

Marek HAGEL

Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

PRZYKŁAD ROZWIĄZANIA UKŁADOWEGO POZIOMOMIERZA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Streszczenie. Omówiono zasadę działania, główne parametry i warunki montażu poziomomierzy ultradźwiękowych. Na przykładowym rozwiązaniu układowym przeprowadzono analizę błędów pomiaru przyrządem. Podano wnioski dotyczące doboru stałych konstrukcyjnych poziomomierza i sposobów zmniejszania błędów pomiaru.

1. Wstęp

Jedną z metod pomiaru poziomu jest metoda ultradźwiękowa. Poziomomierze ultradźwiękowe posiadają szereg istotnych zalet jak :

- duża niezawodność,
- duża szybkość wykonywania pomiarów,
- prostota konstrukcji,
- szeroki zakres zastosowań,
- duży zakres pomiarowy, (20 m),
- wyjście cyfrowe dogodne do współpracy z systemem CRPD,
- możliwość długiej nieprzerwanej pracy,
- możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur (do 250°C) i ciśnień (do 250 kg/cm²),
- możliwość pomiaru w środowiskach toksycznych i wybuchowych.

2. Zasada działania i główne parametry poziomomierzy ultradźwiękowych

Zasada działania poziomomierzy ultradźwiękowych oparta jest na pomiarze czasu pomiędzy wysłaniem i odebraniem przez przyrząd impulsu ultradźwiękowego odbitego od granicy dwóch środowisk o różnych oporach akustycznych. W czasie rozprzestrzaniania się fali ultradźwiękowej w jednorodnym środowisku następuje jej tłumienie i rozbieganie się. Oba te zjawiska zależą od częstotliwości ultradźwięku i w znacznym stopniu wpływają na straty energii oraz dokładność pomiaru. Optymalną częstotliwość f_{opt} , przy której stosunek amplitud fal odebranej od wysłanej osiąga maksimum, można określić na podstawie równania [2] :

$$f_{\text{opt}} = \frac{1}{2 \sqrt{a}} \frac{1}{\sqrt{x}}, \quad /1/$$

gdzie :

- a - stała zależna od środowiska, w którym rozprzestrzenia się fala ultradźwiękowa,
- x - odległość przetwornika nadawczego i odbiorczego od powierzchni odbijającej falę ultradźwiękową.

Wartości optymalnej częstotliwości f_{opt} wyrażonej w kHz dla czterech przypadków podano w tabeli 1.

Tabela 1

| x [m] | Suche powietrze | Woda |
|-------|--|---|
| | $a_{20^{\circ}\text{C}} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ [e}^2/\text{m]}$ | $a_{20^{\circ}\text{C}} = 0,25 \cdot 10^{-13} \text{ [e}^2/\text{m]}$ |
| 10 | 35,3 | 1000,0 |
| 20 | 25,0 | 707,3 |

Tłumienie B amplitudy fali ultradźwiękowej wyrażone w dB można określić na podstawie równania:

$$B = 20 \log \frac{A_x}{A_0} = -20 a f^2 x \log e, \quad /2/$$

gdzie:

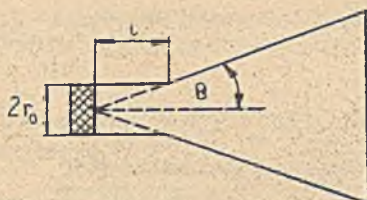
- A_x - amplituda fali ultradźwiękowej w odległości x od przetwornika nadawczego,
- A_0 - amplituda fali ultradźwiękowej w pobliżu przetwornika nadawczego,
- f - częstotliwość fali ultradźwiękowej.

Wartości tłumienia B wyrażonego w dB dla czterech przypadków, przy uwzględnieniu danych zawartych w tabeli 1, podano w tabeli 2.

Tabela 2.

| 2x [m] | Suche powietrze | Woda |
|--------|-----------------|-------|
| 20 | -4,32 | -4,34 |
| 40 | -4,34 | -4,34 |

Rozbieganie się fali ultradźwiękowej przedstawia rys.1 [3].



