

Janusz JANICZEK

KATEDRA METROLOGII ELEKTRONICZNEJ I FOTONICZNEJ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
UL. B. PRUSA 53/55 WROCŁAW 50-170

Przetworniki rezystancyjne do pomiaru strumienia gazu

dr inż. Janusz JANICZEK

Docent w Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej. Jest absolwentem Wydziału Elektroniki tej uczelni – rocznik 1979. Po ukończeniu studiów pracował w Instytucie Metrologii Elektronicznej gdzie w 1976 r. obronił pracę doktorską.

Jego zainteresowania dotyczą analogowych torów pomiarowych, przetworników A/C i C/A oraz mikrokontrolerów w zastosowaniu do aparatury pomiarowo-kontrolnej.



e-mail: janusz.janiczek@pwr.wroc.pl

Streszczenie

W artykule opisano przetworniki rezystancyjne do pomiaru przepływu gazów. Opisano procedury projektowania przetworników dla przepływu laminarnego i przeprowadzono porównania z przetwornikami z efektem turbulentnym.

Słowa kluczowe: przetworniki pomiarowe, pomiar przepływu gazu

Resistance transducers for the measurement of gas flow

Abstract

This paper presents the resistance transducers for the gas flow measurement. The procedures of designing the transducers for laminar flow were described. Comparisons of transducers with turbulent effect were conducted.

Keywords: resistance transducers, gas flow measurement

1. Wstęp

W obecnej chwili obserwuje się wzrost zapotrzebowania na przyrządy pomiarowe do pomiaru prędkości przepływu gazów, lub pomiaru przepływu objętościowego o dokładności pomiaru 0.5% i lepszej, z szerokim zakresem pomiaru, w miarę o małych gabarytach, łatwych w obsłudze. Mogą one mieć zastosowanie między innymi do kontroli i testowania liczników gazowych w miejscu ich zainstalowania. Opracowano wiele metod pomiarowych [1, 2, 3, 4], co świadczy o ciągłych poszukiwaniach dobrych rozwiązań konstrukcyjnych.

Pomiar prędkości przepływu gazów, zwłaszcza z dużą dokładnością, nie jest do końca rozwiązany. Istniejące przyrządy pomiarowe są drogie, mają długi czas odpowiedzi na sygnał wejściowy, niektóre są niewygodne w użyciu. Stały rozwój mikrokontrolerów – zwiększenie szybkości ich działania, możliwość zwiększenia precyzji obliczeń oraz pojawianie się nowych czujników i przetworników o coraz większych dokładnościach przetwarzania sygnałów przy równoczesnym zmniejszeniu ceny jednych i drugich daje możliwość opracowania nowych przyrządów pomiarowych o lepszych parametrach przy niższych cenach wykorzystujących wcześniej znane metody pomiarowe. Jedną ze znanych metod pomiarowych wykorzystywanych do pomiaru przepływu jest pomiar spadku ciśnienia na elemencie rezystancyjnym. Ze względu na charakter przepływu można wykorzystać albo zakres przepływu laminarnego lub zakres przepływu turbulentnego.

W Katedrze Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej opracowano i wykonano

mikroprocesorowy miernik do pomiaru przepływu objętościowego, przeznaczony do sprawdzania liczników gazowych. Miernik ten był wyposażony w zestaw rezystancyjnych czujników pomiarowych.

Zakresy pomiarowe czujników musiały pokrywać zakresy pomiarowe liczników gazowych typu G4, G6, G10 i G25. W tabeli 1 podane są charakterystyczne punkty pomiarowe dla tych liczników określone w normach [14, 15].

Norma podaje przy jakich obciążeniach należy wyznaczać błędy wskazań. Dla badań niepełnych zaleca się wykonać pomiary przy obciążeniach: Q_{min} , $0,2Q_{max}$, i Q_{max} (choć dopuszcza się wykonywanie sprawdzenia także przy innych obciążeniach pod określonymi warunkami), a dopuszczalny błąd urządzenia kontrolnego nie powinien być większy od 0,3 wartości błędu dopuszczalnego granicznego gazomierza badanego.

Tab. 1. Zakresy pomiarowe liczników gazowych.

