułem i zgodnie z przyjętym sposobem ich rozwiązywania, istotny jest zapis funkcji $F_{st}(z)_{2k}$, wynikający z technicznej wersji równania Bernoullie'go; przedstawiony i opracowany wspólnie z pozostałymi, analizowanymi w podsumowaniu artykułu.

Jak wyjaśniono w wstępie, równoważne dla całego zakresu pomiarowego przetwornika, rozeznanie zjawisk fizycznych tworzących błędy dodatkowe, dokonuje się analizując model matematyczny przetwornika w punkcie przebiegu jego charakterystyki przetworzenia. Odpowiednie wyrażenie ogólne, wyznaczone analitycznie przedstawiono wzorem (18).

$$(p_1 - p_2)_{\max} = \frac{1}{4} \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_a}{\rho_a} - F_{st}(z)_{2k} \right) \quad (18)$$

Stosując uprzednio uznaną metodę analizy w punkcie, traktując wyrażenie (18) jako funkcję wielu zmiennych o wymiarze ciśnienia, wyznaczono ogólne wyrażenia przyrostów cząstkowych błędów dodatkowych.

Zakładając nieokreśloność wartości i znaków odchyłeń od stanu normalnego parametrów ciśnieniowych, powodowane nimi błędy dodatkowe nabierają charakteru przypadkowego. Łączną ich wartość określa suma geometryczna (19).

$$\Delta(p_1 - p_2)_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{4} \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4} \Delta p_a\right)^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{dF_{st}}{dw_i} \frac{dw_i}{dp_0} \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{dF_{st}}{dw_i} \frac{dw_i}{dp_a} \Delta p_a\right)^2} \quad (19)$$

Przez analogię do wyników rozważań, przedstawionych w pracach [4] i [5], można przedstawić funkcję modelującą działanie przetwornika kaskadowego szeregowego, jako uzależnioną od strumienia masy pracującego medium, wypływającego przez szczelinę pomiarową sensora pneumatycznego.

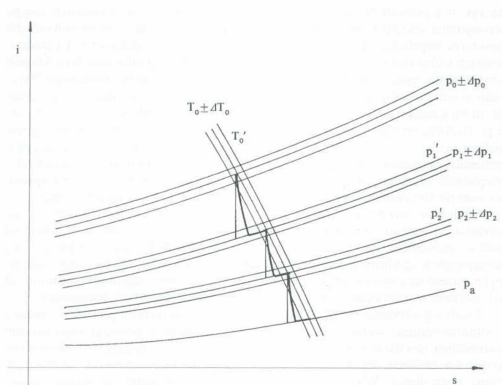
$$(p_1 - p_2) = \dot{m}(z) \sqrt{T_0} (C_2 - C_1) \quad (20)$$

Funkcja (20) daje również podstawę do wywodu wyrażenia wartości błędu dodatkowego, powodowanego odchyleniami temperatury powietrza zasilania.

$$\Delta(p_1 - p_2) = \frac{d(p_1 - p_2)}{dT_0} \Delta T_0 = \frac{\dot{m}(z)}{2\sqrt{T_0}} (C_2 - C_1) \Delta T_0 \quad (21)$$

Zdarzająca się w pracy przyrządów pomiarowych, przypadkowa zmienność lub czasowe ustalenie się wartości parametrów stanu powietrza roboczego, decyduje o sposobach sumowania ich skutków i pojmowaniu ich jako błędy przypadkowe lub systematyczne.

W każdej ze swoich odmian, temperaturowy błąd dodatkowy sygnału różnicy ciśnień jest proporcjonalny do wartości różnicy stałych $(C_1 - C_2)$. Przez odpowiednie kształtowanie konstrukcji z dążeniem do zminimalizowania lub pomnożenia wartości wymienionej różnicy, można uczynić przetwornik kaskadowy szeregowy mniej czuły lub specjalnie uwrażliwiony na zmiany temperatury niż to możliwe w konstrukcjach porównywanym.



Rys. 6. Przebieg rozprężania powietrza roboczego w pneumatycznym przetworniku pomiarowym, złożonym z dwu kaskad połączonych w szereg, ukazany w układzie współrzędnych entalpia – entropia; p_0 , p_1 , p_2 , p_a — izobary ciśnień zasilania, sygnałów pomiarowych w kolejnych komorach pomiarowych, atmosferycznego; T_0 , T_1 , T_2 — izotermie temperatur: powietrza zasilania i dopuszczalnie od niej odchylonej, atmosferycznego

Procesy tworzenia się i nakładania błędów na wartości sygnałów ciśnieniowych lub różnicy ciśnień, oraz zachodzące wtedy podstawowe przemiany stanu powietrza, pokazano na rys. 6 w polu współrzędnych entalpia – entropia. Uwidoczniony na nim pionowy ciąg izentrop i politrop przedstawia przebieg rozprężania się powietrza w przetworniku pneumatycznym. Początek związanych z tym zjawisk wyznacza przecięcie izobary i izotermie stanu powietrza zasilania; na rys. 6 oznaczony p_0 . Natomiast kresem jego pracy w przestrzeni przetwornika pneumatycznego jest izobara ciśnienia atmosferycznego.

