

Christian WARTINI

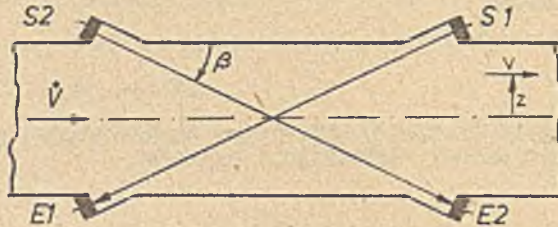
Technische Hochschule Otto von Guericke
Magdeburg

PROBLEMY POMIARU PRZEPŁYWU PRZY POMOCY ULTRADŹWIĘKÓW ZE SZCZEGÓLNYM
UWZGLĘDNIENIEM METODY PRZESUNIĘCIA FAZOWEGO

Streszczenie. W artykule omówiono metody pomiaru przepływu przy pomocy ultradźwięków ze szczególnym uwzględnieniem metody przesunięcia fazowego. Wyprowadzono równania pomiaru, omówiono wielkości wpływające i podano sposób kompensacji prędkości fali ultradźwiękowej. Przedstawiono wpływ własności wibratorów na dokładność pomiaru.

Znanych jest wiele sposobów pomiaru natężenia przepływu płynów zarówno w przemysłowych procesach produkcyjnych jak i w miejskiej oraz przemysłowej gospodarce wodnej. Sposoby te mają wiele ograniczeń eksploatacyjnych spowodowanych różnymi przyczynami: zwężenia przekroju, straty ciśnienia, ruch mechaniczny pewnych części przyrządu pomiarowego oraz specjalne wymagania odnośnie mierzonego płynu. Sposoby, które tych i innych niedogodności nie wykazują, bazują na bezpośrednim i pośrednim pomiarze czasu przebiegu fali ultradźwiękowej w przepływającym płynie. Ultradźwiękowe metody pomiaru przepływu są znane już od wielu lat, jednak nie mogły być zastosowane w przemyśle ze względu na wysokie koszty i niemożliwe do spełnienia wymagania względem urządzeń elektronicznych. Wskutek rozwoju elektroniki w ostatnich latach znaczenie ultradźwiękowych sposobów pomiaru natężenia przepływu zwiększyło się, szczególnie w gospodarce wodnej. Ponieważ zasada działania przepływomierza ultradźwiękowego jest szeroko opisana w literaturze [1] + [3], poniżej zostanie podane tylko krótkie objaśnienie. Impulsy ultradźwiękowe wysyła się w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu i w kierunku przeciwnym, w dwu oddzielnych kanałach ultradźwiękowych (rys.1) lub w jednym kanale. W drugim przypadku przetwornik nadawczy i odbiorczy zamieniają się swoimi funkcjami. Jako przetworniki ultradźwiękowe stosuje się powszechnie jednakowe piezoelektryczne wibratory grubościennie o częstotliwości rezonansowej od 1 do 10 MHz. Czasy przebiegu impulsów ultradźwiękowych w mierzonym płynie, wysyłanych w obu kierunkach, wynikają ze wzorów:

$$t_1 = \frac{s (c + \bar{v} \cos \beta)}{c^2 (1 - \frac{\bar{v}^2}{c^2} \cos^2 \beta)} \quad //1/$$



Rys.1. Zasada pomiaru dwukanałowego organu pomiarowego przepływowomierza ultradźwiękowego.

β - kąt między tworzącą rurociągu a kierunkiem fali ultradźwiękowej

$$t_2 = \frac{s (c - \bar{v} \cos \beta)}{c^2 (1 - \frac{\bar{v}^2}{c^2} \cos^2 \beta)} \quad /2/$$

gdzie: c - prędkość fali ultradźwiękowej,
 s - odległość między nadajnikiem a odbiornikiem.

Objętościowe natężenie przepływu wynosi:

$$\dot{V} = 2\pi \int_0^R v(z) z dz = A \bar{v} = AP \bar{v}, \quad /3/$$

gdzie: A - powierzchnia przekroju rury,
 R - promień rury,
 $v(z)$ - miejscowa wartość prędkości przepływającego płynu (rys.1)
 \bar{v} , \bar{v} - średnie prędkości płynu (wzór /8/ i /9/).

