

Stanisław WALUS
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

ANALITYCZNE WZORCOWANIE PRZEPLYWOMIERZA ULTRADŹWIĘKOWEGO W NORMALNYCH WARUNKACH ZABUDOWY

Streszczenie. W artykule omówiono zasadę działania przepływomierza ultradźwiękowego oraz przedstawiono najczęściej spotykane rozwiązania techniczne. Określono warunki normalne oraz przedstawiono analityczną metodę wyznaczania charakterystyki przepływomierzy ultradźwiękowych w warunkach normalnych. Podano metodę określania niedokładności przepływomierza oraz obliczono błędy dla konkretnego przypadku.

1. Wstęp

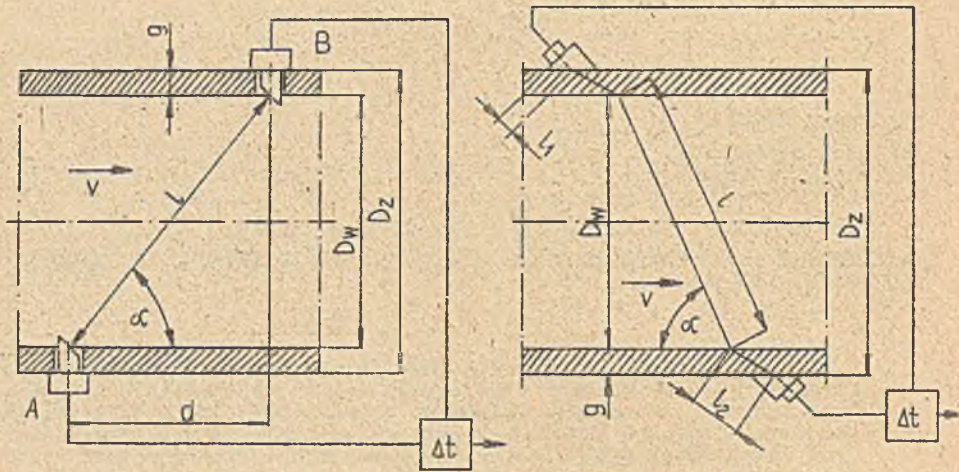
Ostatnio coraz większe zastosowanie do pomiaru natężenia przepływu cieczy znajdują przepływomierze ultradźwiękowe. Służą one zarówno do pomiaru natężenia przepływu w kanałach otwartych jak i w rurociągach. W artykule przedstawiono analizę przepływomierzy drugiej grupy. Podstawową zaletą większości przepływomierzy ultradźwiękowych jest możliwość zabudowy na rurociągu bez konieczności przerywania przepływu cieczy.

Spotyka się dwa rozwiązania techniczne: przepływomierze z głowicami ultradźwiękowymi wbudowanymi w ściankę rurociągu [9] oraz z głowicami nakładanymi na rurociąg z zewnątrz [8], [12], [13], jak pokazano na rys.1.

Dla obu przypadków sygnał wyjściowy zależy od parametrów związanych z warunkami zabudowy głowic ultradźwiękowych (miejsce zabudowy, parametry przepływającej cieczy oraz sposób montażu). W pewnych warunkach możliwe jest wzorcowanie analityczne, które polega na określeniu parametrów charakterystyki i oszacowaniu błędów przepływomierza na podstawie analizy funkcji przetwarzania i wyników pomiarów pośrednich parametrów charakteryzujących zabudowę głowic przepływomierza.

