

Marek HAGEL, Stanisław WALUS
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

KONCEPCJA WIELODROGOWYCH PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH DLA KANAŁÓW OTWARTYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono typowe układy przepływomierzy ultradźwiękowych do pomiaru strumienia objętości w kanałach. Wyprowadzono wzory na błędy względne, z których wynika, że oprócz pomiaru poziomu należy wprowadzić korekcję prędkości. Omówiono jeden z błędów przetwornika elektronicznego oraz koncepcję układu przełączającego sondy ultradźwiękowe.

1. Wprowadzenie

Dotychczas praktycznie stosowane klasyczne metody pomiaru strumienia objętości wody w ciekach można podzielić na spiętrzeniowe, prędkościomierzowe i wskaźnikowe [1]. Pierwsza wymaga budowy kosztownej budowli hydrotechnicznej, drugie nie nadają się do pomiarów ciągłych, gdyż korzystanie z krzywej konsumpcyjnej w stanach szybkich wzebrań i opadania poziomu wiąże się z błędem histerezy [11]. Metody wskaźnikowe (obłoku lub rozcieńczania) wymagają zanieczyszczenia wody oraz wyszkolonego personelu do obsługi pomiaru lub automatycznej stacji dozująco-analitycznej [10]. Wobec tego żadna z nich nie będzie zalecana w gospodarce wodnej, gdzie wymagane są pomiary ciągłe.

Do metod nieklasycznych zalicza się: metodę laserową dopplerowską, elektromagnetyczną i ultradźwiękową [12]. Metoda laserowa dopplerowska opiera się na pomiarze prędkości w punktach i wymaga całkowania wyników, podobnie jak przy użyciu młynka hydrometrycznego. Koszt urządzenia, szczególnie dla szerokiego kanału byłby wiele razy większy niż dla innych metod. Metoda elektromagnetyczna pozwala na uzyskanie wyniku niezależnego od poziomu i kształtu rozkładu prędkości, wymaga jednak skomplikowanych urządzeń do kompensacji wielkości wpływających [2]. Metoda ultradźwiękowa jest najprostsza technicznie, jest metodą ciągłą i nie wymagającą obsługi, jest tańsza od innych dla kanałów o dużej szerokości. Wadami metody ultradźwiękowej są zależność wyniku od kształtu rozkładu prędkości i nieżyteczność dla bardzo płytkich kanałów o zmiennym dnem. Pierwsze próby

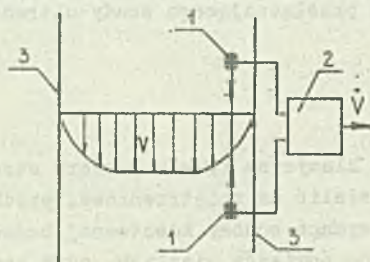
zastosowania metody ultradźwiękowej w kanale o przekroju prostokątnym dały wyniki zachęcające do dalszych badań [13].

2. Rozwiązania techniczne i modele przepływomierzy ultradźwiękowych w kanałach

Zastosowanie ultradźwięków do pomiaru strumienia objętości może się opierać na wykorzystaniu następujących zasad pomiaru: unoszenia fali ultradźwiękowej, zjawiska Dopplera, zasady korelacyjnej oraz zmiany prędkości fali ultradźwiękowej w wodzie płynącej w stosunku do prędkości w wodzie stojącej. Najczęściej stosuje się czwartą zasadę [5,6,8,12], przy czym rozróżnia się następujące rozwiązania techniczne:

a) punktowy pomiar prędkości

Schemat układu pomiarowego pokazano na rys.1.



Rys.1. Schemat punktowego pomiaru prędkości

1 - sondy przepływomierza, 2 przetwornik pomiarowy, 3 - brzeg kanału, v - prędkość miejscowa

Strumień objętości wyznacza się ze wzoru:

$$\dot{V} = k \cdot S \cdot v, \quad (1)$$

gdzie:

k - współczynnik proporcjonalności zależny od miejsca położenia sond,

S - pole przekroju przepływowego w kanale.