Tab. 1. Range of the gas flowmeter.

Lp.	Typ licznika	Q_{min} [m ³ /h]	Q_{nom} [m ³ /h]	Q_{max} [m ³ /h]	Q_{max} [m ³ /s]x10 ³	Q_{max} / Q_{min}
1.	G4	0.04	4.0	6.0	1.66	150
2.	G6	0.06	6.0	10.0	2.77	166
3.	G10	0.10	10.0	16.0	4.44	160
4.	G25	0.25	25.0	40.0	11.11	160

Z powyższej tabeli wynika, że zakres pomiarowy liczników jest bardzo szeroki a stosunek wartości minimalnej zakresu do wartości maksymalnej wynosi od 150 do 166. Stawia to wysokie wymagania dla projektowanych czujników pomiarowych, tym bardziej, że dopuszczalny błąd pomiarowy czujników nie powinien przekraczać 0.5%. Zastosowanie w mierniku przepływu mikrokontrolera może trochę ułatwić zadanie projektowe, gdyż można przeprowadzić linearyzację charakterystyki czujnika i uwzględnić wpływ czynników dodatkowych na jego dokładność.

W oparciu o rozważania teoretyczne można stwierdzić, że czujnik pracujący w zakresie przepływu laminarnego, w przeciwieństwie do czujnika z przepływem turbulentnym, powinien mieć lepszą liniowość i szerszy zakres przetwarzania, ale będzie to okupione większymi gabarytami i bardziej złożoną budową. W praktyce, na zachowanie się czujników mają wpływ różnorodne czynniki nieuwzględnione w obliczeniach teoretycznych. Ponadto przy przepływie turbulentnym należy liczyć się z nieciągłością charakterystyki wywołaną, przy bardzo małych przepływach, przejściem od stanu przepływu laminarnego do stanu przepływu turbulentnego i odwrotnie. Problem jest tym bardziej istotny, że występuje histereza. W takim przypadku należałoby albo ograniczyć dolny zakres przepływu, albo wprowadzić dodatkowe elementy konstrukcyjne gwarantujące ciągły przepływ turbulentny. Dla porównania właściwości obydwu typów czujników zaprojektowano i wykonano odpowiednie czujniki dla wybranych zakresów pomiarowych i przeprowadzono ich badania. Czujniki z przepływem turbulentnym zostały opisane w [10, 11, 12]. Natomiast sposób projektowania czujników z przepływem laminarnym i ich wyniki

badan oraz porównanie z czujnikami z przepływem turbulentnym są przedstawione w poniższym artykule.

2. Przetwornik z przepływem laminarnym

Przepływ laminarny można uzyskać przy przepływie gazu przez cienką rurkę, gdy liczba Reynoldsa nie przekroczy wartości 2300. Dla dużych przepływów objętościowych Q należy założyć, że przepływ trzeba będzie rozłożyć na kilkanaście lub kilkadziesiąt równoległych rurek.

Warunki przepływu laminarnego w rurce, są określone następującymi zależnościami [5, 7, 8, 9]:

- a) - maksymalna prędkości przepływu związana z graniczną liczbą Reynoldsa:

$$R_e = \frac{v_{\max} \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (1)$$

- b) - spadek ciśnienia na rurce przy przepływie laminarnym:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot l \cdot v \cdot \mu}{d^2} \quad (2)$$

Spełnienie warunku (1) na przepływ laminarny narzuca odpowiednią średnicę d rurki przy maksymalnym przepływie v_{\max} . Przepływ objętościowy dla k rurek jest określony zależnością:

$$Q = k \cdot \frac{v \cdot \pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

gdzie:

- R_e - liczba Reynolds'a,
- v - prędkość przepływu [m/s]
- ρ - gęstość gazu [kg/m^3]
- d - średnica rurki [m]
- μ - dynamiczny współczynnik lepkości [Pas]
- l - długość rurki [m]
- Δp - spadek ciśnienia na rurce [Pa]
- Q - przepływ objętościowy [m^3/s]
- k - liczba rurek

Do obliczeń przyjęto, że liczba Reynolds'a, z pewnym marginesem bezpieczeństwa, powinna być nie większa niż 2300. Maksymalny spadek Δp_{\max} na rurce, wynikający z zastosowanego różnicowego czujnika ciśnienia nie powinien przekraczać 250 Pa. Maksymalne przepływy objętościowe Q_{\max} wynikają z przyjętych założeń i są podane w tabeli 1, przy czym w poniższych obliczeniach przyjęto wartość przepływu objętościowego dla licznika G4 wynoszącą $1.66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Ponieważ liczba Reynolds'a jest związana z gęstością gazu i jego lepkością, a te są zależne od temperatury i ciśnienia dlatego przeanalizowano wpływ tych czynników na przepływ.

