

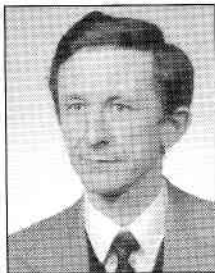
Stanisław WALUŚ

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
INSTYTUT AUTOMATYKI

Zmniejszenie błędu metody związanego ze zniekształconym rozkładem prędkości w dwudrogowym przepływomierzu ultradźwiękowym

Dr inż. Stanisław WALUŚ

- absolwent Wydziału Automatyki Politechniki Śląskiej, dyplom (1970) w zakresie automatyki przemysłowej, doktorat (1980). Adiunkt w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Zakład Systemów Pomiarowych). Specjalność naukowa - metrologia wielkości nieelektrycznych, szczególnie pomiary strumienia płynu. Autor lub współautor ponad 60 publikacji. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej i sekretarzem Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach.



Streszczenie

Przedstawiono koncepcję dwudrogowego przepływomierza ultradźwiękowego z drogami skrzyżowanymi. Podano zasady tworzenia modeli matematycznych zniekształconych rozkładów prędkości i przedstawiono cztery modele. Dla tych modeli wyprowadzono wzory na współczynnik kształtu rozkładu prędkości oraz na błąd metody. W przypadku zniekształconego nieosiowosymetrycznego rozkładu prędkości uzyskuje się znaczne zmniejszenie błędów metody dla przepływomierza dwudrogowego w porównaniu z jednodrogowym.

Abstract

The conception of two-path primary device of an ultrasonic flowmeter with crossed pates is introduced. The rules of modelling of distorted velocity distributions are introduced and there are given four mathematical models.

The distorted velocity distribution consist of two elements: an axisymmetrical element of a velocity distribution and distorted one. The simplified diagram of the primary device of an ultrasonic flowmeter is introduced and the velocity distribution shape coefficient is defined and calculated for these four models.

The method errors for the one-path and two-path primary device of an ultrasonic flowmeter are calculated and compared. For nonaxisymmetrical distorted velocity distribution two-path primary device with crossed pates gives radical error reducing.

Wprowadzenie

Przepływomierze ultradźwiękowe znajdują coraz to szersze zastosowania w różnych dziedzinach: w przemyśle, w gospodarce wodnej i w medycynie [4, 6, 10, 11, 15, 17]. Są stosowane zarówno do pomiarów strumienia objętości w przewodach zamkniętych (rurociągach) jak i otwartych (kanałach). Artykuł dotyczy przepływomierzy ultradźwiękowych dla rurociągów o przekroju poprzecznym kołowym. Przepływomierz ultradźwiękowy jest przepływomierzem próbkującym [12], ponieważ wielkość mierzona, tzn. strumień objętości obliczany jest na podstawie prędkości średniej płynu w jednej lub kilku drogach fali ultradźwiękowej. W normalnych warunkach stosowania istnieje możliwość uwzględnienia współczynnika kształtu rozkładu prędkości [8] i wyznaczenie strumienia objętości z wystarczającą na ogół dokładnością, nawet dla przepływomierza jednodrogowego.

W przypadku zniekształconego rozkładu prędkości mogą powstać znaczące błędy metody [9, 14] i wtedy należałoby stosować przepływomierz ultradźwiękowy z przetwornikiem pierwotnym wielodrogowym [14]. Najczęściej stosowane są wtedy przepływomierze dwudrogowe z drogami równoległy-

mi do siebie [1, 2, 3, 7] pozwalające na znaczne zmniejszenie błędów. Wykonanie urządzenia pierwotnego dwudrogowego u producenta nie przedstawia trudności, natomiast dokładne zainstalowanie czterech głowic z czujnikami ultradźwiękowymi na istniejącym rurociągu (który często nie może być opróżniany) tak, aby drogi fali ultradźwiękowej były równoległe do siebie i znajdowały się w ściśle określonych odległościach od osi rurociągu może nastręczać znaczne trudności. Wobec tego autor analizuje urządzenie pierwotne z drogami skrzyżowanymi rozmieszczonymi średnicowo [8]. Taki układ nie zapewnia zmniejszenia błędów metody w przypadku zniekształconego, ale osiowosymetrycznego rozkładu prędkości, natomiast pozwala na ograniczenie błędów, gdy zniekształcenie rozkładu nie jest osiowosymetryczne, co najczęściej ma miejsce w praktyce. Celem artykułu jest pokazanie drogą modelowania matematycznego, że zastosowanie dwóch dróg średnicowych skrzyżowanych daje zmniejszenie błędów metody w stosunku do urządzenia pierwotnego jednodrogowego w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości.