Rys.1. Rozbieganie się fali ultradźwiękowej w jednorodnym środowisku

Parametry l i θ można określić na podstawie równań:

$$l = \frac{r_0^2}{\lambda} , \quad /3/$$

$$\theta = \arcsin 0,66 \frac{\lambda}{l_0} , \quad /4/$$

gdzie:

r_0 - promień przetwornika nadawczego,

λ - długość fali ultradźwiękowej.

Wartości kąta θ wyrażonego w radianach, dla czterech przypadków, przy uwzględnieniu danych zawartych w tabeli 1, podano w tabeli 3.

Tabela 3

| x [m] | Suche powietrze | Woda |
|-------|-----------------|------|
| 10 | 0,66 | 0,10 |
| 20 | 1,05 | 0,14 |

Innym zjawiskiem mającym istotny wpływ na dokładność pomiaru jest zależność prędkości rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej w środowisku od zmian jego temperatury [4] i składu chemicznego. Błąd względny wynikający ze zmiany temperatury ośrodka o 1K można określić na podstawie równania:

$$\delta_T = \frac{\Delta x}{x} \frac{1}{\Delta T} = - \frac{\alpha}{c} , \quad /5/$$

gdzie:

α - temperaturowy współczynnik zmian prędkości rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej,

c - prędkość rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej,

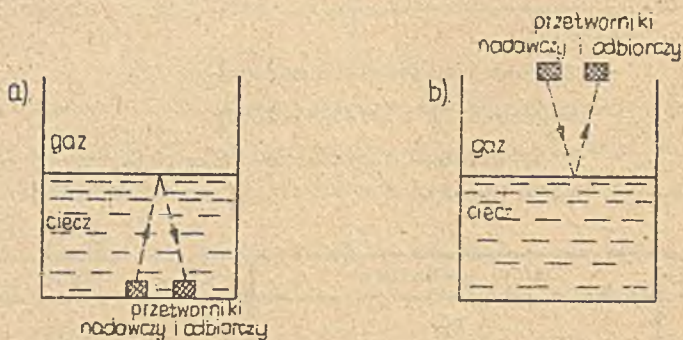
T - bezwzględny przyrost temperatury.

Wartości błędu δ_T wynoszą dla suchego powietrza $0,17 \frac{\%}{K}$, a dla wody $0,16 \frac{\%}{K}$.

3. Warunki montażu poziomomierzy ultradźwiękowych

Istnieją dwa podstawowe rozwiązania konstrukcyjne poziomomierzy ultradźwiękowych [1]:

- a - przetworniki nadawczy i odbiorczy umieszczone są poniżej mierzonego poziomu (rys.2a), ultradźwięki rozprzestrzeniają się w ośrodku o większej gęstości w cieczy;
- b - przetworniki nadawczy i odbiorczy znajdują się powyżej mierzonego poziomu (rys.2b), ultradźwięki rozchodzą się w gazie.



Rys.2. Sposoby umieszczenia poziomomierzy ultradźwiękowych przy pomiarze poziomu cieczy w zbiorniku

Pierwsze rozwiązanie charakteryzuje się następującymi zaletami i wadami:

- istnieje możliwość stosowania przetworników nadawczych o małych mocach dzięki niewielkim stratom energii podczas wysyłania impulsu ultradźwiękowego do cieczy,
- optymalna częstotliwość ultradźwięków jest wysoka, co pozwala na uzyskanie wiązki ultradźwiękowej o małym kącie rozbiegania θ ,
- zakres zastosowań dotyczy praktycznie tylko pomiarów poziomu cieczy,
- istnieje duży wpływ zmian temperatury i składu chemicznego cieczy na wynik pomiaru,
- dużą trudność stanowi brak bezpośredniego dostępu do przetworników nadawczego i odbiorczego,

- na dnie zbiornika często powstaje osad silnie tłumiący falę ultradźwiękową,
- w przypadku cieczy zanieczyszczonych powstaje duże rozproszenie wiązki ultradźwiękowej.

Rozwiązanie drugie jest bardziej uniwersalne i wygodne do montażu. Można je wykorzystać do pomiarów poziomu zarówno cieczy jak i ciał stałych.

Posiada ono jednak szereg wad:

- konieczność stosowania przetworników nadawczych o dużych mocach ze względu na duże straty energii podczas emisji impulsu ultradźwiękowego do gazu,
- mniejsza częstotliwość optymalna powoduje dużą rozbieżność wiązki ultradźwiękowej i mniejszą sprawność,
- zmiany temperatury i składu chemicznego gazu mają duży wpływ na wynik pomiaru.