Dynamiczny współczynnik lepkości gazów jest zależny przede wszystkim od temperatury. Zależność ta jest podawany w postaci wyrażeń algebraicznych lub w postaci tabelarycznej [5, 6]. Dla celów obliczeniowych został wyznaczony wielomian aproksymujący dane tabelaryczne w następującej postaci:

$$\mu_T \cdot 10^8 = -1,0133 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 8,9197 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 + -2,5609 \cdot 10^2 \cdot T + 2,5761 \cdot 10^4 \quad (4)$$

Wielomian ten został również wykorzystany do korekty temperaturowej wyniku pomiaru przepływu objętościowego w mierniku mikroprocesorowym.

Gęstość gazu jest zależna przede wszystkim od temperatury i ciśnienia, co przedstawia zależność (5):

$$\rho_{TP} = \frac{3.483407 \cdot G \cdot P}{Z \cdot T} \quad (5)$$

gdzie:

- G - specyficzny ciężar właściwy gazu (stosunek wagi molekularnej gazu do wagi molekularnej powietrza)

P - ciśnienie absolutne [kPa]

Z - współczynnik ściśliwości gazu

T - temperatura absolutna [K]

Przyjęto, że dla powietrza w zakresie przewidzianych zmian temperatury oraz ciśnienia, współczynnik ściśliwości Z nie ulega zmianie, a specyficzny ciężar właściwy gazu wynosi 1.

Dla określenia wpływu temperatury i ciśnienia na liczbę Reynoldsa w wyrażeniu (1) określono zależność tej liczby w danej temperaturze i ciśnieniu względem wartości w temperaturze i ciśnieniu odniesienia:

$$m_R = \frac{\mu_0 \cdot \rho_{TP}}{\mu_T \cdot \rho_{00}} \quad (6)$$

gdzie:

μ_0 - współczynnik lepkości w temperaturze odniesienia T_0 .

μ_T - współczynnik lepkości w temperaturze T .

ρ_{00} - gęstość w temperaturze i ciśnieniu odniesienia (T_0, P_0).

ρ_{TP} - gęstość w temperaturze T i ciśnieniu P .

Przyjęto, że warunkami odniesienia jest temperatura $T_0 = 0^\circ\text{C}$, (273.15 K) i ciśnienie $P_0 = 101 \text{ kPa}$.

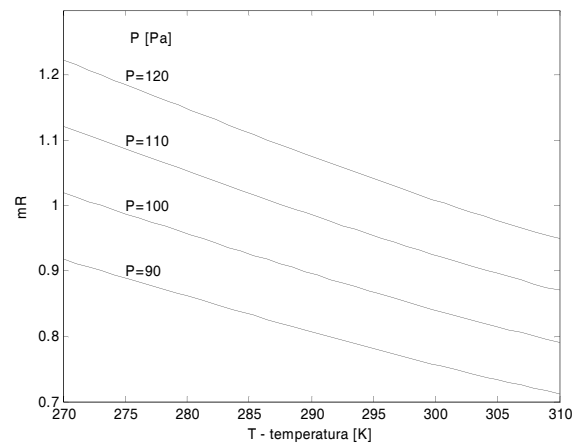
Przyjęto również, że czujnik będzie pracował w zakresie zmian temperatury od 0° do 35°C ($273.15 \div 308.15 \text{ K}$) i zmian ciśnienia od 90 kPa do 120 kPa .

Współczynniki lepkości μ oraz gęstość ρ dla powietrza w warunkach odniesienia, na podstawie [5 i 6] wynoszą odpowiednio $17.08 \cdot 10^{-6} \text{ [Pas]}$ i $1.292 \text{ [kg/m}^3]$.