Modelowanie zniekształconych rozkładów prędkości

Przyjmuje się następujący model osiowosymetrycznego rozkładu prędkości [5, 13], (w którym prędkość v oznacza składową prędkości płynu wzdłuż osi przewodu; dalej, dla uproszczenia opisu będzie używany termin: „prędkość płynu“):

$$v = v_0 \left[1 - (r/R)^m \right] \quad (1)$$

gdzie: v_0 - prędkość w osi przewodu zamkniętego,
 r - promień bieżący,
 R - promień wewnętrzny rurociągu,
 m - wykładnik zależny od rodzaju przepływu
($m = 2$ dla przepływu uwarstwionego (laminarnego) i kilka - kilkanaście dla burzliwego (turbulentnego)).

Model zniekształconego rozkładu prędkości można przedstawić jako sumę dwóch składowych: składowej niezniekształconej i składowej zniekształcającej:

$$v(r, \vartheta) = v_1(r) + v_2(r, \vartheta) \quad (2)$$

gdzie: $v_1(r)$ - składowa niezniekształcona odpowiadająca normalnym warunkom przepływu, wyrażona np. wzorem (1),
 $v_2(r, \vartheta)$ - składowa zniekształcająca (najczęściej nieosiowosymetryczna),
 ϑ - współrzędna kątowa.

Zasady modelowania rozkładów prędkości (w tym zniekształconych) autor przedstawił w [16]. Składowa zniekształcająca rozkładu prędkości może być opisana wzorem:

$$v_2(r, \vartheta) = v_0 a \frac{r}{R} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^k \right] \frac{\vartheta}{2\pi} \sin b \vartheta \quad (3)$$

gdzie: a, b - współczynniki,
 k - wykładnik.

Współczynnik a decyduje o udziale składowej zniekształcającej i dla $a = 0$ rozkład prędkości jest osiowosymetryczny. Wykładnik k decyduje o kształcie składowej zniekształcającej rozkładu prędkości, natomiast wartość b musi spełniać warunek $b = n/2$, gdzie n jest liczbą naturalną. Spełnienie tego warunku zapewnia, że funkcja modelująca jest funkcją ciągłą dla $\vartheta = 0$. Przyjmując wartości $b = 0,5; 1; 1,5; 2$ otrzymuje się charakterystyczne kształty składowej zniekształcającej rozkładu prędkości. Czynniki $[1 - (r/R)^k]$ zapewnia zerowanie się prędkości przy ścianie przewodu zamkniętego, natomiast czynnik r/R zapewnia ciągłość funkcji modelującej dla $r = 0$ oraz dla kątów $\vartheta = 0$ i $\vartheta = \pi$. Gdyby nie ten czynnik, to dla $b = 0,5$ i dla $r = 0$ wystąpiłaby nieciągłość wartości prędkości, gdyż $\sin 0 = 0$, natomiast $\sin(\pi/2) = 1$.

Prostszy model uzyskuje się pomijając we wzorze (3) czynnik $\vartheta/2\pi$ i wtedy składowa zniekształcająca jest modelowana zależnością:

$$v_2(r, \vartheta) = v_0 a \frac{r}{R} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^k \right] \frac{\vartheta}{2\pi} \sin b \vartheta \quad (4)$$

W przypadku gdy we wzorze na prędkość składowej zniekształcającej czynnik $\sin b \vartheta$ nie występuje, składowa ta jest osiowosymetryczna, jednak kształt rozkładu prędkości odbiega od kształtu rozkładu prędkości dla normalnych warunków przepływu. Najprostszy model składowej zniekształcającej będzie więc następujący:

$$v_2(r, \vartheta) = v_0 a \frac{r}{R} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^k \right] \quad (5)$$

Składowa zniekształcająca wyrażona wzorem (5) jest osiowosymetryczna i prędkość $v_2(r, \vartheta)$ osiąga wartość maksymalną dla promienia r :

$$r = R \sqrt[k]{\frac{1}{1+k}} \quad (6)$$

Wartość r/R , dla której występuje maksimum prędkości składowej zniekształcającej zmienia się od około 0,6 dla przepływu uwarstwionego do około 0,9 dla przepływu burzliwego.