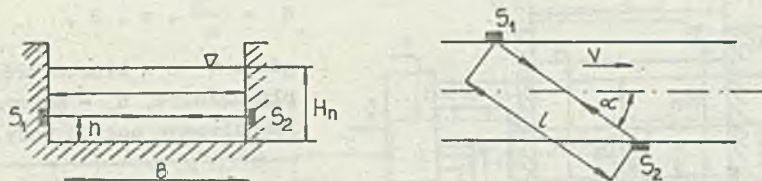
Rozwiązanie to może być stosowane dla stałego poziomu wody i stałości kształtu rozkładu prędkości. Odległość drogi od brzegu kanału wybiera się tak, aby prędkość mierzona v była równa prędkości średniej w przekroju kanału v_S :

$$v_S = \frac{1}{S} \int_S v \, dS. \quad (2)$$

Przy spełnieniu warunku $v = v_S$ wartość $k = 1$.

b) Układ jednodrogowy bez pomiaru poziomu

Układ ten stosuje się w przypadku niewielkich zmian poziomu i stałości kształtu rozkładu prędkości. Schemat układu przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Schemat układu jednodrogowego bez pomiaru poziomu

H - stan wody, B - szerokość kanału, h - odległość sond od dna kanału, l - odległość między sondami, α - kąt między drogą fali ultradźwiękowej a osią kanału, S_1, S_2 - sondy.

Przepływomierz ultradźwiękowy mierzy prędkość średnią po drodze fali ultradźwiękowej v_1 na podstawie zależności :

$$v_1 = \frac{l}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_1 \cdot t_2}, \quad (3)$$

gdzie : t_1 i t_2 - czasy przebiegu fali ultradźwiękowej pod prąd i z prądem wody.

Położenie drogi h wybiera się tak, aby $v_1 = v_S$, więc :

$$\dot{V} = v_1 \cdot S = v_1 \cdot B \cdot H_n, \quad (4)$$

gdzie : H_n - nominalny stan wody.

c) Układ jednodrogowy z pomiarem poziomu.

Pomiar poziomu może być dokonywany z dna kanału lub przez powietrze [3]. Równanie pomiaru będzie miało postać :

$$\dot{V} = v_1 \cdot K \cdot B \cdot H, \quad (5)$$

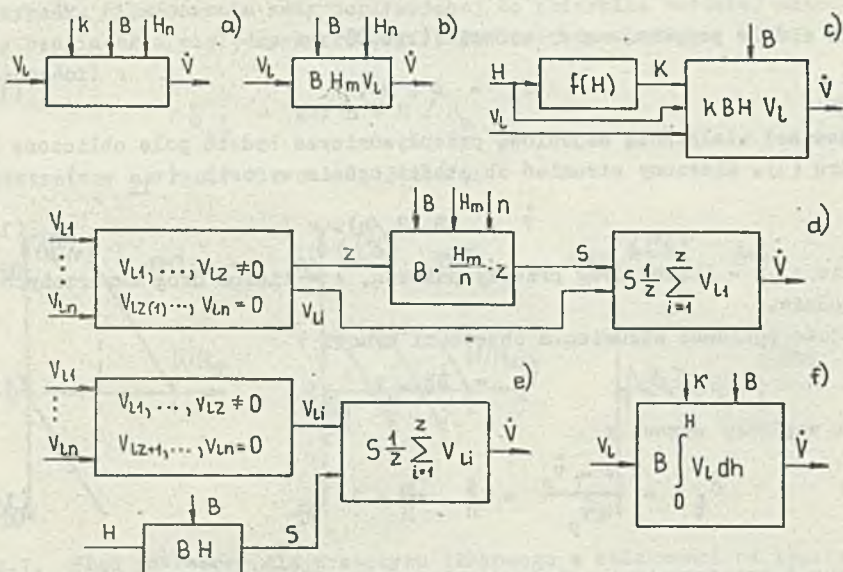
gdzie : $K = v_S / v_1$ zależy od położenia drogi fali ultradźwiękowej.

d) Układ wielodrogowy bez pomiaru poziomu

Schemat układu trójdrogowego pokazano na rys.3. Strumień objętości oblicza się ze wzoru :

$$\dot{V} = S \cdot \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z a_i v_{1i} \quad (6)$$

gdzie : z - liczba dróg zanurzonych w wodzie, v_{1i} - prędkość średnia



Rys.5. Schematy blokowe działania przepływomierzy o układach :
a/, b/, c/, d/, e/ i f/.