W przypadku rury o przekroju kołowym dla metody różnicy czasów po zaniedbaniu wyrażenia \bar{v}^2 / c^2 otrzymuje się:

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} PR c^2 \operatorname{tg} \beta (t_1 - t_2). \quad /4/$$

P jest współczynnikiem wzorcowania zależnym od profilu prędkości, który będzie określony później. W zależności od długości drogi pomiarowej wartości t_1 i t_2 leżą w większości wypadków w granicach 1 + 3 ms i dla maksymalnych prędkości przepływu różnica czasów $t_1 - t_2$ jest mniejsza od 1 μ s.

Jeżeli wartości t_1 i t_2 nie będą mierzone, ale bezpośrednio po przejściu drogi od nadajnika do odbiornika zostanie wysłany następny impuls ultradźwiękowy, wówczas t_1 i t_2 są okresem impulsów o częstotliwości f_1 i f_2 . Stąd wynika dla metody impulsowo-częstotliwościowej następujący wzór :

$$\dot{V} = \frac{2\pi}{\sin 2\beta} PR^3 \left(1 + \frac{t_{\psi} c}{R} \right)^2 (f_2 - f_1). \quad /5/$$

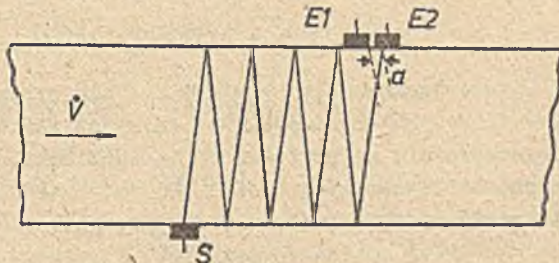
t_{ψ} uwzględnia czas opóźnienia w kanale elektrycznym. Różne czasy opóźnienia w obu kanałach prowadzą również przy innych metodach do powstania błędu, który eliminuje się przez kompensację i wówczas nie musi być uwzględniony w równaniu /5/. f_1 i f_2 są rzędu $1 \div 3$ kHz, a maksymalna różnica częstotliwości ($f_2 - f_1$) jest rzędu kilku Hz.

O ile nadajnik jest wzbudzany sygnałem ciągłym, wtedy powstaje przesunięcie fazowe między wysyłanymi i odbieranymi sygnałami ultradźwiękowymi (φ_1 i φ_2) i stąd dla metody przesunięcia fazowego wynika wzór :

$$\dot{V} = \frac{2\pi}{\psi f} PR c^2 \operatorname{tg} \beta \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad /6/$$

gdzie: $\psi = 8\pi$.

Częstotliwość f wybiera się z przedziału $1 \div 5$ MHz. Oprócz schematu budowy przedstawionego na rys.1 możliwy jest schemat budowy z 3 głowicami ultradźwiękowymi, pokazany na rys.2.



Rys.2. Schemat budowy organu pomiarowego w przypadku metody unoszenia

Strumień płynu unosi wiązkę ultradźwiękową o wielkość a , przy czym całkowite odchylenie jest uzależnione od liczby odbić n od ścian rury. Uzyskuje się następujący przybliżony wzór dla metody unoszenia:

$$\dot{V} = \frac{\pi}{2} P R \text{ ona} . \quad /7/$$

Sygnal wyjściowy zależy od przesunięcia a , które wynosi kilka milimetrów.

Do wyznaczenia natężenia przepływu należy określić prędkość średnią po przekroju poprzecznym rury:

$$\bar{v} = \frac{2}{R^2} \int_0^R v(z) z dz , \quad /8/$$

gdzie: z - promień liczony od osi rury.

W przepływomierzu z jedną drogą fali ultradźwiękowej mierzy się prędkość średnią zgodnie ze wzorem:

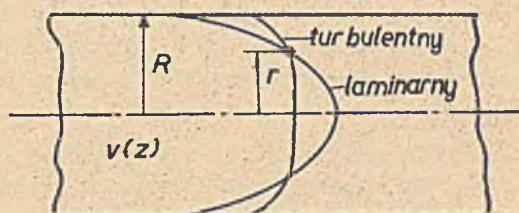
$$\bar{v} = \frac{1}{R} \int_0^R v(z) dz \quad /9/$$