2. Zasada działania przepływomierzy ultradźwiękowych

W przepływomierzach ultradźwiękowych wykorzystuje się zjawisko zmiany prędkości fali ultradźwiękowej w cieczy będącej w ruchu w stosunku do



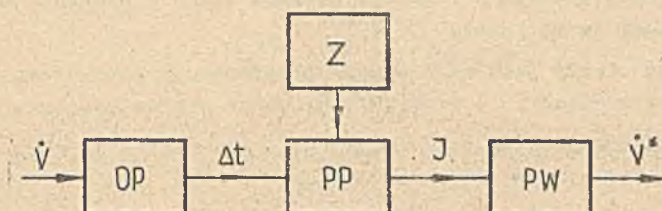
Rys.1. Umieszczenie głowic: a) w ścianie rurociągu, b) głowice nakładane

D_w - średnica wewnętrzna rurociągu; D_z - średnica zewnętrzna rurociągu; l - odległość między sondami; g - grubość ścianki rurociągu; d - odległość między sondami wzdłuż tworzącej rurociągu; l_1 - długość drogi fali ultradźwiękowej w głowicy; l_2 - długość drogi fali ultradźwiękowej w ścianie rurociągu; α - kąt między drogą fali ultradźwiękowej a tworzącą rurociągu; Δt - sygnał wyjściowy (różnica czasów)

prędkości w cieczy pozostającej w spoczynku. Stosuje się wiele sposobów wykorzystania zjawiska zmiany prędkości fali ultradźwiękowej, np. pomiar przesunięcia fazowego, pomiar różnicy czasów, pomiar częstotliwości oraz pomiar intensywności ultradźwięków dochodzących do odbiorników [12].

Przepływomierz składa się z organu pomiarowego, przetwornika pomiarowego, zasilacza oraz przyrządów wtórnych jak pokazano na rys.2. Organ pomiarowy to odcinek rurociągu z zamontowanymi w nim (lub na zewnątrz) głowicami ultradźwiękowymi. Przetwornikiem pomiarowym jest układ elektroniczny generujący sygnały pobudzające głowice do drgań ultradźwiękowych oraz odbierający sygnały z głowic odbiorczych i przetwarzający je w sygnał wyjściowy. Przyrządy wtórne to miernik wskazujący, rejestrator i integrator dający wskazania objętości cieczy.

W przypadku głowic wbudowanych jak na rys.1a czas przebiegu sygnału od nadajnika do odbiornika dla przypadku, gdy fala ultradźwiękowa jest



Rys.2. Schemat funkcjonalny przepływomierza ultradźwiękowego

OP - organ pomiarowy, PP - przetwornik pomiarowy, PW - przyrząd wtórny, \dot{V} - mierzone natężenie przepływu, Δt - różnica czasów, I - natężenie prądu, \dot{V}^* - wskazywana wartość natężenia przepływu.

emitowana z głowicy A do B wyraża się wzorem:

$$t_1 = \frac{1}{c + \bar{v}_1 \cos \alpha} + \tau_1, \quad /1/$$

gdzie:

c - prędkość fali ultradźwiękowej w cieczy wypełniającej rurociąg,

\bar{v}_1 - średnia prędkość cieczy,

τ_1 - czas przejścia sygnału elektrycznego od nadajnika do sondy nadawczej i od sondy odbiorczej do odbiornika.

Dla fali ultradźwiękowej przebiegającej pod prąd (od głowicy B do A):

$$t_2 = \frac{1}{c - \bar{v}_1 \cos \alpha} + \tau_2. \quad /2/$$

Różnica czasów $\Delta t = t_2 - t_1$ wynosi:

$$\Delta t = \frac{2 d \bar{v}_1}{c^2 - \bar{v}_1^2 \cos^2 \alpha} + \Delta \tau \quad /3/$$

Różnicę czasów $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$ można przyjąć za równą zero, gdyż sygnały elektryczne przebiegają odcinki w obu kierunkach tą samą drogą.

Dla głowic nakładanych na rurociąg wartości τ_1 i τ_2 zawierają jeszcze czasy potrzebne na przejście sygnału ultradźwiękowego przez

głowicy i ściankę rurociągu. O ile nie ma chwilowych zmian prędkości fali ultradźwiękowej zarówno w głowicy, ściance jak i w cieczy, to można przyjąć, że czasy te są równe.