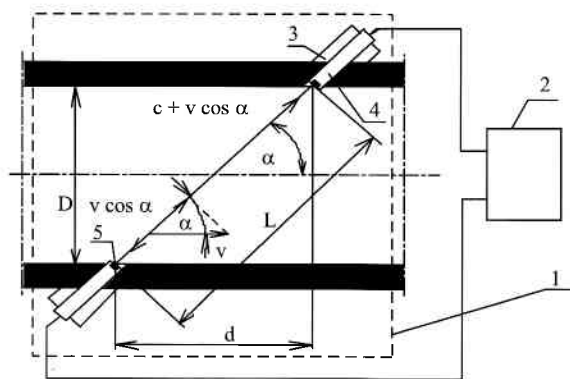
Składowa zniekształcająca rozkładu prędkości może być modelowana również wzorem:

$$v_2(r, \vartheta) = v_0 a \frac{r}{R} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^k \right] \sin^2 b \vartheta \quad (7)$$

Wyznaczanie współczynnika kształtu rozkładu prędkości

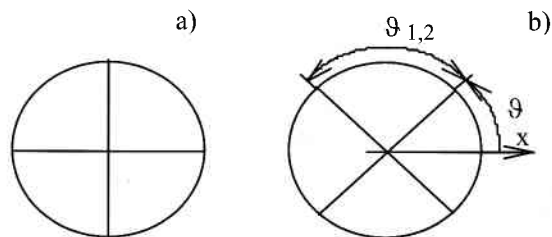
Na rys. 1 przedstawiono szkic urządzenia pierwotnego przepływomierza jednodrogowego.

Wielkość mierzona, tzn. strumień objętości q_V wyznacza się jako iloczyn prędkości średniej płynu po drodze ultradźwiękowej, pola powierzchni przekroju poprzecznego rurociągu i współczynnika kształtu rozkładu prędkości K , który jest definiowany jako stosunek prędkości średniej płynu po przekroju poprzecznym rurociągu v_A do prędkości średniej płynu po średnicy rurociągu v_D .



Rys. 1. Szkic urządzenia pierwotnego jednodrogowego przepływomierza ultradźwiękowego:

- 1 - przekrój poprzeczny urządzenia pierwotnego,
- 2 - urządzenie wtórne,
- 3 - głowica,
- 4 - sonda,
- 5 - czujnik ultradźwiękowy,
- L - długość drogi fali ultradźwiękowej (odległość między środkami czujników ultradźwiękowych),
- d - rzut odległości L na oś rurociągu,
- $D = 2R$ - średnica wewnętrzna rurociągu



Rys. 2. Schematy urządzeń pierwotnych przepływomierza ultradźwiękowego dwudrogowego z drogami skrzyżowanymi:

- a) w kształcie krzyża greckiego,
- b) w kształcie krzyża św. Andrzeja

Dla zniekształconego rozkładu prędkości współczynnik kształtu rozkładu prędkości jest funkcją kąta ϑ , to znaczy kąta określającego położenie drogi fali ultradźwiękowej (rys. 2):

$$K(\vartheta) = v_A / v_D(\vartheta) \quad (8)$$

Całkując składową osiowosymetryczną rozkładu prędkości wyrażonego wzorem (1) po średnicy przewodu otrzymuje się:

$$v_D = v_0 \frac{m}{m+1} \quad (9)$$

Prędkość średnią po przekroju przewodu oblicza się dla modelu rozkładu prędkości opisanego wyrażeniem (1) z następującą zależnością:

$$v_A = v_0 \frac{m}{m+2} \quad (10)$$

Współczynnik kształtu rozkładu prędkości dla składowej osiowosymetrycznej wyrażonej wzorem (1) na podstawie zależności (8), (9) i (10) oblicza się następująco:

$$K = \frac{m+1}{m+2} \quad (11)$$

Prędkość średnią po średnicy przewodu dla składowej zniekształcającej (najczęściej nieosiowosymetrycznej) wyznacza się całkując prędkość po dwóch promieniach tworzących średnicę, stąd kąty między tymi promieniami a osią x wynoszą odpowiednio ϑ i $\vartheta+\pi$, i wobec tego:

$$v_D = \frac{v_0}{2R} \left[\int_0^R v_1(r, \vartheta) dr + \int_0^R v_2(r, \vartheta + \pi) dr \right] \quad (12)$$

dla $\vartheta \in [0; \pi]$.

Wstawiając (1) i (3) do (2) i całkując po średnicy otrzymuje się wartość średnią v_D :

$$v_D = v_0 \left[\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{8\pi(k+2)} [\vartheta \sin b\vartheta + (\vartheta + \pi) \sin b(\vartheta + \pi)] \right] \quad (13)$$

dla $\vartheta \in [0; \pi]$.