Przy możliwym w założeniu, zastosowaniu gazu nielepkiego i nieściśliwego jako czynnika roboczego, podczas jego przepływu przez dyszę zasilania i przez każdą następną, proces rozprężania będzie następował zgodnie z izentropami o stałych wartościach (pionowymi na rys. 6). Natomiast powietrze fizyczne ogrzewa się ciepłem wytwarzanym podczas pokonywania oporów przepływu. Następujące wtedy dodatnie przyrosty entropii oraz zwolnienia spadku entalpii uwidoczniono

na rys. 6 z pomocą politrop odchylających się ku większym wartościom energii wewnętrznej czynnika. Wynikiem tych przemian są wartości ciśnień statycznych powietrza wypełniającego przestrzeń wewnętrzną przetwornika, na rys. 6 przedstawionych izobarą p_1 i p_2 . Ciśnienia te nabiorą znaczenia sygnałów pomiarowych jeśli obserwowane będą w miejscach praktycznego bezruchu czynnika roboczego. Naturalne w tym procesie, spadki energii wewnętrznej powietrza pracującego uzupełniane są przenikaniem ciepła z zewnątrz. Jego narastanie uwidocznione jest na rys. 6 przyrostami entalpii i entropii przy stałych ciśnieniach, traktowanych jak sygnały pomiarowe p_1 i p_2 oraz powietrza rozpraszającego się na zewnątrz przetwornika przy ciśnieniu praktycznie równym atmosferycznemu. Ostatnia przemiana stanu termodynamicznego czynnika roboczego następuje na zewnątrz przetwornika i nie ma wpływu na wartość ciśnieniowych sygnałów pomiarowych, jak również na ich różnicę.

Odmienne przebiegają reakcje wymienionych sygnałów ciśnieniowych na odchylenia od wartości normalnych ciśnień zasilania i atmosferycznego. Zależnie od znaku, spowodują one, uwidocznione na rys. 6, przemieszczenia izobar p_1 i p_2 , następujące w zgodnym kierunku. Tym samym ich odległość, równa różnicy ciśnień p_1 i p_2 zmieni się o wartość znacznie mniejszą niż odchylenia odjemnej i odjemnika od ich wartości w warunkach normalnych, jak uprzednio wyliczono analitycznie.

Każde z praktycznie możliwych odchyłeń ciśnień i temperatur powietrza zasilania i atmosferycznego wpłynie na zmianę położenia punktu początkowego procesu rozprężania powietrza roboczego. Wyznaczy go przecięcie izobary i izotermę stanu powietrza zasilania, znajdującego się w obszarze ich dopuszczalnych odchyłeń od stanu normalnego. Wtedy, jako wynik opisanych uprzednio przemian, nastąpi istotnej wartości autokompensacja ich skutków, rozumianych jako błędy dodatkowe, jeśli jako sygnał pomiarowy traktowana będzie różnica ciśnień w wewnętrznych komorach przetwornika.

5. PODSUMOWANIE

Opisane we wstępie niepowodzenia w zastosowaniach niektórych odmian pneumatycznych przetworników pomiarowych w znacznej mierze znalazły wytłumaczenie w wynikach analiz wyrażeń funkcyjnych modeli matematycznych i wynikających z nich opisów własności metrologicznych. Jednocześnie stały się widoczne zubożenia wyników uprzednich prac badawczych, jakie nastąpiły na skutek przyjęcia, jako podstawy analiz, nadmiernie uproszczonych modeli teoretycznych. W pierwszym rzędzie na tym ucierpiały wyniki poszukiwań opisów analitycznych badanych przetworników pneumatycznych, wyrażające ogólnie ich własności metrologiczne. Natomiast jak wynika z przytoczonych rozważań oraz innych prac autora, np. [6], analizę przemian energetycznych, zachodzących podczas przepływów powietrza roboczego w kanałach przetworników pneumatycznych, korzystniej jest wywodzić z modeli matematycznych bilansu energetycznego, jakim jest równanie Bernoulli'ego w wersji technicznej. Jego istotną częścią jest opis sumy wydatków energetycznych na

pokonanie oporów przepływów; zależnych przede wszystkim od tarcia wewnętrznego czynnika roboczego, pozostającego w funkcji lepkości, zmiennej z temperaturą gazu roboczego, nie zachowującej stałego poziomu z przyczyn naturalnych i wtórnych, wywołanych ruchem strumienia gazu roboczego.