Gdy prędkość cieczy jest bardzo mała w porównaniu z prędkością fali ultradźwiękowej w cieczy, to wzór /3/ upraszcza się do postaci:

$$\Delta t = \frac{2 d \bar{v}_1}{c^2} \quad /4/$$

Prędkość \bar{v}_1 można wyrazić wzorem:

$$\bar{v}_1 = \frac{1}{l} \int_0^l v /x/ dx, \quad /5/$$

gdzie: x - współrzędna na drodze l .

Dla ustalonego, osiowo symetrycznego (prędkość v jest tylko funkcją r) profilu prędkości powyższy wzór przybiera postać:

$$\bar{v}_1 = \frac{2}{D_w} \int_0^{D_w/2} v /r/ dr, \quad /6/$$

gdzie: r - promień liczony od osi rurociągu.

Dla przepływu laminarnego rozkład prędkości cieczy w rurociągu wyraża wzór /2/ :

$$v /r/ = v_0 \left[1 - \left(\frac{2r}{D_w} \right)^2 \right], \quad /7/$$

gdzie: v_0 - maksymalna prędkość cieczy (w osi rurociągu).

Dla przepływu turbulentnego [2] :

$$v /r/ = v_0 \left(1 - \frac{2r}{D_w} \right)^{1/n}, \quad /8/$$

gdzie: n - wartość zależna od liczby Reynoldsa.

Zależność n od liczby Reynoldsa jest n eliniowa i np. dla rur gładkich zależność tę przedstawiono w tablicy 1 [2] :

Re	45 000 80 000	200 000	640 000	2 000 000
n	7	8	9	10

Objętościowe natężenie przepływu dla profilu osiowo-symetrycznego wynosi:

$$\dot{V} = \int_0^{D_w/2} v / r / 2 \pi r dr. \quad /9/$$

Po podstawieniu /8/ do /9/ i wykonaniu całkowania otrzymuje się :

$$\dot{V} = \frac{\pi D_w^2 v_0}{2 \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \quad /10/$$

Podstawiając wzór /8/ do /6/ otrzymuje się :

$$\bar{v}_1 = \frac{v_0}{1/n + 1}. \quad /11/$$

Korzystając z zależności /10/ i /11/ :

$$\bar{v}_1 = \frac{2 \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \dot{V}}{\pi D_w^2} \quad /12/$$

Charakterystykę przepływomierza dla przepływów turbulentnych w warunkach odniesienia otrzymuje się na podstawie wzorów /12/ i /4/ :

$$\Delta t = \frac{4 \left(\frac{1}{n} + 2 \right) d}{\pi v_0^2 D_w^2} \dot{V} + \Delta t' \quad /13/$$

3. Normalne warunki zabudowy

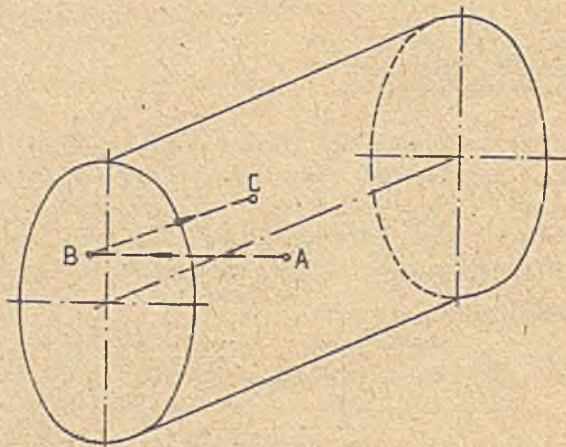
Za normalne warunki zabudowy uważa się takie, które winny być przestrzegane podczas instalowania narzędzia w celu poprawnego jego stosowania i które uwzględniają jego budowę, wykonanie oraz przeznaczenie [3]. Poniżej określa się wymagania prawidłowego stosowania przepływomierza jednodrogowego (z jedną parą głowic). Warunki te są następujące:

- odpowiednie położenie sond,
- ciecz w jednej fazie,
- odpowiednio długie odcinki prostoliniowe przed i za przepływomierzem,
- rurociąg o przekroju okrągłym.