Stosunek ρ_{TP}/ρ_{00} jest określony prostą zależnością:

$$\frac{\rho_{TP}}{\rho_{00}} = \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} \quad (7)$$

Zależność (6), uwzględniająca wyrażenie (7) jest przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Względna zmiana liczby Reynoldsa w zależności od temperatury i ciśnienia
Fig. 1. Relative Reynolds number vs. temperature and pressure.

Z wykresów przedstawionych na rysunku 1 wynika, że przy danej prędkości przepływu i średnicy kapilary wzrost ciśnienia przepływającego powietrza spowoduje zwiększenie liczby Reynoldsa, a wzrost jego temperatury – jej obniżenie. Żeby nie przekroczyć założonej wartości tej liczby, obliczenia projektowe czujnika należy przeprowadzić dla maksymalnej wartości ciśnienia i minimalnej temperatury.

Dla zaprojektowania czujnika należy z zależności (1, 2 i 3) wyliczyć średnicę d , długość l i liczbę kapilar k . Ponieważ nieznaną jest a priori, wartość v_{\max} , zapewniająca przepływ laminarny dlatego bez wstępnego założenia którejkolwiek z tych wartości nie można rozwiązać powyższego układu równań. Rozwiązaniem tego problemu może być wstępne oszacowanie któreś z powyższych wartości. W tym celu zależności (1), (2) i (3)

zostały przekształcone tak by wyrażały zależność prędkości v w funkcji średnicy d rurki:

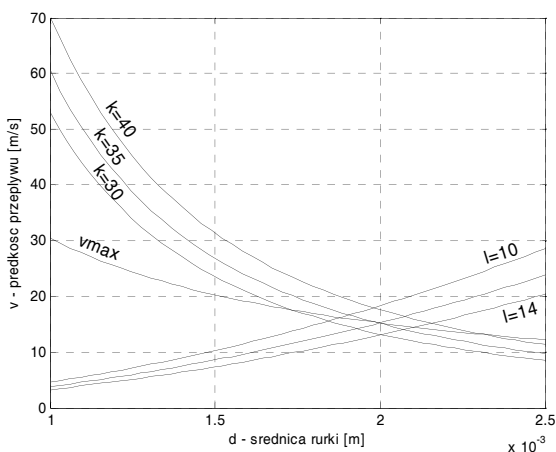
$$v_{\max} \leq \frac{2300 \cdot \mu}{\rho \cdot d} \quad (8)$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{k \cdot \pi \cdot d^2} \quad (9)$$

$$v = \frac{\Delta p \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot l} \quad (10)$$

W wyrażeniu (9) długość rurki l przyjęto jako parametr z wartościami 10, 12 i 14 cm, a w wyrażeniu (10) liczba rurek k jest także parametrem o wartościach 30, 35 i 40. Wartości μ i ρ , zgodnie z wnioskami wynikającymi z wykresów przedstawionych na rysunku 1, zostały wyliczone dla temperatury 270 K i 120 kPa.

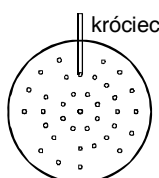
Na podstawie zależności (8, 9 i 10) zostały sporządzone wykresy przedstawione na rysunku 2, przy czym Q , jak napisano wyżej, zostało przyjęte jako równe $1.66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$.



Rys. 2. Wykresy przedstawiające zależności prędkości przepływu w funkcji średnicy rurek.

Fig. 2. Flow rate vs. diameter of tube.

Z analizy przedstawionych wykresów wynika, że wstępnie średnicą kapilary można przyjąć $d = 2 \text{ mm}$. Przy tej wartości średnicy długość części pomiarowej kapilary będzie wynosiła 12 cm, a liczba kapilar - 35. Dla zwiększenia zakresu pomiarowego wystarczy zwiększyć liczbę kapilar. Kapilary zostały umieszczone w cylindrycznej obudowie, rysunek 3, umożliwiającej podłączenie przetwornika do stanowiska pomiarowego.



Rys. 3. Widok rurek w obudowie cylindrycznej.