3. Błąd metody przepływomierza wielodrogowego bez pomiaru poziomu

Dla kanałów szerokich można przyjąć w przybliżeniu, że mają przekrój prostokątny o stanie wody równym rzeczywistemu, o szerokości B wyznaczonej ze wzoru:

$$B = S / H .$$

Dalsze przybliżenie modelu polega na przyjęciu, że szerokość kanału jest o wiele większa niż stan wody i można przyjąć, że profil prędkości w pionie jest niezależny od odległości od brzegu, tzn. $v = v(h)$. Istnieją dwa proste modele rozkładu prędkości :

- a) $v = \text{const}$, tzn. przepływ tłokowy,
- b) rozkład prędkości w funkcji odległości od dna jest liniowy, natomiast prędkość na powierzchni jest maksymalna i zależna od maksymalnego stanu wody H_m :

$$v / v_m = h / H_m \tag{10}$$

3.1. Tłokowy rozkład prędkości

Pole przekroju wody wynosi (rys.3) :

$$S_w = B \cdot H, \quad (11)$$

natomiast wielkością wejściową przepływomierza będzie pole obliczone ze wzoru (7). Mierzony strumień objętości będzie wynosił ($v_{11} = v$) :

$$\dot{V} = zB (H_m/n) \cdot v, \quad (12)$$

gdzie : n - liczba dróg przepływomierza, z - liczba dróg zanurzonych w wodzie.

Wartość poprawna strumienia objętości wynosi :

$$\dot{V}_p = BH \cdot v \quad (13)$$

Błąd względny wynosi :

$$\delta_{\dot{V}} = \frac{\dot{V} - \dot{V}_p}{\dot{V}_p} = \frac{z}{n} \cdot \frac{H_m}{H} - 1 \quad (14)$$

Na rys.6 przedstawiono zależność błędu przepływomierza od poziomu wody i liczby dróg przypadających na cały zakres zmian stanu wody H , tzn. dla $H \in [0; H_m]$. Jeżeli drogi są rozmieszczone w stałej odległości od siebie i odległość ta wynosi H_m/n , natomiast odległość pierwszej drogi od dna $H_m/2n$, to błędy dla stanu wody H równego położeniu sond będą wynosiły :

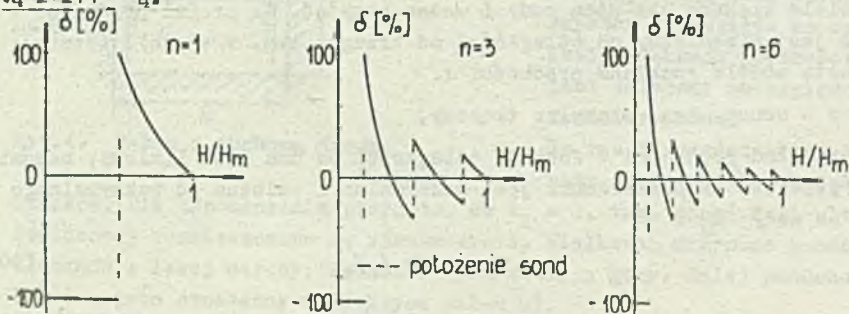
$$\delta_{\dot{V}g} = 1 / (2i - 1) \quad (15)$$

dla obniżającego się poziomu wody

oraz

$$\delta_{\dot{V}d} = -1 / (2i + 1) \quad (16)$$

dla podnoszącego się poziomu wody, gdzie i -ty pas to pas między drogami $i-1$ -tą i $i+1$ -ą.

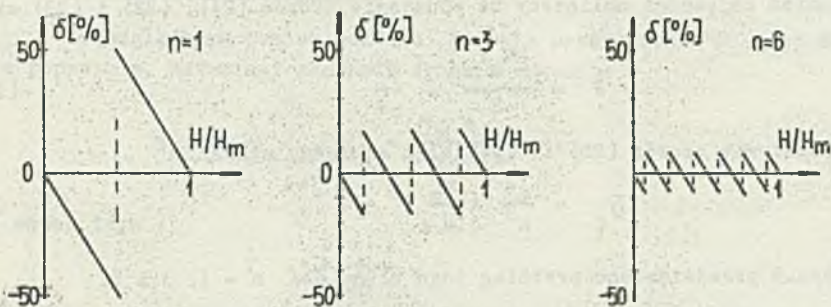


Rys.6. Zależność błędu względnego przepływomierza ultradźwiękowego od stanu wody H oraz liczby dróg fali ultradźwiękowej n .