Położenie sond zależy od zabudowy głowic ultradźwiękowych. Dla przepływomierza z organem jednodrogowym głowice winny być zamontowane diametralnie, gdyż charakterystyka przepływomierza [14] i sposób wzorcowania podawany jest przy tym założeniu. Ciecz winna być w jednej fazie, tzn. wolna zarówno od zawiesin, osadów jak i od pęcherzy gazu ze względu na zwiększone pochłanianie i rozpraszanie fali ultradźwiękowej. Odpowiednio długie odcinki prostoliniowe wymagane są ze względu na ustalenie się profilu pola prędkości. Dotychczas nie ma danych literaturowych pozwalających na określenie długości tych odcinków. Wymagania odnośnie ich długości będą podobne wymaganiom, jakie są określone, np. dla przepływomierzy zwężkowych [15]. Dla tych przepływomierzy przy spełnieniu wymagań normy nie ma zastrzeżeń odnośnie położenia otworów impulsowych na obwodzie rurociągu. Wymagania uwzględniają tylko możliwość występowania w cieczy gazów lub osadu, - co oznacza, że spełnienie warunku na wartość stosunku długości odcinków prostoliniowych do średnicy rurociągu zapewnia symetryczny rozkład prędkości.

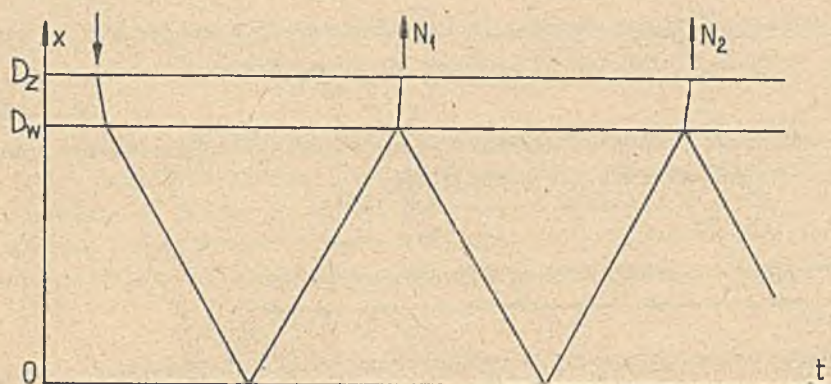
4. Pomiary warunków zabudowy głowic

W celu wyznaczenia charakterystyki przepływomierza, drogą wzorcowania analitycznego, należy wykonać pomiary wielkości określających charakterystykę. Pomiary te wykonuje się przy instalowaniu głowic [9]. Instalowanie zaczyna się od wyboru punktu A, tzn. miejsca zamontowania jednej głowicy. Po zmierzeniu średnicy zewnętrznej rurociągu oblicza się średnicę wewnętrzną i wyznacza punkt B, leżący po przeciwległej stronie punktu A. Następnie wyznacza się punkt C, który jest miejscem zamontowania drugiej głowicy. Schemat trasowania punktów A i C przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Schemat trasowania

Do pomiaru średnicy wewnętrznej rurociągu można użyć urządzenia ultradźwiękowego lub taśmy i miernika grubości ścianki rurociągu. Pomiar przy pomocy ultradźwięków wykonuje się na zewnątrz rurociągu wykorzystując jedną głowicę przymocowaną do zewnętrznej ścianki. Zasadę pomiaru przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Zasada pomiaru średnicy wewnętrznej rurociągu

x - odległość od ścianki wewnętrznej, która jest reflektorem,
g - grubość ścianki rurociągu.

Średnica wewnętrzna może być określona ze wzoru:

$$D_w = \frac{N_2 - N_1}{2f} \cdot c, \quad /14/$$

gdzie:

- N_1 - liczba kwantów czasu w momencie odebrania pierwszego echa,
- N_2 - liczba kwantów czasu w momencie odebrania drugiego echa,
- f - częstotliwość zegara.