Prędkość średnią płynu po przekroju poprzecznym przewodu dla rozkładu prędkości opisanego wyrażeniami (1), (2) i (3) oblicza się następująco:

$$v_A = v_0 \left[\frac{m}{m+2} + \frac{ak[\sin 2b\pi - 2b\pi \cos 2b\pi]}{6\pi^2 b^2 (k+3)} \right] \quad (14)$$

Współczynnik kształtu rozkładu prędkości wyznacza się na podstawie wyrażen (8), (13) i (14):

$$K = \frac{\frac{m}{m+2} + \frac{ak[\sin 2b\pi - 2b\pi \cos 2b\pi]}{6\pi^2 b^2 (k+3)}}{\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{8\pi(k+2)} [\vartheta \sin b\vartheta + (\vartheta + \pi) \sin b(\vartheta + \pi)]} \quad (15)$$

Wykonując podobne obliczenia dla składowej zniekształcającej rozkładu prędkości opisanej wzorem (4) otrzymuje się:

$$K = \frac{\frac{m}{m+2} + \frac{ak[1 - \cos 2b\pi]}{3\pi b(k+3)}}{\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{4(k+2)} [\sin b\vartheta + \sin b(\vartheta + \pi)]} \quad (16)$$

W przypadku osiowosymetrycznego, zniekształconego rozkładu prędkości, gdy składowa zniekształcająca jest opisana wzorem (5) wartość K będzie wynosiła:

$$K = \frac{\frac{m}{m+2} + \frac{2ak}{3(k+3)}}{\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{2(k+2)}} \quad (17)$$

Dla składowej zniekształcającej wyrażonej wzorem (7) wartość K będzie wynosiła:

$$K = \frac{\frac{m}{m+2} + \frac{k}{3(k+3)} \left(ab - \frac{a}{2b\pi} \sin 2b\pi \cos 2b\pi \right)}{\frac{m}{m+1} + \frac{k}{2(k+2)} \sin^2 b\vartheta} \quad (18)$$

Zmniejszenie błędów metody w przepływomierzu dwudrogowym z drogami skrzyżowanymi

Autor proponuje zastosowanie w urządzeniu pierwotnym dwóch dróg skrzyżowanych, jak pokazano na rys. 2. Wybór tej konfiguracji pozwala na instalowanie głowic z czujnikami ultradźwiękowymi taką samą metodą, jak dla przepływomierza jednodrogowego. W przypadku zmiany współczynnika kształtu rozkładu prędkości K spowodowanej zmianą liczby Reynoldsa lub chropowatością wewnętrznej strony ścianki rurociągu wystąpi taki sam błąd metody, jak dla przepływomierza jednodrogowego, natomiast dla zniekształconego rozkładu prędkości uzyska się zmniejszenie błędu metody.

W przypadku przepływomierza dwudrogowego z drogami średnicowymi (rys. 2) przecinającymi się pod kątem prostym są możliwe dwa rodzaje przetwornika pierwotnego; z drogami w kształcie krzyża greckiego (jedna droga pozioma, druga pionowa) oraz z drogami w kształcie krzyża św. Andrzeja (obydwie drogi ukośne). Ze względu na możliwość występowania fazy gazowej lub stałej w cieczy lub fazy ciekłej w fazie gazowej zalecany jest układ dróg w kształcie krzyża św. Andrzeja.

Błąd względny pomiaru strumienia objętości oblicza się następująco:

$$\delta = \frac{q_V - q_{Vp}}{q_{Vp}} \quad (19)$$

gdzie q_V jest zmierzonym strumieniem objętości (z błędem metody wynikającym z przyjęcia współczynnika kształtu rozkładu prędkości jak dla nieznkształconego rozkładu prędkości), q_{Vp} jest poprawną wartością strumienia objętości.

Poprawną wartość strumienia objętości oblicza się przyjmując poprawną (rzeczywistą) wartość współczynnika kształtu rozkładu prędkości K , to znaczy dla rozkładu zniekształconego:

$$q_{Vp} = v_L K \pi R^2 \quad (20)$$

gdzie v_L jest prędkością średnią płynu w drodze fali ultradźwiękowej i dla drogi średnicowej wynosi ona v_D .

Wartość zmierzona strumienia objętości przy założeniu, że rozkład prędkości jest nieznkształcony będzie błędna i będzie wynosiła:

$$q_V = v_L K_n \pi R^2 \quad (21)$$

gdzie K_n jest współczynnikiem kształtu rozkładu prędkości dla rozkładu nieznkształconego.