Błąd względny dla stanów wody poniżej dolnej drogi wynosi niezależnie od liczby dróg - 100%, co wskazywałoby na nieprzydatność tej metody. W przypadku bilansowania wody dopływającej do zbiornika bardziej miarodajny będzie błąd względny zakresowy (pojęciowo odpowiadający klasie niedokładności) :

$$\delta_{zV} = z / n - H / H_m, \quad (17)$$

przedstawiony na rys.7 dla $n = 1, 3 \text{ i } 6$.



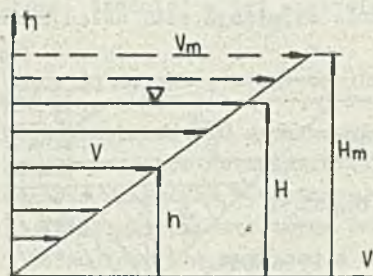
Rys.7. Błąd zakresowy dla przepływu tłokowego w zależności od liczby dróg n .

3.2. Liniowy rozkład prędkości

Profil prędkości przedstawiony na rys.8 wyraża się wzorem :

$$v = h \cdot \frac{v_m}{H_m}, \quad (18)$$

gdzie : v_m - prędkość na powierzchni wody dla maksymalnego poziomu H_m .



Rys.8. Liniowy rozkład prędkości

Wartość poprawna strumienia objętości wynosi :

$$V_p = BH \cdot \frac{1}{H} \int_0^H \frac{v_m}{H_m} \cdot h \, dh \quad (19)$$

Po scałkowaniu :

$$\dot{V}_p = \frac{B v_m}{2 H_m} \cdot H^2 \quad (20)$$

Powierzchnia przepływowa mierzona przez przepływomierz wynosi :

$$S = Bz (H_m/n) \quad (21)$$

natomiast prędkość średnia :

$$v_{\text{sr}} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z v_i \quad (22)$$

Sondy przepływomierza umieszczone są na wysokościach h_1 od dna kanału:

$$h_1 = \frac{H_m}{2n} (2i - 1) \quad (23)$$

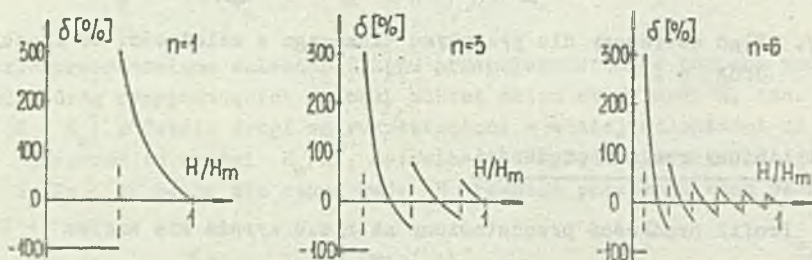
Strumień objętości obliczony na podstawie wzorów (21), (22) i (23) wynosi :

$$\dot{V} = \frac{BH_m v_m}{2} \cdot \frac{z^2}{n^2} \quad (24)$$

Na podstawie wzorów (20) i (24) błąd względny wynosi :

$$\delta_v = \frac{z^2}{n^2} \left(\frac{H_m}{H} \right)^2 - 1 \quad (25)$$

Na rys.9 przedstawiono przebieg tego błędu dla $n = 1, 3$ i 6 .



Rys.9. Błąd względny przepływomierza w zależności od liczby dróg i poziomu wody

Jak widać z rys.9, nawet dla 6 dróg i zmniejszenia się stanu wody o 40% błąd osiąga wartość 20%, co praktycznie eliminuje taki układ pomiarowy.

4. Błąd metody przepływomierza wielodrogowego z pomiarem poziomym

Jak widać z rys.6 i 9, błędy przepływomierza ultradźwiękowego dla przyjętych modeli będą duże. Kształt rzeczywistych modeli zawiera się między modelem tłokowym i liniowym, więc błędy w warunkach rzeczywistych będą się zawierały pomiędzy wartościami wyrażonymi wzorami (14) i (25). Zostaną więc przeanalizowane przypadki z pomiarem poziomym (układ e) w pkt 2).