W celu poprawy parametrów przyrządu można zastosować w obu rozwiązaniach układy kompensujące zmiany prędkości ultradźwięku [1], [4] i ograniczające rozbieżność wiązki ultradźwiękowej [5].

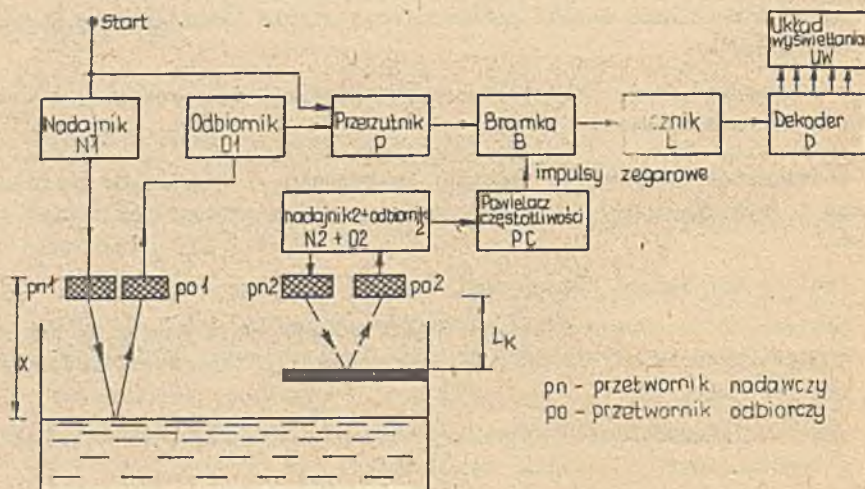
Działanie układu kompensacyjnego polega na zastosowaniu odcinka pomiarowego o znanej długości, pozwalającego na pomiar rzeczywistej prędkości ultradźwięku. Rozwiązanie takie nie uwzględnia jednak rozkładu temperatury i składu chemicznego ośrodka, wzdłuż całej drogi impulsu ultradźwiękowego.

4. Przykładowe rozwiązanie układowe poziomomierza ultradźwiękowego

Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych poziomomierzy ultradźwiękowych. Jedno z nich, z kompensacją zmian prędkości ultradźwięku, przedstawia schemat blokowy na rys.3.

Zasada działania poziomomierza jest następująca:

sygnał startu powoduje zadziałanie nadajnika N1 i przerzutnika P. Nadajnik N1 generuje impuls napięciowy, który zostaje przetworzony w przetworniku pn1 na impuls ultradźwiękowy. Przerzutnik P otwiera bramkę B i licznik L zaczyna zliczanie impulsów zegarowych. Impuls ultradźwiękowy po odbiciu od powierzchni odbijającej zostaje przetworzony w przetworniku po1 na impuls napięciowy, który następnie zostaje poddany obróbie w odbiorniku O1 i poprzez przerzutnik P powoduje zamknięcie branki B.



Rys.3. Schemat blokowy poziomomierza ultradźwiękowego z kompensacją zmian prędkości ultradźwięku

Układ kompensacji złożony z nadajnika N2, odbiornika O2 i przetrzutników pn2, po2 działa podobnie z tą różnicą, że nadajnik N2 zostaje pobudzany do pracy impulsami odebranymi przez odbiornik O2, natomiast powierzchnia odbijająca jest ustawiona na ściśle określonym i znanym poziomie. Impulsy napięciowe pobudzające nadajnik N2 są równocześnie podawane na powielacz częstotliwości, na którego wyjściu otrzymujemy impulsy zegarowe zliczane przez licznik L. Czas τ otwarcia bramki B wynosi:

$$\tau = \frac{2x}{c}, \quad /6/$$

gdzie:

x - odległość przetworników pn1 i pn2 od powierzchni odbijającej,

c - prędkość rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej.

Okres τ_w impulsów zegarowych wynosi:

$$\tau_w = \frac{1}{K} \tau_K, \quad /7/$$

przy czym:

$$\tau_K = \frac{2L_K}{c}, \quad /8/$$

gdzie: L_K - długość odcinka kompensacyjnego,
 K - współczynnik powielania w powielaczu częstotliwości.