Ponieważ wielkości \bar{v} i \bar{v} są różne, do równania /3/ został wprowadzony współczynnik kalibracji P . Zależy od profilu prędkości, czyli od liczby Reynoldsa. Dla idealnego, osiowo symetrycznego przepływu w hydraulicznie gładkiej rurze w przypadku przepływu laminarnego jego wartość jest stała i wynosi $P_1 = 0,75$, natomiast dla przepływu turbulentnego i zakresu zmian liczby Reynoldsa od 10^4 do 10^7 jego wartość wynosi około $P_t = 0,93 + 0,965 [4], [5]$. W zakresie wielkości liczby Reynoldsa od 2320 do 10^4 jest tzw. przepływ przejściowy. Po wprowadzeniu współczynnika turbulentności γ [6] uzyskuje się w tym zakresie:

$$P_u = \gamma P_t + (1 - \gamma) P_1 \quad /10/$$

dla przepływu czysto laminarnego $\gamma = 0$, zaś dla przepływu czysto turbulentnego $\gamma = 1$. Na skutek niepewności wartości współczynnika γ [6] możliwe jest zastosowanie go przy dużych czasach pomiaru, szczególnie przy metodzie częstotliwościowej. Jeśli dla jednakowej wielkości \bar{v} porównamy analitycznie profile prędkości dla przepływu laminarnego i turbulentnego, to dla wyżej opisanego przypadku idealnego istnieje odległość $r = 0,493 R$ od osi rury, w której dla obydwu profilów jest ta sama prędkość płynu. Na rys.3 pokazano problem jakościowo.

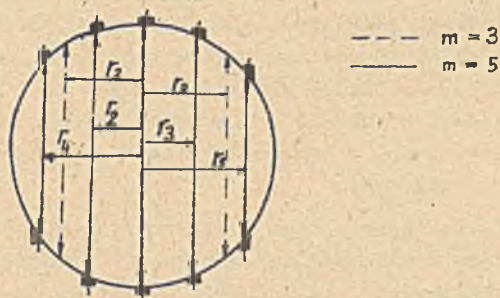
Z uwagi na to, że wartość r jest w wysokim stopniu niezależna od liczby Reynoldsa, obliczony współczynnik kalibracji P jest w przybliżeniu stały. Punktem wyjścia dla dotychczasowych rozważań był w pełni ustalony osiowo symetryczny profil prędkości. To wymaga istnienia odcinka prostoliniowego do ustalenia profilu prędkości i długości większej 15 do



Rys.3. Jakościowe przedstawienie laminarnego i turbulentnego profilu prędkości

20 razy niż średnica nominalna rury.

Dalszy problem stanowią rury o dużej chropowatości względnie ze ścianami zanieczyszczonymi osadami. Prowadzi to do "wyostrenia się" profilu prędkości. W następstwie tego zmienia się współczynnik P, przy czym jego zmiany maleją w miarę wzrostu średnicy nominalnej. Można uniknąć tych trudności dokonując pomiaru nie w jednej drodze, a w kilku.



Rys.4. Zasada pomiaru wielodrogowego

$$m = 3 ; \quad r_1 = 0 \\ r_2 = -r_3 = 0,7071 R$$

$$m = 5 ; \quad r_1 = 0 \\ r_2 = -r_3 = 0,375 R \\ r_4 = -r_5 = 0,832 R$$

Pomiary pojedyncze dostarczają wartości średnich $\bar{v}_1 \dots \bar{v}_m$ dla płaszczyzny pomiarowej. Stosując całkowanie przybliżone można na podstawie tych wielkości obliczyć wartość średnią prędkości \bar{v} . Korzystanie

jest zastosować tu formułę Czebyszewa [8]. Ze względu na odpowiednie rozmieszczenie dróg, jak pokazano na rys.4, metoda ta wymaga mniejszej ilości dróg m niż inne metody. Metoda Czebyszewa opiera się na interpolacji wielomianowej Lagrange'a. Wyznaczenie wielomianu stopnia $m-1$ jest dokładne, natomiast dla wielomianów wyższego stopnia uzyskuje się interpolację przybliżoną.