4.1. Tłokowy rozkład prędkości

Iloczyn $S \cdot v_{\text{sr}}$ będzie wynosił :

$$\dot{V} = B \cdot H \cdot v, \quad (26)$$

a więc błąd względny będzie dla każdego stanu wody wynosił zero.

4.2. Liniový rozkład prędkości

Ze względu na pomiar poziomu H pole przepływowe S jest mierzone poprawnie, natomiast prędkość średnia wynosi :

$$v_{\text{sr}} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z v_i = \frac{v_m z}{2n} \quad (27)$$

i wobec tego :

$$\dot{V} = \frac{B v_m z}{2n} \cdot H \quad (28)$$

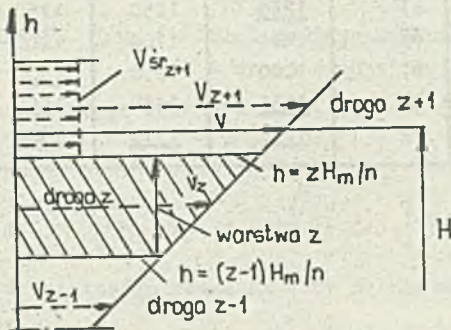
Na podstawie wzoru (20) i (28) :

$$\delta_{\dot{V}} = \frac{H_m}{H} \cdot \frac{z}{n} - 1 \quad (29)$$

Wzór ten jest taki sam jak wzór (14) dla tłokowego rozkładu prędkości, więc mimo, że jest mierzony poziom, błędy dla tego typu rozkładu będą duże.

4.3. Korekcja prędkości średniej dla liniowego rozkładu prędkości

Przyczyną błędu przepływomierza analizowanego w punkcie 4.2 jest fakt, że prędkość mierzona w ostatniej warstwie jest równa tylko wtedy prędkości średniej w tej warstwie, gdy poziom H będzie wynosił zH_m/n .



Strumień objętości można złożyć z dwóch składników \dot{V}_1, \dot{V}_2 :

$$\dot{V}_1 = B \cdot H_m / n \cdot \sum_{i=1}^z v_i, \quad (30)$$

jest to strumień objętości w z pełnych warstwach. Strumień objętości w niepełnej ostatniej warstwie będzie wynosił :

$$\dot{V}_2 = B \cdot \frac{H}{n} \cdot v_{\text{sr}, z+1}, \quad (31)$$

Rys. 10. Ilustracja konieczności kompensacji dla warstwy niepełnej ; v_{z+1} mierzona wynosi zero, natomiast $v_{\text{sr}, z+1} > 0$

gdzie prędkość średnią w $z+1$ warstwie oblicza się ze wzoru (korzystając ze wzoru (18)):

$$v_{sr\ z+1} = \frac{n}{H_m} \cdot \int_{H_m z/n}^H \frac{v_m}{H_m} \cdot h \, dh = \frac{n v_m}{2} \left[\left(\frac{H}{H_m} \right)^2 - \frac{z^2}{n^2} \right] \quad (32)$$

Dla liniowego rozkładu prędkości :

$$v_m = 2 n v_z / (2z-1) \quad (33)$$

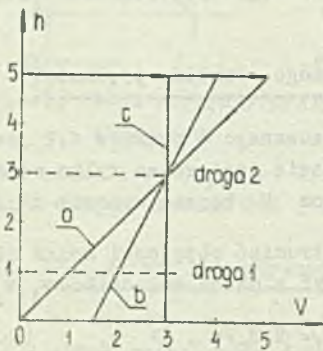
Strumień objętości będzie sumą $\dot{V}_1 + \dot{V}_2$ i po wstawieniu (33) i (32) do (31) otrzymuje się :

$$\dot{V} = \frac{B H_m}{n} \sum_{i=1}^z v_i + \frac{B H_m v_z n}{2z-1} \left[\left(\frac{H}{H_m} \right)^2 - \frac{z^2}{n^2} \right]. \quad (34)$$

Przepływomierz działający zgodnie ze wzorem (34) będzie mierzył dokładnie strumień objętości, o ile rozkład prędkości będzie liniowy.

4.4. Porównanie wskazań przepływomierzy o różnych układach

Na rys.11 przedstawiono 3 rozkłady prędkości : a/ liniowy, b/ liniowy z prędkością większą od zera dla $h=0$, c/ tęczowy. Dla $B = 100$ obliczono strumień objętości i zestawiono w tabelicy 1.