O ile pochłanianie fali ultradźwiękowej w cieczy jest duże, korzysta się z pierwszego echa:

$$D_w = (N_D/f - t_B) \cdot c/2, \quad /15/$$

gdzie:

- t_B - czas przebiegu fali ultradźwiękowej w ściance rurociągu,
- N_D - liczba kwantów czasu odpowiadająca D_w .

Pomiar mechaniczny średnicy wewnętrznej polega na zmierzeniu średnicy zewnętrznej i odjęciu dwóch grubości ścianki:

$$D_w = L/H - 2g, \quad /16/$$

gdzie:

L - długość obwodu zewnętrznego rurociągu,
g - grubość ścianki.

Odległość między sondami (wzdłuż tworzącej) wyznacza się ze wzoru:

$$d = (L^2 - D_w^2)^{1/2} \quad /17/$$

Wymagany jest pomiar odległości między sondami, który może być wykonany metodą ultradźwiękową lub mechaniczną.

5. Wyznaczenie modelu matematycznego, wzorcowanie

Model matematyczny organu pomiarowego opisuje równanie:

$$\Delta t = k_1 \dot{V} + k_2, \quad /18/$$

gdzie:

k_1 jest współczynnikiem we wzorze /13/, natomiast k_2 różnicą czasów dla natężenia przepływu równego zero.

Dla organu pomiarowego symetrycznego $k_2 = 0$, natomiast przy fluktuacjach parametrów głowic, przewodów oraz układów wejściowych przetwornika pomiarowego wartość k_2 nie będzie równa zero. Model matematyczny przetwornika pomiarowego wraz z przyrządem wyjściowym można zapisać równaniem:

$$\dot{V}^* = b_1 \Delta t + b_2. \quad /19/$$

Wzorcowanie to taki dobór stałych b_1 i b_2 , aby zachodziła równość:

$$\dot{V}^* - \dot{V} = 0. \quad /20/$$

Po podstawieniu /18/ i /19/ do /20/ otrzymuje się:

$$b_1 = 1/k_1 \quad ; \quad b_2 = -k_2/k_1. \quad /21/$$

Wzorcowanie analityczne składa się więc z trzech etapów:

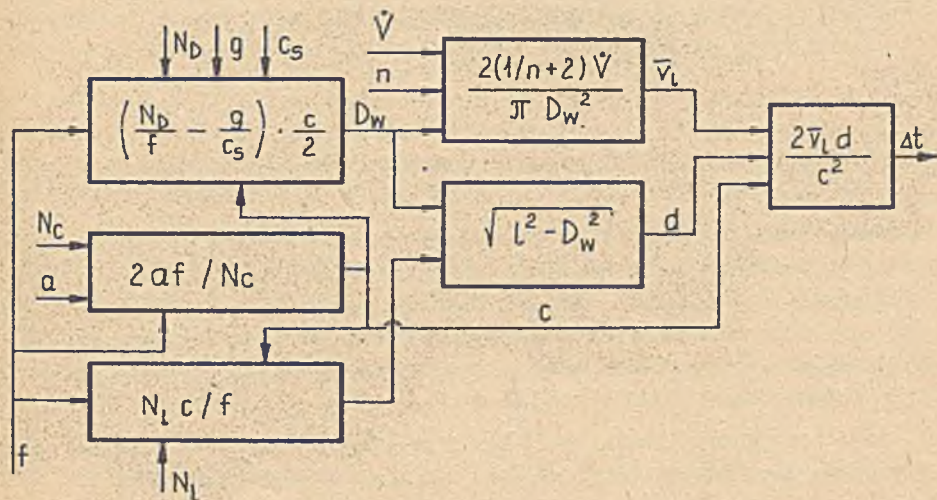
- 1) wyznaczenie modelu matematycznego organu pomiarowego na drodze analityczno-identyfikacyjnej,
- 2) dla znanego modelu dobór nastaw przetwornika pomiarowego z przyrządem wtórnym (lub bez o ile przyrząd wtórny nie jest wymagany) zgodnie z równaniami /21/,
- 3) sprawdzenie drogą symulacji lub eksperymentalną w stacji wzorcowania doboru b_1 i b_2 (plus ewentualnie korekcja), aby było spełnione równanie /19/.