Nowoczesna technika mikrokomputerowa daje nowe techniczno-ekonomiczne możliwości. Równania /4/ + /7/ obrazują fakt, że przedstawione 4 metody pomiaru przepływu przy pomocy ultradźwięków nie różnią się między sobą pod względem konieczności uwzględnienia profilu prędkości. Porównując czasy pomiaru na podstawie wyżej przytoczonych orientacyjnych danych można stwierdzić, że wartości czasu pomiaru leżą w granicach rzędu milisekund zarówno dla metody różnicy czasów jak i dla metody różnicy częstotliwości, natomiast dla metody impulsowo-częstotliwościowej czasy te wynoszą 1 + 10 sekund. Należy to uważać za istotną zaletę dwu pierwszych metod. Również metoda unoszenia pozwala teoretycznie na uzyskanie krótkich czasów pomiaru. Zmiany tkwienia w mierzonym medium, wywołane między innymi obcymi ciałami i pęcherzami gazu, mogą prowadzić do błędów pomiaru. Błędy tym wywołane nie dają się praktycznie korygować, gdyż są trudne do wykrycia. Z tego względu ta metoda stanowi mało przydatny wariant. Trudności technicznej realizacji metody różnicy czasów tkwią między innymi w możliwości rozwiązania pomiaru czasu. Bezwzględne błędy pomiaru czasu rzędu kilku nanosekund mogą w zależności od geometrii organu pomiarowego prowadzić do błędów przekraczających 15%. Dlatego też metoda ta miała w przeszłości znaczenie drugorzędne. Rozwój bardzo szybkich obwodów przełączających, np. w logice Schottky'ego, pozwolił na istotne uporanie się z tym problemem.

Bardzo dogodne rozwiązanie tego problemu stanowi metoda przesunięcia fazowego. Techniczna realizacja tej metody nie przedstawia żadnych większych problemów, zwłaszcza jeżeli uwzględni się bardzo dokładną technikę PLL (phase-locked loop-Technik). Występujące trudności mają raczej charakter pryncypialny. Do przedstawienia informacji pomiarowej można wykorzystać maksymalny zakres zmian fazy 2π tzn. 360° . Większe zmiany fazy mogłyby doprowadzić do wieloznaczności. Tym samym została ograniczona dokładność oraz zakres pomiaru. Istotne polepszenie uzyskuje się poprzez rozszerzenie zakresu fazowego. Usunięcie tej wieloznaczności jest możliwe. Najpierw zostaną przeprowadzone pomiary przesunięcia fazowego przy częstotliwości generatora f . Pomiary te są potrzebne przy wyprowadzaniu równania /6/. Następnie zostaną powtórzone pomiary dla innych częstotliwości f_n .

Otrzymujemy stąd równania :

$$\varphi_1^* = \frac{2\pi f_s}{c - \bar{v} \cos \beta} = \varphi_l + k_1 2\pi + \varphi_1' = \varphi_l + \varphi_1 \quad /11/$$

$$\varphi_2^* = \frac{2\pi f_s}{c + \bar{v} \cos \beta} = \varphi_l + k_2 2\pi + \varphi_2' = \varphi_l + \varphi_2 \quad /12/$$

$$\varphi_{n1}^* = \frac{2\pi f_{n5}}{c - \bar{v} \cos \beta} = \varphi_{n1} + k_{n1} 2\pi + \varphi_{n1}' = \varphi_l + \varphi_{n1} \quad /13/$$

$$\varphi_{n2}^* = \frac{2\pi f_{n5}}{c + \bar{v} \cos \beta} = \varphi_{n1} + k_{n2} 2\pi + \varphi_{n2}' = \varphi_l + \varphi_{n2} \quad /14/$$

Dla $\bar{v} = 0$ muszą zachodzić: $\varphi_1 = \varphi_2$ i $\varphi_{n1} = \varphi_{n2}$.

Te równania mogą stanowić podstawę do wzorcowania i adiustacji całości urządzenia pomiarowego. φ_1 i φ_{n1} charakteryzują stałe przesunięcia fazowe, które zależą od długości trasy pomiarowej. W celu uproszczenia zostaną opuszczone wskaźniki określające kierunek przepływu.

Jeśli $\varphi = 2n\pi$ i $\varphi_n = 2(n+1)\pi$, wtedy wielkość f_n wylicza się ze wzoru:

$$f_n = \frac{n+1}{n} f. \quad /15/$$

Stąd wynika :

$$0 \leq \varphi < 2n\pi \quad /16/$$

$$0 \leq \varphi_n < 2(n+1)\pi \quad /17/$$

$$0 \leq k \leq (n-1) \quad /18/$$

$$0 \leq k_n \leq n \quad /19/$$

Wielkość n oznacza maksymalną liczbę wielokrotności 2π , a tym samym określa zakres, w którym pomiar jest jednoznaczny. Wielkość k oznacza całkowite wielokrotności 2π . Różnica $\Delta\varphi_n$ określona jest wzorem:

$$\Delta\varphi_n = \varphi_n - \varphi = (k_n - k) 2\pi + \varphi_n' - \varphi' = (k_n - k) 2\pi + \Delta\varphi_n' \quad /20/$$