Podstawiając (20) i (21) do (19) otrzymuje się:

$$\delta = \frac{K_n}{K} - 1 = K_n \frac{v_w}{v_A} - 1 \quad (22)$$

gdzie v_w jest poprawną (rzeczywistą) wartością prędkości jaka jest mierzona w urządzeniu wtórnym.

Dla urządzenia pierwotnego jednodrogowego z drogą średnicową $v_w = v_D$, to znaczy prędkość ta jest prędkością średnią w średnicy rurociągu, natomiast dla urządzenia pierwotnego wielodrogowego v_w jest wartością średnią wartości poprawnych prędkości we wszystkich drogach urządzenia pierwotnego, przy czym drogi fali ultradźwiękowej są usytuowane średnicowo.

Współczynnik kształtu rozkładu prędkości dla rozkładu nieznkształconego K_n , który występuje we wzorze (22) wyraża się wzorem (11). Dla składowej znkształcającej rozkładu prędkości opisanej wzorem (3) współczynnik kształtu rozkładu prędkości opisany jest wzorem (15). Na podstawie (11), (15) i (22) otrzymuje się dla urządzenia pierwotnego jednodrogowego:

$$\delta = \frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{8\pi(k+2)} [\vartheta \sin b\vartheta + (\vartheta + \pi) \sin b(\vartheta + \pi)] \right] - 1 \quad (23)$$

$$\frac{m}{m+2} + \frac{ak(\sin 2b\pi - 2b\pi \cos 2b\pi)}{6\pi^2 b^2 (k+3)}$$

Tabela 1. Błędy względne obliczone według wzoru (23) (w [%]) w funkcji kąta położenia drogi fali ultradźwiękowej dla przepływomierza jednodrogowego z drogą średnicową ($a = 1$; $b = 1$; $m = k$) dla funkcji znkształcającej rozkład prędkości wyrażonej wzorem (3)

ϑ [°]	0	30	60	90	120	150	180
m = 2	+9,3	+4,2	+0,4	-1,0	+0,4	+4,2	+9,3
m = 4	+10,0	+4,3	+0,1	-1,5	+0,1	+4,3	+10,0
m = 8	+10,7	+4,5	+0,1	-1,8	+0,1	+4,5	+10,7
m = 16	+11,2	+4,6	+0,2	-1,9	+0,2	+4,6	+11,2

Tabela 2. Błędy względne obliczone według wzoru (25) (w [%]) w funkcji kąta położenia pierwszej drogi fali ultradźwiękowej dla przepływomierza dwudrogowego z drogami średnicowymi ($a = 1$; $b = 1$; $m = k$; $\vartheta_{1,2} = \pi/2$) dla funkcji znkształcającej rozkład prędkości wyrażonej wzorem (3)

ϑ [°]	0	30	45	60	90
m = 2	+4,2	+2,3	+2,0	+2,3	+4,2
m = 4	+4,3	+2,2	+1,9	+2,2	+4,3
m = 8	+4,4	+2,2	+1,9	+2,2	+4,4
m = 16	+4,6	+2,2	+1,9	+2,2	+4,6

Tabela 3. Błędy względne obliczone według wzoru (27) (w [%]) w funkcji kąta położenia drogi fali ultradźwiękowej dla przepływomierza jednodrogowego z drogą średnicową ($a = 1$; $b = 0,5$; $m = k$) dla funkcji znkształcającej rozkład prędkości wyrażonej wzorem (4)

ϑ [°]	0	30	60	90	120	150	180
m = 2	-11,3	-8,2	-6,2	-5,6	-6,2	-8,2	-11,3
m = 4	-11,4	-8,0	-5,8	-5,1	-5,8	-8,0	-11,4
m = 8	-11,6	-8,0	-5,7	-4,9	-5,7	-8,0	-11,6
m = 16	-11,8	-8,0	-5,7	-4,9	-5,7	-8,0	-11,8

Tabela 4. Błędy względne obliczone według wzoru (28) (w [%]) w funkcji kąta położenia pierwszej drogi fali ultradźwiękowej dla przepływomierza dwudrogowego z drogami średnicowymi ($a = 1$; $b = 0,5$; $m = k$; $\vartheta_{1,2} = \pi/2$) dla funkcji znkształcającej rozkład prędkości wyrażonej wzorem (4)

ϑ [°]	0	30	60	90
m = 2	-8,5	-7,2	-7,2	-8,5
m = 4	-8,2	-6,9	-6,9	-8,2
m = 8	-8,2	-6,8	-6,8	-8,2
m = 16	-8,3	-6,9	-6,9	-8,3