W pierwszym etapie należy określić wszystkie wielkości występujące we wzorze /13/. Sposób określenia parametrów zabudowy głowic podano w poprzednim rozdziale. Pomiar prędkości fali ultradźwiękowej w cieczy polega na zmierzeniu czasu przejścia przez falę odcinka o dokładnie określonej długości. Prędkość fali ultradźwiękowej jest wtedy określana ze wzoru:

$$c = 2af / N_c, \quad /22/$$

gdzie:

- a - odległość między sondą i reflektorem,
- f - częstotliwość zegara,
- N_c - liczba kwantów czasu odpowiadająca $a^{\check{v}}$.



Rys.5. Schemat strukturalny algorytmu wyznaczania modelu matematycznego organu pomiarowego

Wartość n dla przepływów zmieniających się w niewielkich granicach można przyjąć za stałą. Na rys.5 przedstawiono schemat blokowy ułatwiający obliczenia współczynnika k_1 w przypadku ultradźwiękowego pomiaru średnicy wewnętrznej rurociągu oraz odległości między sondami. W oparciu o schemat blokowy przedstawiony na rys.5 otrzymuje się:

$$k_1 = \frac{(n^{-1} + 2) N_c^3 [4 N_1^2 - (N_D - f g c_s^{-1})^2]^{1/2}}{\pi a^3 f^2 (N_D - f g c_s^{-1})^2} \quad /23/$$

gdzie:

- N_D - liczba kwantów czasu odpowiadająca zewnętrznej średnicy rurociągu,
- N_1 - liczba kwantów czasu odpowiadająca odległości między sondami,
- c_s - prędkość fali ultradźwiękowej w stali.

Dla mechanicznych pomiarów średnicy wewnętrznej oraz odległości między sondami:

$$k_1 = \frac{(n^{-1} + 2) N_c^2 [1 - (L \pi^{-1} - 2g)^2]^{1/2}}{\pi a^2 f^2 (L \pi^{-1} - 2g)^2} \quad /24/$$

Składnik k_2 jest wartością Δt dla zerowego natężenia przepływu cieczy. Po określeniu k_1 i k_2 dobiera się tak b_1 i b_2 , aby był spełniony wzór /20/. Sprawdzenie nastaw parametrów przetwornika wykonuje się przy pomocy układu zastępującego organ pomiarowy. Na wyjściu tego układu można uzyskać żądane wartości Δt z odpowiednią dokładnością.

6. Oszacowanie błędów wzorcowania przepływomierza ultradźwiękowego

Oszacowane zostaną błędy wzorcowania przepływomierza związane z organem pomiarowym i sposobem pomiaru poszczególnych wielkości charakteryzujących jego zabudowę. Błędy przetwornika pomiarowego oraz przyrządu wtórnego przy obecnym stanie technologii układów elektronicznych mogą być pomijalnie małe i nie będą tu rozpatrywane. Analizę błędów przetwornika pomiarowego podano w [11].

Różniczkując wyrażenie /24/, dla skończonych przyrostów parametrów otrzymuje się wzór określający błąd względny współczynnika k_1 :