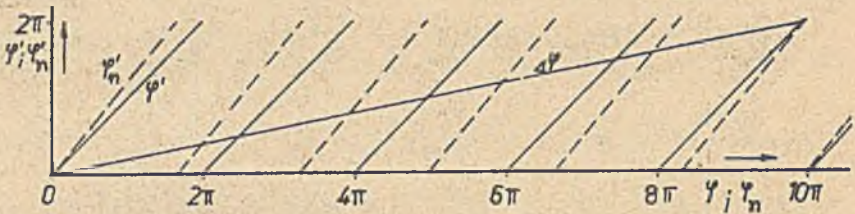
$\Delta\varphi_n$ jest jednoznaczne w zakresie zmian φ (równanie /16/):

$$0 \leq \Delta\varphi_n < 2\pi \quad /21/$$

Rys.5 obrazuje ten związek.

Wielkość k można ustalić z zależności:

$$\frac{k}{n} 2\pi \leq \Delta\varphi_n < \frac{k+1}{n} 2\pi \quad /22/$$



Rys.5. Zależności fazowe przy pomiarach ze zróżnicowanymi częstotliwościami ($n=5$)

Dla przypadku, gdy $\varphi'_n > \varphi'$ na podstawie zależności /21/ $k_n - k = 0$. Stąd $\Delta\varphi'_n = \Delta\varphi_n$ i różniczka ta może być podstawiona do zależności /22/. Dla przypadku $\varphi'_n < \varphi'$ zachodzi $k_n - k = 1$. Do φ'_n musi być dodane 2π , aby różniczka $\Delta\varphi'_n$ była dodatnia i równa $\Delta\varphi_n$. Jeśli np. $n=5$ (rys.5), to z zależności /22/ wynika :

$$0 \leq \Delta\varphi_n < \frac{2}{5}\pi : k = 0 \quad \varphi \hat{=} \varphi'$$

$$\frac{2}{5}\pi \leq \Delta\varphi_n < \frac{4}{5}\pi : k = 1 \quad \varphi \hat{=} 2\pi + \varphi'$$

.....

$$\frac{8}{5}\pi \leq \Delta\varphi_n < 2\pi : k = 4 \quad \varphi \hat{=} 8\pi + \varphi'$$

Potrzebne operacje rachunkowe wymagają minimalnego nakładu pracy. Badania na piezoelektrycznych wibratorach grubościennych pokazały, że przy odpowiedniej geometrii wibratorów i wykorzystaniu różnych częstotliwości drgań własnych obie częstotliwości f i f_n mogą być propagowane przez ten sam wibrator [5].

Dalszym problemem, jaki występuje zarówno w metodzie przesunięcia fazowego jak i w metodzie różnicy czasów, jest wpływ prędkości fali ultradźwiękowej na wynik pomiaru (porównaj równanie /4/ i /6/). Przy metodzie impulsowo-częstotliwościowej (równanie /5/) wpływ ten jest istotnie mniejszy. W warunkach ruchowych muszą być uwzględnione zmiany prędkości ultradźwięków rzędu 10%. Odpowiada to mniej więcej 50 ÷ 100-krotnej zmianie maksymalnej prędkości przepływającego płynu. Bardzo dokładna kompensacja wpływu prędkości fali ultradźwiękowej jest więc niezbędnie potrzebna.

W literaturze są opisane systemy kompensacyjne wymagające różnych

nakładów i dające różne efekty. Przeważnie prędkość fali ultradźwiękowej mierzy się przy pomocy dodatkowych urządzeń. W innych systemach zmienia się efektywną długość drogi fali ultradźwiękowej lub częstotliwość pomiarową w zależności od prędkości fali ultradźwiękowej [5].