Liczba N impulsów zegarowych zliczonych przez licznik L w czasie otwarcia bramki B wynosi :

$$N = \frac{\tau}{\tau_W} = K \frac{\tau}{\tau_K} = K \frac{x}{L_K} \quad /9/$$

Z równania /9/ wynika, że wynik pomiaru jest niezależny od prędkości ultradźwięku c , a tym samym od zmian temperatury i składu chemicznego środowiska, w którym rozprzestrzenia się fala ultradźwiękowa. Możliwe jest również realizacja odczytu bezpośredniego przy odpowiednim doborze wartości K i L_K .

5. Analiza błędów

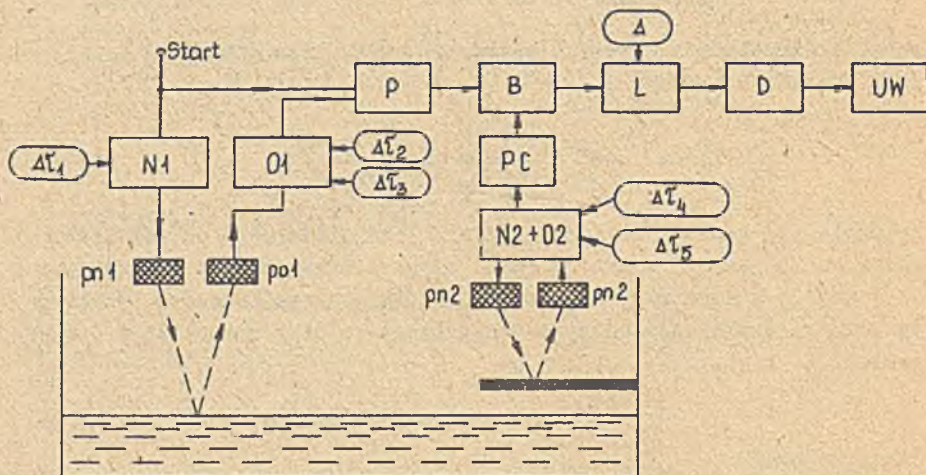
Dla określenia dokładności pomiaru poziomomierzem można przyjąć następujące źródła błędów aparaturowych:

- czas $\Delta\tau_1$ opóźnienia sygnału wprowadzany przez nadajnik $N1$,
- czas $\Delta\tau_2$ zadziałania odbiornika $O1$, określony jako czwarta część okresu fali ultradźwiękowej,
- czas $\Delta\tau_3$ opóźnienia sygnału, wprowadzany przez odbiornik $O1$,
- czas $\Delta\tau_4$ opóźnienia sygnału wprowadzany przez odbiornik $O2$ i nadajnik $N2$,
- czas $\Delta\tau_5$ zadziałania odbiornika $O2$, określony podobnie jak $\Delta\tau_2$,
- błąd Δ zliczania impulsów przez licznik L .

Schemat blokowy z zaznaczonymi źródłami błędów przedstawiony jest na rys.4.

Oplerając się na wymienionych źródłach błędów można określić faktyczną liczbę impulsów zegarowych $N + \Delta N$ zliczonych przez licznik L w czasie otwarcia bramki B :

$$N + \Delta N = K \frac{\tau + \Delta\tau}{\tau_K + \Delta\tau_K} + \Delta \approx K \frac{\tau \tau_K + \tau_K \Delta\tau - \tau \Delta\tau_K}{\tau_K^2} + \Delta \quad /10/$$



Rys.4. Schemat blokowy poziomomierza z zaznaczonymi źródłami błędów

gdzie:

$$\Delta l' = \Delta l'_1 + \Delta l'_2 + \Delta l'_3$$

$$\Delta l'_K = \Delta l'_4 + \Delta l'_5$$

Podstawiając równanie /9/ do równania /10/ otrzymujemy:

$$\Delta N \approx K \frac{\tau_K \Delta l' - \tau \Delta l'_K}{\tau_K^2} + \Delta \quad /11/$$

Korzystając z równań /6/ i /8/ otrzymamy:

$$\Delta N \approx \frac{K_c}{2L_K^2} (L_K \Delta l' - x \Delta l'_K) + \Delta \quad /12/$$

Dla orientacyjnych obliczeń można założyć $\Delta l' \approx \Delta l'_K$, w takim przypadku:

$$\Delta N \approx \Delta_0 - \delta_x, \quad /13/$$

gdzie: $\Delta_0 = \frac{K_c \Delta l'}{2L_K} + \Delta$: błąd zera,

$\delta = \frac{K_c \Delta l'}{2L_K^2}$: błąd czułości.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń błędu dla kilku przypadków pracy poziomomierza. Wartość liczby K została tak dobrana, że jednemu impulsowi zegarowemu odpowiada odległość 1 mm.