Tabl.1. Wskazania przepływomierzy o różnych układach w zależności od kształtu rozkładu prędkości c) d) e) wg pkt 2, K) - układ z kompensacją - wzór (34), P) - wartość poprawna

Rodzaj układu pom.	V_a	\dot{V}_b	\dot{V}_c
c)	1250	1250	1250
d)	800	1100	1200
e)	1000	1250	1500
K)	1250	1450	1650
P)	1250	1375	1500

Rys.11. Rozkłady prędkości dla stałego stanu H.

5. Wpływ opóźnień sygnału w przetworniku elektronicznym na dokładność pomiaru

Jednym z istotnych elementów przetwornika elektronicznego jest tor wzmacniacza i detekcji impulsów odbieranych z sond ultradźwiękowych. Rozwiązanie tej części układu ma wpływ na dokładność pomiaru średniej prędkości przepływu v_1 w danej drodze pomiarowej, a co za tym idzie - na dokładność pomiaru średniej prędkości przepływu v_s w przekroju przepływu. W spotykanych rozwiązaniach dokładności pomiaru tych wielkości wynoszą odpowiednio 0,5 % i 5 %.

Rozpatrując równanie przetwarzania w przepływomierzu :

$$v_1^* = k \frac{t_1^* - t_2^*}{t_1^* t_2^*} \quad (35)$$

gdzie : k - współczynnik proporcjonalności,
 t_1^* , t_2^* - wyniki pomiarów czasów przejścia fali ultradźwiękowej pomiędzy sondami z prądem i pod prąd przepływu cieczy,

v_1^* - wynik pomiaru średniej prędkości przepływu cieczy w danej drodze pomiarowej.

Należy uwzględnić, że na czasy t_1^* i t_2^* składają się czasy t_1 i t_2 przejścia fali ultradźwiękowej w cieczy oraz czasy opóźnień Δt_1 i Δt_2 sygnału w układzie elektronicznym. Można zatem napisać:

$$\begin{aligned} t_1^* &= t_1 + \Delta t_1 \\ t_2^* &= t_2 + \Delta t_2 \end{aligned} \quad (36)$$

oraz

$$v_1^* = v_1 + \Delta v_1 \quad (37)$$

gdzie : Δv_1 - błąd pomiaru średniej prędkości przepływu cieczy w danej drodze pomiarowej.

Podstawiając równania (36), (37) do (35) i przyjmując $t_1 \approx t_2$ otrzymujemy :

$$\Delta v_1 = \frac{k}{t_1^2} \left[\Delta t_1 - \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \Delta t_2 \right] \approx \frac{k}{t_1^2} (\Delta t_1 - \Delta t_2) \quad (38)$$

Przekształcając równania (36) do postaci:

$$\begin{aligned} t_1^* &= t_1 + \Delta t + \Delta t_p \\ t_2^* &= t_2 + \Delta t - \Delta t_p \end{aligned} \quad (39)$$

gdzie :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$$

$$\Delta t_p = \left| \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2} \right|$$

otrzymujemy :

$$\Delta v_1 \approx \frac{2k}{t_1^2} \Delta t_p \quad (40)$$

Ze wzoru (40) wynika istotny wniosek, że o błędzie pomiaru średniej prędkości przepływu cieczy w danej drodze pomiarowej decyduje różnica czasów opóźnień określona za pomocą Δt_p , natomiast wpływ wspólnego czasu opóźnienia Δt jest znikomo mały. Zatem jeżeli sygnały odbierane z sond ultradźwiękowych w jednej drodze pomiarowej są jednakowo opóźniane i zniekształcane, to nie ma to wpływu na wartość błędu pomiaru, niezależnie od wartości opóźnienia i zniekształcenia sygnału. Zatem na dokładność pomiaru v_1 nie będzie miała wpływu np. długość kabla łączącego sondy z przetwornikiem elektronicznym, a także można zrezygnować z użycia wzmacniaczy z automatyczną pętlą regulacji wzmocnienia.

Jeżeli chodzi o niesymetrię czasów opóźnienia Δt_p , to ze wzoru (40) można obliczyć, że dla względnego błędu pomiaru $\frac{\Delta v_1}{v_1} < 0,5\%$, wielkość Δt_p musi spełniać warunek:

$$\Delta t_p < 25 \cdot 10^{-4} (t_1 - t_2) \quad (41)$$

Np. dla $v_1 = 1$ m/s, $B = 10$ m, $\alpha = 45^\circ$, Δt_p musi być mniejsze od 20 ns.