W czasie pracy pneumatycznych przetworników pomiarowych wymienione zjawiska fizyczne współtworzą proces o przebiegu ciągłym, którego obserwowanym parametrem jest ciśnienie statyczne, traktowane jak sygnał pomiarowy. Jak wynika z dokonanych analiz, jego wartość jest silnie zależna od stopnia rozbudowania kształtów kanałów, amplifikowanego prędkością powietrza roboczego, podniesioną do kwadratu. Powyższe wykazuje, iż podwyższanie ciśnienia zasilania jest również czynnikiem zwiększającym wrażliwość ciśnieniowych sygnałów pomiarowych na przyczyny błędów dodatkowych.

Powiązania przyczyn, zależności bezpośrednich i pośrednich oraz skutków opisanych zjawisk, można prześledzić analizując zapisy sum strat energetycznych, bilansowanych w stosowny sposób dla porównywanych przetworników, przedstawionych wyrażeniami funkcyjnymi (22), (23), (24):

— dla przetwornika kaskadowego z rys. 1

$$F_{str}(z)_k = K_1 \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + K_2 \left(\frac{f_1 \varphi_1}{f_2 \varphi_2} \right)^2 + K_z (f_1 \varphi_1)^2 \quad (22)$$

— dla przetwornika eźektorowego z rys. 3

$$F_{str}(z)_e = K_1 \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + \left(1 - \frac{f_1}{f_2} \right)^2 + \frac{l_2}{d_2} K_2 \left(\frac{f_1 \varphi_1}{f_2 \varphi_2} \right)^2 + K_z (f_1 \varphi_1)^2 \quad (23)$$

— dla przetwornika kaskadowego szeregowego z rys. 5

$$F_{str}(z)_{zk} = K_1 \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + K_2 \left(\frac{f_2 \varphi_2}{f_1 \varphi_1} \right)^2 + K_3 \left(\frac{f_2 \varphi_2}{f_3 \varphi_3} \right) + K_z (f_2 \varphi_2)^2 \quad (24)$$

Konfrontując składniki sum (22), (23), (24), opisujących straty powodowane zjawiskami fizycznymi o wspólnej naturze, dostrzega się wpływ budowy poszczególnych elementów przepływowych tworzących przetworniki, na ich udziały w ogólnej wartości strat energetycznych i konsekwentnych błędów dodatkowych. W dokonanej ocenie, szczególnie szeroką zmienność swoich wartości wykazuje składnik sumy strat strumienia powietrza, pracującego w przetworniku eźektorowym, zapisanej wyrażeniem (23). Przyczyną jest, konieczne dla poprawnego funkcjonowania wydłużenie kanału dyszy pomiarowej tego przetwornika, nie wymagane w innych odmianach przetworników pneumatycznych; uwidocznione porównaniem z nie odpowiednimi składnikami zapisów sum strat energetycznych.

Dokonania wzajemnych porównań wyrażeń funkcyjnych (4), (11), (17) w powiązaniu z wykresami z rys. 2, 3, 5 ukazują przyczyny zróżnicowania uczuleń procesów tworzenia wartości sygnałów pomiarowych na zmiany stanu powietrza zasilania

i otoczenia. Wywiedzione wnioski, jak wyniki wszystkich dokonanych analiz, rekomendują dla praktycznych zastosowań przetwornik kaskadowy szeregowy, zespolony z układem wyliczającym różnice jego ciśnieniowych sygnałów pomiarowych. Przedstawiony nowy rodzaj przetwornika i sygnału pomiarowego o ulepszonych właściwościach metrologicznych, jest przykładem konstrukcji, poprzedzonych nielicznymi analogiami o równie korzystnych ocenach własności użytkowych.

Jak ukazują sumy geometryczne (5), (16), (19), przypadkowe odchylenia wartości ciśnień zasilania i atmosferycznego w tworzeniu błędów dodatkowych amplifikowane są przez współczynniki liczbowe, poznane z analiz modeli matematycznych badanych przetworników a więc zależne od ich konstrukcji. Przy wyliczaniu wartości składowych przypadkowych błędów dodatkowych, wspomniane współczynniki można traktować jak średnie ważone wywołujących je wpływów fizycznych. Wzajemne porównania tak rozumianych wielkości, mnożących te same przyczyny błędów dodatkowych, działające na przetworniki różnych odmian, szeregują je pod względem uległości na niepożądane zjawiska fizyczne. Średnie ważone o najmniejszych wartościach wykazują, iż przetwornik kaskadowy szeregowy, wytwarzający sygnał różnicy ciśnień jest najmniej wrażliwy na fizyczne przyczyny, wywołujące błędy dodatkowe.