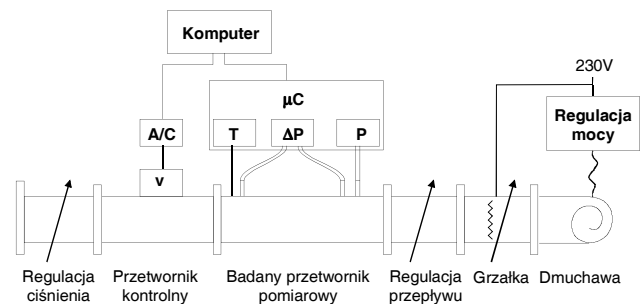
Fig. 3. Pictorial view of tubes in cylindrical enclosure

Ponieważ przed przetwornikiem przepływ odbywa się rurą o znacznej średnicy, należy przyjąć, że przepływ ten będzie przepływem turbulentnym, dlatego dla uspokojenia przepływu rurki, przed punktem pomiarowym należy przedłużyć o odcinek l_w określony zależnością empiryczną [7]:

$$l_w = 0.03 R_e d \quad (11)$$

Dla wartości granicznej liczby Reynoldsa, przyjętej jako 2300 i średnicy $d = 2 \text{ mm}$, wartość l_w jest równa około 14 cm. Odcinek ten jest więc dłuższy niż sam odcinek pomiarowy.

Wyliczenia teoretyczne należy skonfrontować z rzeczywistością, gdyż nie uwzględniają one wszystkich elementów, które mogą wystąpić przy realizacji rzeczywistego przetwornika. Przede wszystkim liczbą kapilar wynosi kilkadziesiąt, a pomiar przepływu odbywa się tylko w jednej. Założenie, że przepływ we wszystkich kapilarach jest jednakowy nie musi być słuszne, gdyż mogą wystąpić pewne różnice w geometrii kapilar, różne gładkości ich ścianek, itp. Ponadto króćce do pomiaru różnicy ciśnień w kapilarze pomiarowej wprowadzają pewne zakłócenia w przepływie, które nie wystąpią w pozostałych kapilarach. Dodatkowym czynnikiem może być różna prędkość przepływającego gazu w rurze doprowadzającej, gdyż jak wiadomo, prędkość przepływu w części centralnej rury jest większa niż przy jej ściankach. Dlatego wykonano pięć sztuk elementów rezystancyjnych i poddano je badaniom na stanowisku pomiarowym, którego schemat jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego do badania przetwornika przepływu.

Fig. 4. Principle block diagram of measurement of the flow transducer.

Stanowisko pomiarowe do badania charakterystyki przetwornika pomiarowego składa się z dmuchawy i regulatora przepływu, przetwornika kontrolnego oraz z regulatora ciśnienia. Sygnał z przetwornika kontrolnego, mierzącego przepływ powietrza V , po przetworzeniu w przetworniku A/C jest doprowadzony do komputera. Do pomiarów spadku ciśnienia ΔP na badanym elemencie rezystancyjnym, ciśnienia P oraz temperatury T w nim występujących zastosowano specjalnie wykonane do tych celów urządzenie mikroprocesorowe [13], zawierające odpowiednie czujniki ciśnienia i temperatury. Przetworzone dane z tych czujników są również wysyłane do komputera.

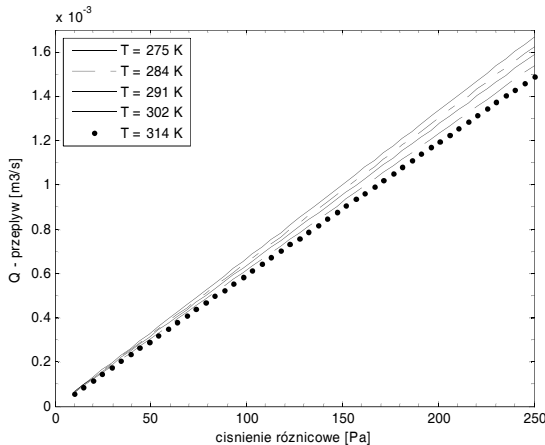
Kombinacja ustawień mocy doprowadzonej do dmuchawy, ustawień regulatorów przepływu i ciśnienia pozwalała na uzyskanie odpowiedniego przepływu V , przy założonym ciśnieniu P . Po ustawieniu prędkości przepływu nastawiana była temperatura. Nastawy były wykonywane ręcznie, metodą kolejnych przybliżeń, co znacznie wydłużało czas pomiarów. Ponadto potrzebny był odpowiednio długi czas na ustalenie się temperatury.