Tabela 4

| | | Fala ultradźwiękowa rozprzestrzeniona się w suchym powietrzu $t=20^{\circ}\text{C}$, $x_{\text{śr}} = 10^4 \text{ mm}$, $\Delta \tau = 7 \mu\text{s}$ | Fala ultradźwiękowa rozprzestrzeniona się w wodzie $t=20^{\circ}\text{C}$, $x_{\text{śr}} = 10^4 \text{ mm}$, $\Delta \tau = 0,5 \mu\text{s}$ |
|------------|---|---|---|
| Δ_0 | $L_K = 100 \text{ mm}$ ($K = 100$) | 2,3 mm | 1,5 mm |
| | $L_K = 1000 \text{ mm}$ ($K = 1000$) | 2,3 mm | 1,5 mm |
| δ | $L_K = 100 \text{ mm}$ ($K = 100$) | 1,3 % | 0,5 % |
| | $L_K = 1000 \text{ mm}$ ($K = 1000$) | 0,13 % | 0,05 % |

6. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynikają dobre właściwości metrologiczne, a co za tym idzie, szeroki zakres zastosowań poziomomierzy ultradźwiękowych. Wyniki obliczeń wskazują na możliwość osiągnięcia dużych dokładności pomiaru przy jednoczesnym stosowaniu długich odcinków korekcyjnych.

Z drugiej jednak strony należy pamiętać, że przytoczony model poziomomierza i zjawisk zachodzących w przestrzeni pomiarowej jest bardzo uproszczony, wobec czego należy spodziewać się, że w praktyce może wystąpić szereg dodatkowych zjawisk wpływających na zakres zastosowań i dokładność przyrządu. Z tego względu, jak również z braku wyraźnych różnic w wynikach obliczeń, trudno jest zdecydowanie ocenić, który sposób zamontowania przetworników ultradźwiękowych jest lepszy. Można jedynie sądzić, że wyższe dokładności będzie można osiągnąć, gdy przetworniki ultradźwiękowe zostaną zamontowane pod wodą.

Niniejsze opracowanie należy uważać zatem jako wstęp do skonstruowania i przeprowadzenia badań na prototypie poziomomierza ultradźwiękowego.

LITERATURA

- [1] Babikow O.I. : Kontrol urownja z pomoczcju ultrazwuka. Izd. Energija , 1971.
- [2] Kriczewskij A.G.: Wybór parametrów zondirujuszczich impulsow ultrazwukowych urownomerow. Pribory i sistemy uprawlenija, nr 7, 1975.
- [3] Tabin J. : Technika ultradźwiękowa w hutnictwie. Wyd.Górniczno-Hutnicze, Katowice 1958.
- [4] Dane wstępne do projektu koncepcyjnego poziomomierzy ultradźwiękowych. Opracowanie ZD IPPT "Techpan", Warszawa. Niepublikowane.
- [5] Instrumentation pour le parc de stockage et le pipeline. Aplikacja Lindquist - International SA.

ПРИМЕР СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УРОВНЕМЕРА

Резюме

Подано принцип действия, основные параметры и условия монтажа ультразвуковых уровнемеров. Проведено анализ ошибок измерения для выбранно решения уровнемера. Подано рекомендации по выбору постоянных конструкции уровнемера и методы уменьшения ошибок измерения.

THE EXAMPLE OF THE CONFIGURATION SOLUTION OF ULTRASONIC LEVELMETER

Summary

The prnciple of operation, the main parameters and the assembly conditions of the ultrasonic levelmeters are discussed in the paper. According to the example sclusion the measurement error is analised.

The conclusions dealing with the constructional parameters' selection and the measurement errors' reduction are presented.