6. Układ przełączający sondy ultradźwiękowe w przepływomierzu wielodrogowym

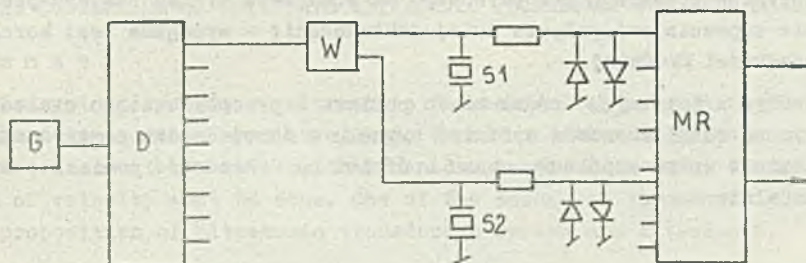
Jednym z zagadnień konstrukcyjnych dotyczącym przepływomierza wielodrogowego jest wybór układu oraz algorytmu przełączenia sond ultradźwiękowych w poszczególnych drogach pomiarowych. Rozwiązanie powinno zapewniać minimalny czas trwania cyklu pomiarowego przy maksymalnej prostocie układu. Z punktu widzenia minimalizacji czasu trwania cyklu pomiarowego najkorzystniejsze rozwiązanie polegałoby na jednoczesnym pobudzeniu wszystkich sond ultradźwiękowych. Jest to jednak fizycznie nierealizowalne ze względu na przesłuchy sygnału pomiędzy poszczególnymi drogami pomiarowymi. Możliwe jest natomiast zrealizowanie jednoczesnego pobudzenia sond w jednej drodze pomiarowej oraz kolejnego wybierania dróg pomiarowych. Dla realizacji kolejnego wybierania dróg

pomiarowych istotne znaczenie ma możliwość zastosowania wzmacniacza bez automatycznej regulacji wzmocnienia, o czym wspomniano w pkt 5.

Z punktu widzenia potrzeb przepływomierza wielodrogowego układ przełączający powinien spełniać następujące wymagania :

- pasmo przenoszenia $0,1 + 2$ MHz,
- możliwość ciągłej długotrwałej pracy,
- brak występowania napięć i prądów resztkowych,
- niewielki pobór mocy,
- brak przenikania sygnału sterującego na sygnał wyjściowy,
- stabilność pracy w szerokim zakresie temperatur.

Wobec takich wymagań istnieją trudności w zastosowaniu mechanicznych (ograniczona liczba przełączeń) oraz bipolarnych (występowanie znacznych napięć i prądów resztkowych) układów przełączających. Korzystne jest natomiast zastosowanie kluczy unipolarnych w postaci scalonych multiplekserów i demultiplekserów ze względu na szereg zalet, jakie te układy posiadają [9]. Przykładowy schemat rozwiązania układu przełączania sond ultradźwiękowych w przepływomierzu wielodrogowym przedstawia rys.12



Rys.12. Schemat rozwiązania układu przełączania sond ultradźwiękowych w przepływomierzu wielodrogowym

Sygnał z generatora impulsów G przełączany jest przez demultiplekser D na wejście wzmacniacza W kolejnych dróg pomiarowych. Wzmocniony we wzmacniaczu impuls napięciowy pobudza jednocześnie do drgań sondy S1 i S2. Sondy te tworzą jedną drogę pomiarową. Impuls ultradźwiękowy wysłany przez sondę S1 jest odbierany przez sondę S2 i po przetworzeniu na sygnał napięciowy podawany jest na wejście multipleksera różnicowego MR. Podobnie dzieje się z impulsem ultradźwiękowym wysłanym przez sondę S2. Dzięki takiemu rozwiązaniu dokonuje się jednoczesnego pomiaru czasów t_1^* i t_2^* w wybranej drodze pomiarowej. Pozwala to

na dwukrotne skrócenie czasu trwania cyklu pomiarowego w stosunku do rozwiązania, w którym każda sonda byłaby pobudzana oddzielnie.