Tabela 5. Błędy względne obliczone według wzoru (30) (w [%]) w funkcji kąta położenia drogi fali ultradźwiękowej dla przepływomierza jednodrogowego z drogą średnicową ($a = 1$; $b = 1$; $m = k$) dla funkcji znkształcającej rozkład prędkości wyrażonej wzorem (7)

ϑ [°]	0	30	45	60	90
m = 2	-21,1	-13,7	-6,3	+1,2	+8,6
m = 4	-22,2	-14,1	-6,0	+2,1	+10,2
m = 8	-23,3	-14,6	-6,0	+2,6	+11,3
m = 16	-24,0	-15,0	-6,1	+2,9	+11,9

Podstawiając $a = 1$; $b = 1$; $m = k$; uzyskano wyniki przedstawione w tabeli 1 dla przepływu uwarstwionego ($m = 2$), przejściowego (krytycznego) ($m = 4$) i burzliwego ($m = 8, 16$).

W przypadku urządzenia pierwotnego dwudrogowego wartość prędkości średniej po dwóch drogach będzie na podstawie wzoru (13) wynosiła:

$$v_{wp} = v_a \left[\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{16\pi(k+2)} f(\vartheta; \vartheta_{1,2}) \right] + v_b \left[\frac{ak}{16\pi(k+2)} [(\vartheta + \vartheta_{1,2}) \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2}) + (\vartheta + \vartheta_{1,2} + \pi) \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2} + \pi)] \right] \quad (24)$$

Na podstawie wzorów (24), (14), (11) oraz (22) otrzymuje się dla urządzenia pierwotnego dwudrogowego:

$$\delta = \frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{16\pi(k+2)} f(\vartheta; \vartheta_{1,2}) \right] - 1 \quad (25)$$

$$\frac{m}{m+2} + \frac{ak(\sin 2b\pi - 2b\pi \cos 2b\pi)}{6\pi^2 b^2 (k+3)}$$

gdzie: $f(\vartheta; \vartheta_{1,2})$ wyraża się następująco;

$$f(\vartheta; \vartheta_{1,2}) = \vartheta \sin b\vartheta + (\vartheta + \pi) \sin b(\vartheta + \pi) + (\vartheta + \vartheta_{1,2}) \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2}) + (\vartheta + \vartheta_{1,2} + \pi) \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2} + \pi) \quad (26)$$

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń błędów.

W przepływomierzu jednodrogowym dla modelu składowej znkształcającej rozkładu prędkości opisanej wzorem (3) przy zmianie położenia tej składowej względem położenia drogi fali ultradźwiękowej w przypadku rozwiniętego przepływu burzliwego otrzymuje się maksymalną wartość błędów 11,2%, natomiast dla przepływomierza dwudrogowego 4,6%. W przypadku choćby orientacyjnej znajomości kształtu rozkładu prędkości motak instalować czujniki ultradźwiękowe, aby droga fali ultradźwiękowej przebiegała w sposób minimalizujący potencjalny błąd. W przypadku, gdy nie ma żadnej informacji o kształcie rozkładu prędkości błąd może być maksymalny. O ile kształt rozkładu może się zmieniać w czasie, to maksymalna różnica między błędami wskazań (tu rzędu 13%) będzie informowała użytkownika o możliwie największym błędzie w przypadku, gdy dla danej sytuacji (np. położenia dającego błąd -1,9%) wyworcowano przepływomierz i kształt rozkładu się zmienił tak, że przepływomierz niewyworcowany wskazywałby z błędem +11,2%. Dla przepływomierza dwudrogowego maksymalny błąd wynosi +4,6%, a maksymalna różnica 3%. Dla stałego położenia składowej znkształcającej rozkładu prędkości względem drogi fali ultradźwiękowej i przy zmianach przepływu od uwarstwionego do burzliwego maksymalna różnica między błędami dla przepływomierza jednodrogowego wynosi około 2%, natomiast dla przepływomierza dwudrogowego około 0,5%.

Dla składowej znkształcającej rozkładu prędkości wyrażonej wzorem (4) wyznaczono na podstawie wzorów (11), (16) i (22) błąd względny dla przetwornika pierwotnego jednodrogowego:

$$\delta = \frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{ak}{4(k+2)} [\sin b\vartheta + \sin b(\vartheta + \pi)] \right] - 1 \quad (27)$$

$$\frac{m}{m+2} + \frac{ak(1 - \cos 2b\pi)}{3\pi b(k+1)}$$

Błędy metody dla urządzenia pierwotnego jednodrogowego obliczono dla wartości $a = 1$, $b = 0,5$ oraz $k = m$. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