Szczególnie dogodną możliwością stwarza określenie prędkości fali ultradźwiękowej na podstawie mierzonych faz φ_1 i φ_2 . Ze sumy faz (równanie /11/ i /12/) wynika :

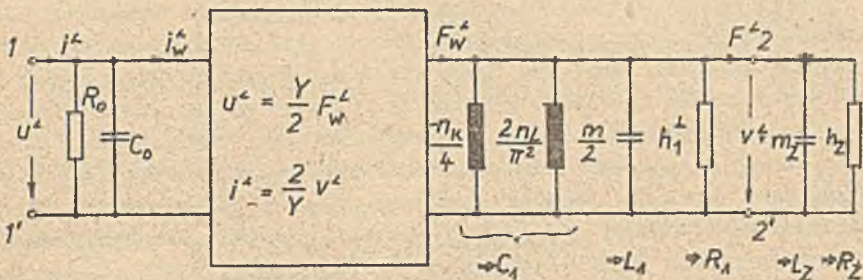
$$\alpha = \frac{4 \pi s f}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad /23/$$

Po podniesieniu równania /23/ do kwadratu i wstawieniu do równania /6/ otrzymuje się :

$$\dot{V} = \frac{256 \pi^3 PR^3 f (\varphi_1 - \varphi_2)}{2880^\circ \sin 2\beta (\varphi_1 + \varphi_2)^2} \quad /24/$$

W porównaniu z równaniem /6/ prędkość fali ultradźwiękowej w równaniu /24/ już nie występuje i tym samym wpływ jej jest skompensowany. Przez taką kompensację znikają pośrednio wpływy temperatury, lepkości, stężenia i ciśnienia o tyle, o ile wielkości te nie wpływają na współczynnik P charakteryzujący profil prędkości. Należy to uważać za istotny plus metody pomiaru przepływu przy pomocy ultradźwięków.

Potrzebne operacje rachunkowe wymagają zastosowania do pomiarów fazowych urządzenia cyfrowego. Wszystkie dotychczasowe rozważania odnosiły się do zmian fazowych uzależnionych od czasu przebiegu fali ultradźwiękowej w bezpośredniej bliskości wibratora. W urządzeniu do pomiaru przesunięcia fazowego będzie mierzona faza sygnału elektrycznego przy wibratorze. Fazy sygnału elektrycznego i ultradźwiękowego muszą być ze sobą zestrojone. Na rys.6 pokazany jest schemat zastępczy wibratora



Rys.6. Schemat zastępczy piezoelektrycznego wibratora grubościennego w pobliżu pierwszej częstotliwości własnej

Zaciski 1 i 1' oznaczają elektryczną, zaś zaciski 2 i 2' mechaniczną stronę całego schematu zastępczego pola dźwiękowego. O ile przetwornik będzie używany jako nadajnik, to wtedy z zasady może być mierzona faza napięcia zasilającego φ_u lub pobieranego prądu φ_1 . Dla tych wartości:

$$\varphi_u = \arctg \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \frac{\Omega \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) - \frac{1}{\Omega}}{R_1 + R_2} - \arctg \Omega \frac{L_2}{R_2 \sqrt{L_1 C_1}} \quad /25/$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\Omega (R_1 + R_2) C_0}{\sqrt{L_1 C_1} \left[1 - \frac{C_0}{C_1} (\Omega^2 (1 + \frac{L_2}{L_1}) - 1)\right]} - \arctg \Omega \frac{L_2}{R_2 \sqrt{L_1 C_1}} \quad /26/$$

gdzie: $\Omega = \omega / \omega_0$; $\omega_0 = (L_1 C_1)^{-1/2}$.

W obydwóch równaniach występuje dwukrotnie wyrażenie \arctg , które uwzględnia kompleksowo pole dźwiękowe. Między innymi przez zmiany temperatury ośrodka mierzonego może zmienić się to wyrażenie o około 1°.

Chociaż częstotliwość pomiarowa jest w praktyce stabilna, nie wolno wielkości Ω przyjmować jako stałej. Poprzez zmiany temperatury dochodzi do zmian parametrów wibratora, a tym samym do zmian częstotliwości własnej wibratorów. Ponieważ pomiar wymaga uzyskania wysokiego poziomu sygnału w okolicy częstotliwości własnej, jest rzeczą oczywistą, że faza prądu zasilającego przetwornik najlepiej odzwierciedla stosunki akustyczne. Po stronie odbiornika należy zdecydować, czy ma być mierzona faza dla zwarcia φ_0 , względnie faza biegu jakowego φ_∞ . Wykorzystanie schematu zastępczego prowadzi przy stanie zwarcia do równania /25/, a przy biegu jakowym do równania /26/. W każdym razie należy zwrócić uwagę, że równania na φ_0 i φ_∞ nie zawierają własności pola akustycznego. Praktycznie oznacza to, że zmiany parametrów wibratora, które są tego samego rodzaju, kompensują się co najmniej częściowo. Należy się jednak liczyć z kilkustopniowymi zmianami fazy. Tym samym wibratory stanowią słabe punkty w metodzie przesunięcia fazowego. W przypadku oddzielenia wibratora od mierzonego płynu możliwy jest pomiar przepływu płynów agresywnych jak i nieagresywnych. W rezultacie sprowadza się to do problemu materiału, z którego wykonany jest rurociąg. Również problemem czysto materiałowym jest wpływ temperatury na własności wibratorów. Występujące zwykle w handlu wibratory piezoelektryczne mogą być stosowane do temperatury 200°C. Dla wyższych temperatur oddziela się wibrator od medium przy pomocy specjalnego łącznika.