Podsumowując, należy zauważyć, że występują trudności w zastosowaniu istniejących rozwiązań stopni odbiorczych wykorzystywanych w przepływomierzach jednodrogowych, np. w przepływomierzu f-my TECHPAN [7] nie można jednocześnie pobudzać obu sond ultradźwiękowych, a w przepływomierzu f-my ULTRAFLUX [4] zastosowano klucze diodowe, które w przypadku układu wielodrogowego wymagałyby skomplikowanego sterowania.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono niektóre zagadnienia związane z opracowywanym wielodrogowym przepływomierzem ultradźwiękowym dla kanałów otwartych. Wyniki uzyskane w tej pracy pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków :

- 1/ Przepływomierze te nie nadają się do pomiaru przy bardzo niskich stanach wody, tzn. gdy poziom wody jest poniżej poziomu najniższej drogi.
- 2/ Mimo stosowania kilku dróg przepływomierze te wymagają dla dużych zmian poziomu równoczesnego pomiaru poziomu wody.
- 3/ Korekcja przekroju przepływowego na podstawie wyniku pomiaru poziomu nie zapewnia osiągnięcia dużej dokładności; - wymagana jest korekcja prędkości średniej.
- 4/ Jednym z istotnych źródeł błędu pomiaru w przepływomierzu wielodrogowym są różnice czasów opóźnień sygnału w danej drodze pomiarowej, natomiast wpływ wspólnego czasu opóźnień na dokładność pomiaru jest pomijalnie mały.

LITERATURA

- [1] BN-72/6210-04. Metody pomiarów przepływu w kanałach otwartych. Podział i stosowanie. WN, 1981.
- [2] CHWALEBA A., MOESCHKE B., STAROSZCZYK Z. : Zastosowanie metody elektromagnetycznej do pomiaru średniej prędkości wody w rzekach. Wiadomości IMiGW, tom V (XXVI), zesz.1-2, 1979.
- [3] HAGEL M. : Przykład rozwiązania poziomomierza ultradźwiękowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 645, Seria Automatyka zesz.52. Gliwice 1980.
- [4] Katalog firmy ULTRAFLUX, Francja.
- [5] Katalog firmy MILLTRONICS, Kanada.
- [6] Katalog firmy OCEAN RESEARCH EQUIPMENT, USA.

- [7] Katalog firmy ZD TECHPAN , Warszawa.
- [8] Katalog firmy TRI-AID SCIENCES, Inc., USA.
- [9] KULKA Z., NADACHOWSKI M. : Analogowe układy scalone. WKŁ, W-wa 1979.
- [10] UJDA K. : Metoda integracji powierzchniowej w pomiarze natężenia przepływu wody. Wiadomości ILiGW, tom IV (XXV), zesz.4, 1978.
- [11] UJDA K. : Określenie natężenia przepływu w korytach naturalnych na podstawie elementów hydraulicznych koryta. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, tom IX (XXI), zesz.2-3, 1973.
- [12] WALUS S. : Nieklasyczne metody pomiaru strumienia objętości wody w kanałach otwartych. Referat na Sympozjum "Kierunki rozwoju metod pomiarów wielkości fizycznych w służbie meteorologicznej, hydrologicznej i oceanograficznej" - ILiGW, Gdańsk, 28-30 czerwca 1983.
- [13] WALUS S. : Zastosowanie przepływomierza ultradźwiękowego do pomiaru strumienia objętości w kanałach otwartych. XVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów. Materiały pokonferencyjne. Prace Instytutu Przetwarzania i Użytkowania Energii Elektrycznej, Seria C nr 12. Politechnika Lubelska, Lublin 1984.

THE CONCEPTION OF MULTIPATH ULTRASONIC FLOWMETERS FOR OPEN CHANNELS

S u m m a r y

The typical systems of ultrasonic flowmeters for volumetric flow measurement in channels are introduced. From the derivated formulas on relative errors it is visible, that besides level measurement the correction of velocity must be done. One of the errors of electronic unit and the proposition of ultrasonic transducers switch are introduced.

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОДОРОЖНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ ОТКРЫТЫХ КАНАЛОВ

Р е з ю м е

Представлены типичные решения ультразвуковых расходомеров для измерения волуметрического расхода в каналах. Выведены уравнения для относительных ошибок, которые показывают, что кроме измерения уровня необходимо вводить коррекцию по скорости. Описана одна из ошибок электронного преобразователя и дана концепция решения переключающей системы ультразвуковых зондов.