W urządzeniu wtórnym przepływomierza ultradźwiękowego dwudrogowego mierzone są prędkości średnie płynu w obu drogach i błąd metody wyznacza się ze wzoru (22), korzystając z drugiej jego postaci. Za K_n podstawia się wzór (11) określający współczynnik kształtu rozkładu prędkości dla rozkładu niezniekształconego, za v_A licznik ułamka ze wzoru (16) pomnożony przez v_0 a za v_w wartość średnią prędkości obliczonych na podstawie mianownika ułamka we wzorze (16) dla ϑ oraz dla $\vartheta + \vartheta_{1,2}$, gdzie $\vartheta_{1,2}$ jest kątem między drogami fali ultradźwiękowej w urządzeniu pierwotnym dwudrogowym. Wobec tego błąd względny będzie wyznaczony na podstawie wzorów (11), (16) i (22):

$$\delta = \frac{\frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{akf(\vartheta, \vartheta_{1,2})}{8(k+2)} \right]}{\frac{m}{m+2} + \frac{ak[1 - \cos(2b\pi)]}{3\pi b(k+3)}} - 1 \quad (28)$$

gdzie: (29)

$$f(\vartheta, \vartheta_{1,2}) = \sin b\vartheta + \sin b(\vartheta + \pi) + \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2}) + \sin b(\vartheta + \vartheta_{1,2} + \pi)$$

Błędy obliczone na podstawie wzoru (28) dla $a = 1$; $b = 0,5$; $m = k$ i $\vartheta_{1,2}$ przedstawiono w tabeli 4.

Porównując wyniki obliczeń przedstawione w tabeli 3 i 4 widać, że w urządzeniu pierwotnym przepływomierza ultradźwiękowego z dwoma drogami średnicowymi przecinającymi się pod kątem prostym dla konkretnego przypadku ($a = 1$; $b = 0,5$; $m = k$) następuje istotne zmniejszenie błędu metody. Dalszą zaletą przetwornika pierwotnego dwudrogowego jest to, że różnica między maksymalnym i minimalnym błędem wynosi około 1,5% przy zmianach przepływu od uwarstwionego do burzliwego. Natomiast w przypadku przepływomierza jednodrogowego różnica ta wynosi około 6%.

W przypadku składowej zniekształcającej rozkładu prędkości wyrażonej wzorem (5) wartość współczynnika kształtu rozkładu prędkości oblicza się ze wzoru (17). Ze względu na osiową symetryczną składową zniekształcającą błąd względny dla przepływomierza dwudrogowego będzie taki sam, jak dla przepływomierza jednodrogowego i nie będzie zależał od kąta położenia dróg fali ultradźwiękowej.

Przyjmując, że składowa zniekształcająca rozkład prędkości jest modelowana wyrażeniem (7) wyprowadza się, jak w poprzednim przypadku, wyrażenie na błąd względny dla przetwornika pierwotnego jednodrogowego na podstawie wzorów (11), (18) i (21):

$$\delta = \frac{\frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{k}{2(k+2)} \sin^2 b\vartheta \right]}{\frac{m}{m+2} + \frac{k}{3(k+3)} \left[ab - \frac{a}{2b\pi} \sin 2b\pi \cos 2b\pi \right]} - 1 \quad (30)$$

W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń błędu według wzoru (3) dla konkretnego przypadku ($a = 1$; $b = 1$; $m = k$).

Dla przepływomierza dwudrogowego z drogami średnicowymi błąd względny będzie wynosił:

$$\delta = \frac{\frac{m+1}{m+2} \left[\frac{m}{m+1} + \frac{k}{4(k+2)} [\sin^2 b\vartheta + \sin^2 b(\vartheta + \vartheta_{1,2})] \right]}{\frac{m}{m+2} + \frac{k}{3(k+3)} \left[ab - \frac{a}{4b\pi} \sin 4b\pi \right]} - 1 \quad (31)$$

Po wykonaniu obliczeń według wzoru (31) dla $a = 1$; $b = 1$; $m = k$; $\vartheta_{1,2} = \pi/2$ otrzymuje się dla wartości m od 2 do 16 błędy około 6%. Błędy te nie zależą od kąta położenia dróg (dla kąta między drogami $\vartheta_{1,2}$ wynoszącego $\pi/2$, co wynika z licznika wzoru (31)).