Specjalnie napisany program komputerowy umożliwiał zbieranie danych pomiarowych z urządzeń, a następnie wylczył, metodą aproksymacji, charakterystyki przepływu mierzonego przetwornika oraz wyznaczał zakres niepewności pomiarowej. Ponadto komputer wskazywał bieżące dane dotyczące ciśnienia, przepływu i temperatury, co pozwalało na określenie momentu ustabilizowania się poszczególnych wielkości.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obróbce statystycznej uzyskanych wyników pomiarów otrzymano charakterystyki elementu rezystancyjnego przedstawione na rysunku 5. Szczegółowa analiza danych pokazała, że można je aproksymować linią prostą, przy błędzie nie przekraczającym 1%. W obszarze początkowym od 0 do około 10 Pa występuje stan nieokreśloności wynikający ze zbyt małej czułości i histerezy przetwornika ciśnienia różnicowego.

Nie stwierdzono wpływu zmian ciśnienia przepływającego powietrza na przebieg charakterystyk, natomiast zgodnie z zależnościami teoretycznymi, występuje wpływ temperatury. Stąd wniosek, że przetwornik do pomiaru przepływu oprócz czujnika ciśnienia różnicowego musi posiadać czujnik temperatury, a do końcowego wyniku pomiaru należy wprowadzać odpowiednią korektę temperaturową.

Badania wszystkich elementów rezystancyjnych pokazało także, że charakterystyki dla poszczególnych elementów różnią się między sobą od 3% do 5%. Wynika stąd konieczność kalibracji każdego takiego przetwornika pomiarowego.



Rys.5. Charakterystyki przetwornika pomiarowego
Fig. 5 Results of air flow vs. difference of pressure

3. Przetwornik z przepływem turbulentnym

Oprócz przetworników z przepływem laminarnym wykonano i przebadano przetworniki z przepływem turbulentnym [10, 11, 12].

Zasada pomiaru w przetwornikach z przepływem turbulentnym była podobna jak w przetwornikach z przepływem laminarnym, to znaczy mierzono spadek ciśnienia na oporze rezystancyjnym, który był również wykonany w postaci zbioru cienkich rurek umieszczonych w obudowie cylindrycznej, z tym że były one krótsze, a dla przetworników o większej granicznej prędkości przepływu miały różne średnice. Ponadto króćce do pomiaru ciśnienia bezwzględного i różnicy ciśnień były wyprowadzone bezpośrednio z obudowy cylindrycznej, przed i za elementem rezystancyjnym, a więc w miejscach, gdzie występuje przepływ turbulentny.

Przeprowadzone badania przetworników z przepływem turbulentnym wykazały, że występująca w nich zależność między prędkością przepływu a spadkiem ciśnienia jest bardziej złożona niż dla przetworników z przepływem laminarnym. Przede wszystkim zależność ta jest nieliniowa, a ponadto oprócz wpływu na nią temperatury występuje jeszcze wpływ ciśnienia przepływającego powietrza.

Ponadto badania pokazały też, że zależności empiryczne określające prędkość przepływu różnią się w sposób istotny od zależności teoretycznych. W efekcie uzyskano następującą zależność na przepływ objętościowy:

$$Q = \frac{-a_1 \frac{\mu(T)}{\mu(T_0)} + \sqrt{\left(a_1 \frac{\mu(T)}{\mu(T_0)}\right)^2 + 4a_2 \frac{PT_0}{P_0 T} (\Delta P - a_0)}}{2a_2 \frac{PT_0}{P_0 T}} \quad (12)$$

Współczynniki a_0 , a_1 i a_2 w wyrażeniu (12) są znajdowane na podstawie wyników z odpowiednio przeprowadzonych pomiarów uwzględniających różne wartości temperatur i ciśnień przepływającego powietrza, przy czym, podobnie jak dla

przetworników z przepływem laminarnym, także tutaj współczynniki te muszą być znajdowane dla każdego przetwornika osobno.