$$\begin{aligned}
 \delta_{k_1} = & - \frac{n^{-2}}{2 + n^{-1}} \Delta n + \frac{3}{N_c} \Delta N_c + \frac{4 N_1}{4 N_1^2 + (N_D - f g c_B^{-1})^2} \Delta N_1 + \\
 & + \frac{(N_D - f g c_B^{-1})^2 - 8 N_1^2}{(N_D - f g c_B^{-1}) 4 N_1^2 - (N_D - f g c_B^{-1})^2} \Delta N_D + \\
 & + \frac{f [8 N_1^2 - (N_D - f g c_B^{-1})^2]}{c_B (N_D - f g c_B^{-1}) [4 N_1^2 - (N_D - f g c_B^{-1})^2]} \Delta g - \frac{3}{a} \Delta a + \\
 & + \frac{f_B [(N_D - f g c_B^{-1})^2 - 8 N_1^2]}{c_B^2 (N_D - f g c_B^{-1}) [4 N_1^2 - (N_D - f g c_B^{-1})^2]} \Delta c_B + \\
 & + \frac{2g}{c_B} \left[\frac{(N_D - f g c_B^{-1})^2}{2 [4 N_1^2 - (N_D - f g c_B^{-1})^2]} - \frac{c_B}{g f} + 1 \right] \Delta f \quad /25/
 \end{aligned}$$

Ze względu na uproszczenie zapisu pominięto we wzorze /25/ indeks "o" oznaczający wartości parametrów w punkcie pracy.

Poniżej zostanie podany przykład oszacowania błędu przepływomierza.

Pierwszym składnikiem błędu jest błąd związany ze zmianą przepływu w stosunku do nominalnego. O ile maksymalna liczba Reynoldsa wynosi $2 \cdot 10^6$, to $n = 10$; przy zmaleniu Re do 640 000, $n = 9$.

Prędkość fali ultradźwiękowej w cieczy może być zmierzona przy pomocy sondy z reflektorem. Przy częstotliwości zegara 10^6 1/s i odległości między sondą a reflektorem $a = 100$ mm, N_c może wynosić np. 13 705. Wobec tego prędkość fali ultradźwiękowej będzie wynosić $c = 1459,32$ m/s. Błąd $\Delta N_c = 2$. Podobnie ΔN_1 i $\Delta N_D = 2$. Dla rurociągu o średnicy nominalnej 1,8 m średnica wewnętrzna wynosi 1,8 m, zaś grubość ścianek może wynosić 10 mm [6]. Przy prędkości $c = 1459,32$ m/s N_1 będzie wynosić 174 436. N_D może wynosić 123 345.

Przyjęto błąd częstotliwości zegara $\delta = 10^{-5}$. Błąd grubości ścianki można przyjąć wg [7] i będzie on wynosił $\pm 0,8$ mm. Błąd odległości między sondą i reflektorem $\Delta a = 5 \cdot 10^{-2}$ mm.

Prędkość fali ultradźwiękowej w stali zależna jest od jej marki i może być znana z dużą dokładnością, wobec tego błąd Δc_B można pominąć. Przyjęto $c_B = 6000$ m/s.

Ponieważ błędy pomiaru poszczególnych wielkości mają charakter przypadkowy i są od siebie niezależne, błąd określenia k_1 jest określony

wzorem:

$$\begin{aligned} \delta_{k_1} = & \left[2,27 \cdot 10^{-5} (\Delta n)^2 + 4,8 \cdot 10^{-8} (\Delta N_0)^2 + 5,8 \cdot 10^{-9} (\Delta N_1)^2 + \right. \\ & + 3 \cdot 10^{-15} (\Delta c_B)^2 + 2,3 \cdot 10^{-10} (\Delta N_D)^2 + 9,12 \cdot 10^{-4} (\Delta g)^2 + \\ & \left. + 900 (\Delta a)^2 + 1,5 \cdot 10^{-11} (\Delta f)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad /26/$$

Podstawiając wartości liczbowe: $\Delta n = 0,08$ (zmiany przepływu w granicach $\pm 10\%$), $\Delta N_1 = 2$; $\Delta N_D = 2$; $\Delta c_B = 100$ m/s; $\Delta g = 10^{-3}$ m; $\Delta a = 10^{-5}$ m; $\Delta f = 1000$ 1/s otrzymuje się $\delta_{k_1} = 0,4\%$.