Podsumowanie

Przepływomierz dwudrogowy dla różnych zniekształceń rozkładu prędkości będzie miał zarówno różnice błędów, jak i błędy wyraźnie mniejsze niż przepływomierz jednodrogowy. W przypadku przetwornika pierwotnego z drogami skrzyżowanymi możliwe jest instalowanie głowic na rurociągu bez konieczności jego opróżniania, podobnie jak dla przetwornika pierwotnego jednodrogowego z drogą średnicową. W przypadku liczby dróg średnicowych większej niż dwie należy oczekiwać, że błędy metody będą jeszcze mniejsze. Dla osiowej symetrycznej rozkładu prędkości, gdy zmienia się strumień objętości, a tym samym wartość współczynnika kształtu rozkładu prędkości zastosowanie przetwornika pierwotnego z drogami skrzyżowanymi nie pozwala na zmniejszenie błędu metody, ale wtedy można wprowadzić do przetwornika wtórnego wzór określający zależność współczynnika kształtu rozkładu prędkości K od liczby Reynoldsa [8]. W warunkach zniekształconego rozkładu prędkości przepływomierz dwudrogowy z drogami skrzyżowanymi pozwala na znaczne zmniejszenie błędu metody.

Literatura

- [1] H. BERNARD: Ultraschall-durchflussmessung, Messen Prüfen Automatisieren, Dezember 1985, s. 676-681.
- [2] Danfos, Nordborg, Dania, 1983, Electronic measurement of liquid flow, materiały firmy.
- [3] G. EREKSON, J. M. BISTRIAN: Application of ultrasonic flowmeters to hydroelectric plant flow measurements, FLOMEKO'85, International Conference on Flow Measurement, Sponsored by IMEKO-TC9, Melbourne, 20-23 VIII 1985, Editor: E.A. Spencer, OBE, Bedford 1985, s. 181-186.
- [4] L. FILIPCZYŃSKI: Ultradźwiękowe metody wizualizacji w medycynie, W: Problemy biocybernetyki i inżynierii biomedycznej, redaktor: M. Nałęcz, Tom 2, Biopomiary, redaktorzy: L. Filipczyński, W. Torbisz, Rozdz.3.1. WKiŁ, Warszawa 1990 s. 96-114.
- [5] J. GÄTKE: Volumenstrommessung in geraden zylindrischen Röhren mit Hilfe akustischer Strömungsgeschwindigkeitsmesser, msr, Berlin, vol. 29, nr 4, 1986, s. 161-168.
- [6] B. G. LIPTÁK: Flow Measurement, Chilton Book Company, Radnor, Pennsylvania, 1993.
- [7] H. M. MORRIS: What's Available in Ultrasonic Flowmeters, Control Engineering, 1979, nr 8, s. 41-45.
- [8] Pr PN-M-43370 Pomiar strumienia objętości płynu w przewodach. Przepływomierz ultradźwiękowy, projekt Polskiej Normy, 1998, J. Hruban, F. Strzelczyk, S. Waluś
- [9] ZHU RUI, XIE XINHAI, LIU XIANGYUAN, ZHANG HONGGUANG: Research for Measuring Reliability of Ultrasonic Flowmeter and Dry Calibration, Proceedings of FLOMEKO'96, 1996, Beijing, China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Beijing 1996, s. 181-185.
- [10] SONIX Przemysłowe Urządzenie Elektroniczne, Krzysztof Kołodziej, Warszawa, Przepływomierz ultradźwiękowy PKK-1, materiały firmowe, 1990.
- [11] D. W. SPITZER: Industrial Flow Measurement, ISA, Research Triangle Park, 1990.
- [12] S. WALUŚ: Błędy metody przepływomierzy próbkujących, Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń 6-8 maja 1998, Polska Akademia Nauk, Oddział w Katowicach, Prace Komisji Metrologii PAN, Seria: Konferencje Nr 1, Gliwice-Ustroń 1998, s. 129-138.
- [13] S. WALUŚ: Pomiar strumienia objętości w rurociągu niepełnym przepływomierzem ultradźwiękowym z równoczesnym pomiarem poziomym. VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, Wrocław, 9-11 X 1986, Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, seria: Konferencje 12, s. 92-95.
- [14] S. WALUŚ: Przepływomierz ultradźwiękowy. Metodyka stosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997, ISBN 83-85718-43-5.
- [15] S. WALUŚ: Przepływomierze ultradźwiękowe - własności metrologiczne, PAK, nr 1, 1978, s. 8-9.
- [16] S. WALUŚ: The Mathematical Modelling of the Velocity Distribution in Closed Conduits, Proceedings of FLOMEKO'96, 1996, Beijing, China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Beijing 1996, s. 474-479.
- [17] S. WALUŚ: Warunki stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych w gospodarce wodnej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 695, seria: Automatyka z. 60, Gliwice 1981, s. 93-106.