Z wyrażenia (12) wynika, że zależność między przepływem objętościowym, a spadkiem ciśnienia na rezystancji jest nieliniowa, a ponadto występowanie współczynnika a_0 powoduje, że charakterystyka przetwornika nie przechodzi przez punkt (0,0). Okazało się również, że zakres pomiarowy przetwornika jest prawie o połowę mniejszy niż przetwornika z przepływem laminarnym. Wynika to stąd, że nachylenie pochodnej charakterystyki przetwornika pod koniec zakresu jest coraz mniejsze.

4. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule tok projektowania przetwornika do pomiaru przepływu z elementem rezystancyjnym pracującym w zakresie przepływu laminarnego został potwierdzony doświadczalnie i osiągnięto założone parametry.

Porównując zaprojektowane i wykonane obydwa typy przetworników należy stwierdzić, że przetworniki z przepływem laminarnym są bardziej złożone konstrukcyjne – muszą zawierać jedną z rurek z wyprowadzonymi króćcami i są dość długie, głównie za sprawą wymaganych przewodów potrzebnych dla uspokojenia przepływu. Z drugiej strony mają większy zakres pomiarowy, liniowe charakterystyki, co ułatwia procedury kalibracyjne, a wartość przepływu nie zależy od ciśnienia przepływającego powietrza.

Natomiast przetworniki z przepływem turbulentnym są prostsze konstrukcyjnie i znacznie krótsze. Jednak mają mniejszy zakres pomiarowy, ich charakterystyki są nieliniowe, a układ pomiarowy jest bardziej rozbudowany, gdyż musi zawierać przetwornik ciśnienia absolutnego. Pociąga to za sobą bardziej skomplikowane procedury kalibracyjne i zmniejsza dokładność pomiaru. Ponadto dodatkowy przetwornik ciśnienia podnosi cenę przetwornika.

5. Literatura

- [1] Peters F., Kuralt T. A gas flowmeter of high linearity. Flow Meas. Instrum., Vol.6, No. 1, 1995, str. 29-32
- [2] Wojtkowiak J., Kim W. N., Hyun J. M., Numerical simulations of a piston-type flowmeter of high linearity. Flow Meas. Instrum., Vol.7, No. 2, 1996, str. 69-75
- [3] Morris S. C., Neal D. R., Foss J. F., Cloud G. L., A moment-of-moment flux mass air flow measurement device. Meas. Sci. Technol. No 12, 2001. str. N9-N13.
- [4] Ying Xu, Tao Zhang, Huaxiang Wang, Deyu Chen. Smart floating element flowmeter based on a capacitive angular displacement transducer. Flow Meas. Instrum., No. 16, 2005, str. 1-6
- [5] International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology (1st Electronic Edition). Knovel 2003
- [6] Smithsonian Physical Tables (9th Revised Edition). Knovel 2003
- [7] Jeżowiecka-Kabsch K. Szewczyk H. Mechanika płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [8] Kabza Z. Kostyrow K. Metrologia przepływów, gęstości i lepkości. Opole 1995.
- [9] Kabza Z. Pomiary strumieni płynów. Opole 1996.
- [10] Janiczek J. Woźniak M. Miernik przepływu i objętości dla potrzeb gazownictwa. MWK 2003. Waplewo 2003. s. 109-114.
- [11] Janiczek J. Woźniak M. Calibration of a multiparameter sensor: an example of flow meters with unnormalized pneumatic resistance. Metrol. Meas. Syst. 2003, Vol 10 nr 4, s. 409-416.
- [12] Janiczek J. Miernik przepływu i objętości. KM, Wrocław 2004. T.1, s. 275-278.
- [13] Janiczek. Woźniak M. Mikrokontrolery rodziny MSP430 w przyrządach pomiarowych. Pomiary Autom. Robot. 2004. Nr 5, s. 21-23.
- [14] Norma Polska PN-92/M-54832/02: Gazomierze miechowe. Wymagania i badania.
- [15] Norma Polska ON-83/M-54831: Gazomierze. Podział, oznaczenie, nazwy i określenia.