7. Zalecenia i wnioski

Ze względu na duże trudności techniczne związane z mechanicznym pomiarem odległości między sondami zaleca się pomiar przy pomocy ultradźwięków. O ile byłoby to niemożliwe, należy wykorzystać wyniki pomiarów uzyskane przy montażu głowic. Błąd określenia średnicy składa się z błędów pomiaru L oraz g . Dla rurociągu o średnicy 1,8 m błąd ΔL będzie wynosił 1,5 mm [5], natomiast $\Delta g = 0,1$ mm [7]. Błąd wyznaczenia D_w wynosi:

$$\delta_{D_w} = \left[\left(\frac{\Delta L}{L - 2g} \right)^2 + \left(\frac{2g \Delta g}{L - 2g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad /27/$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymuje się 0,02%.

Pomiar ultradźwiękowy można wykonać z dokładnością określoną na podstawie wzoru:

$$\begin{aligned} \delta_{D_w} = & \left[\left(\frac{c_B \Delta N_D}{N_D c_B - 2gf} \right)^2 + \left(\frac{N_D c_B \Delta f}{N_D c_B f - 2gf^2} \right)^2 + \left(\frac{2f \Delta g}{N_D c_B - 2gf} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left(\frac{N_D c_B \Delta c_B}{N_D c_B c - 2gfc} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad /28/$$

Podstawiając do powyższego wzoru wartości liczbowe otrzymuje się

$$\delta_{D_w} = 0,02\% \text{ dla grubości ścianki wziętej z normy lub zmierzonej przy}$$

pomocy miernika izotopowego.

Wobec powyższych wyników jest obojętne, jaka metoda pomiaru D_w zostanie wybrana.

LITERATURA

- [1] Piotrowski J. : Podstawy metrologii, PWN, Warszawa 1976.
- [2] Bukowski J. : Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1968.
- [3] PN-71/N-02050. Metrologia. Nazwy i określenia.
- [4] PN-76/M-42359. Mierniki przepływomierzy zwężkowych.
- [5] PN-72/N-99313. Stalowe przyrządy wstępowe.
- [6] PN-74/H-74209. Rury stalowe ze szwem i bez szwu przewodowe. Wymiary.
- [7] PN-73/H-74244. Rury stalowe ze szwem przewodowe.
- [8] Suzuki N., Nakabori H., Yamamoto M. : Ultrasonic method of flow measurement in large conduits and open channels. Artykuł w pracy zbiorowej "Modern developments in flow measurement", Harwell 1971.
- [9] Pose de capteurs debimétriques - Ultraflux, Poissy, Francja, 1975
- [10] Zacharias E.M.: Process Measurements by Sound Velocimetry. Instruments and control systems, Sept. 1970.
- [11] Hagel M. : Model matematyczny przepływomierza ultradźwiękowego, PAK, 1978.
- [12] Waluś St.: Przepływomierze ultradźwiękowe, - własności metrologiczne. PAK, 1978, nr 1.
- [13] Katalog firmy BADGER METER, Milwaukee, USA.
- [14] Katalog firmy CONTROLTRON Corporation, New York, USA.
- [15] PN-65/M-53950. Pomiar natężenia przepływu za pomocą zwężek.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАСТРОЙКИ

Резюме

В статье описано принцип действия ультразвукового расходомера и представлено частейшее технические решения. Определёно нормальные условия и аналитический метод определения характеристики ультразвукового расходомера в нормальных условиях. Поцано методу определения погрешности расходомера и вычислено ошибку в конкретном случае.

ANALITICAL CALIBRATION OF ULTRASONIC FLOWMETER IN NORMAL CONDITIONS OF SETTLEMENT

Summary

In the article a working principle of an ultrasonic flowmeter is described and the most common technical designs are introduced. The normal conditions and the analitical method of evaluation of ultrasonic flowmeter charakteristic in this oonditions are described. There is given the method of determination of the flowmeters inaccuracy and the error for one example is calculated.