Oznaczenia

Z	— szerokość szczeliny pomiarowej w sensorze pneumatycznym,
p_0, p_a, p_1, p_2	— ciśnienia: zasilania, atmosferyczne, ciśnieniowe sygnały pomiarowe 1 i 2,
$\Delta p_0, \Delta p_a$	— dopuszczalne odchylenia graniczne ciśnień zasilania i atmosferycznego od stanu normalnego,
$\Delta p_1, \Delta(p_1 - p_2)$	— odchylenia graniczne sygnałów ciśnieniowych i różnicy ciśnień;
T_0, T_a, T_1, T_2	— temperatury mas powietrza zasilania i atmosferycznego, oraz w komorach sygnałów pomiarowych;
$\Delta T_0, \Delta T_a$	— dopuszczalne odchylenia graniczne temperatury mas powietrza zasilania i atmosferycznego stanu normalnego;
$\dot{m}(z)$	— strumień masy powietrza roboczego, zmienny w funkcji Z ;
p_g	— ciśnienie w komorach przetworników pneumatycznych przy Z większych od zmieniających wartość sygnału pomiarowego;
$\rho_0, \rho_a, \rho_1, \rho_2$	— gęstości mas powietrza: zasilania, atmosferycznego w komorach sygnałów pomiarowych;
w_i	— prędkość strugi powietrza roboczego w przekrojach elementów przepływowych $i=0, 1, 2, Z$;
l_i, L	— długości kanałów przepływowych, np. w dyszach, gdzie strumień pracującego powietrza osiąga prędkości niepomijalne;
d_i	— średnica kanału przepływowego, np. w dyszy;
A, B, C, C_i, D	— stałe obliczeniowe w modelach matematycznych pneumatycznych przetworników pomiarowych;

u_0, u_1	— dynamiczne współczynniki lepkości powietrza zasilania i pracującego we wnętrzu przetwornika pneumatycznego;
H	— naprężenia styczne między warstwami powietrza w ruchu uwarstwionym,
$F_{st}(z)$	— suma strat energetycznych strumienia powietrza pracującego we wnętrzu przetwornika pneumatycznego;
$F_k(z)$	— funkcja korygująca różnice charakterystyk przetworzenia wytyczonych doświadczalnie i obliczeniowo;
E	— kąt ekspansji strumienia powietrza;
K_i	— współczynniki strat energetycznych strumienia powietrza roboczego;
φ_1	— współczynnik kontrakcji
r_i, R	— promienie przekrojów kanałów dysz, narastające od osi do krańców średnic.

LITERATURA

1. Załmanzon L.A., *Aerogidrodinamiceskije metody izmierienija wchodnych parametrow awtomatycznych sistem*. Izdatielstwo Nauka, Moskwa 1964.
2. Bałakszin O.B., *Awtomatizacija pniewmatycznego kontrolja razmierow w maszynostrojenii*. Maszynostrojenie. Moskwa 1964.
3. Chorowski B., Werszko M., *Mechaniczne urządzenia automatyki*. WNT, Warszawa 1975.
4. Topfer W., Schrepel D., *Berechnung und experimentelle Untersuchung eines verbesserten Systems Duse-Prallplatte*. Messen-Steuer-Regeln 1965 H5.
5. Lotze W., *Vorduse mit Diffusor im Schaltung der pneumatischen Langenmesstechnik*. Feingeratetechnik 1973 H6.
6. Zelczak A., *Analiza wybranych układów elementów przepływowych w czujnikach pneumatycznych do pomiarów długości, przy określaniu statycznych charakterystyk metrologicznych*. Politechnika Warszawska. Warszawa 1977.
7. Prosnak J., *Mechanika Płynów*. PWN, Warszawa 1973.
8. Kijkowski J., Bukowski J., *Mechanika płynów*. PWN, Warszawa 1982.
9. Piedi E., *Szirokopriedielnyje pniewmatičeskie pribory dlja awtomatycznego kontrolja razmierow*. Referat w zbiorze: *Pribory i sriedstwa dlja aktywnego kontrolja razmierow na mietallobrabatwyajuszczich stankach*. Maszynostrojenie. Moskwa 1965.
10. Staniszewski B., *Termodynamika*. PWN, Warszawa 1977.

ADDITIONS ERRORS OF AIR PRESSURE MEASURING SIGNALS

S u m m a r y

The mathematical models of pneumatic measuring transducers generating pressure measuring signals are analyzed. The results obtained enabled the classification of measured objects according to the susceptibility to the reasons of occurrence of the additions errors and also the selection of measuring transducer with improved metrological features.