Dla użytkownika decydujące znaczenie ma dokładność pomiaru. Zwykle błąd pomiaru wynosi $\pm 1\%$. Ze względu na specyfikę pomiaru przepływu przy pomocy ultradźwięków dla większych przepływów oraz dłuższych dróg fali ultradźwiękowej i tym samym większych średnic rurociągu błąd jest mniejszy niż przy mniejszych średnicach i przepływach.

Szczególnie korzystnym i przyszłościowym jest zastosowanie ultradźwiękowych urządzeń do pomiaru przepływu w kanałach otwartych szczególnie tam, gdzie zwykłe środki pomiarowe choć częściowo są podatne na duże zakłócenia.

Reasumując można stwierdzić, że przepływomierze ultradźwiękowe należy brać pod uwagę szczególnie wtedy, gdy eliminują inne metody pomiarowe ze względu na duże średnice nominalne, dużą lepkość płynu, agresywność, złą przewodność elektryczną i tym podobne własności.

Tym bardziej należy podkreślić, że tego rodzaju urządzenia pomiarowe mogą mieć różne rozwiązania. Problemy techniczne są do opanowania w sposób ekonomiczny przy pomocy nowoczesnej elektroniki.

LITERATURA

- [1] Knapp Boetticher C.: Geschwindigkeits- und Mengemessung stromender Flüssigkeiten mittels Ultraschall. Dissertation an der ETH Zurich Voit-Druck, Heidenheim a.d.Brenz 1958.
- [2] Brown A.E., Allen G.W.: Ultrasonic Flow Measurement. Instrum.Control System 40 (1967)3, s.130-134.
- [3] Brand F.L.: Akustische Verfahre zur Durchflussmessung. VDI Berichte Nr 254, 1976.
- [4] Birger G.J.: Spezielle Fragen der Gradulierung von Ultraschalldurchflussmessern (russisch). Izmeritel'naja Technika (1962)H.10, s.53-55
- [5] Wartini Ch.: Analyse bekannter Ultraschalldurchflussmessverfahren und Entwurf eines digitalen Verfahrens für die Prozessmesstechnik. Dissertation an der TH Otto von Guericke Magdeburg 1975.
- [6] Schlichting H. : Grenzschicht-Theorie. Verlag G.Braun, Karlsruhe 1965
- [7] Pfau P. : Optimierung der Lage der Messstrecke intergrierender Durchflussmessverfahren. Archiv f.techn.Messen.Lfg 445, Febr.1973,s.21-24.
- [8] Piskunow N.S.: Differential- und Integralrechnung. Teil 2. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1970.
- [9] Dahlke H.E., Welkowitz W.: A New Ultrasonic Flowmeter for Industry. ISA Journal (1960) H.10, s.60-63.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВ, С ОСОБЫМ УЧЕТОМ
МЕТОДА СДВИГА ПО ФАЗЕ

Р е з ю м е

В статье представлено методы измерения потока при помощи ультразвуков, с особым учётом метода сдвига по фазе. Выведено уравления измерения, обсуждено влияющие величины и подано способ компенсации скорости ультразвукового луча. Представлено влияние свойств вибраторов на точность измерения.

THE ULTRASONIC FLOW RATE MEASUREMENT PROBLEMS WITH CARE FOR THE
PHASE SHIFT METHOD

Summary

The paper presents the ultrasonic flow rate measurement methods with care for the phase shift method. The measurements formulas are derived and the influential quantities are discussed. The way of compensation of the ultrasonic wave speed is presented. The influence of the vibrators properties on the measurements accuracy is shown there.