

Винахід відноситься до гідроакустичних вимірювань і може бути використаний для вимірювання рівня рідин і глибин по фазі відбитих ультразвукових хвиль незалежно від щільності, в'язкості, температури або складу середовища, в якому поширюються хвилі.

Вимірювання рівня рідин в резервуарах, а також вимірювання морських глибин, як правило, здійснюють ультразвуковими хвилями (УЗХ), які відбиваються від границі розподілу рідина-повітря (при вимірюванні рівня рідин) або рідина-дно (при вимірюванні глибин). Різниця між ультразвуковими рівнемірами і глибиномірами лише конструктивна. При вимірюваннях рівня випромінювач і приймач УЗХ встановлюють на дні резервуара, а при вимірюваннях глибини - на кораблі. При цьому вимірюється час поширення УЗХ від випромінювача УЗХ до приймача УЗХ. Серед різних способів вимірювання часу поширення УЗХ найбільш високу точність забезпечують фазові методи, які дозволяють проводити відлік часу в частках довжини УЗХ, які поширюються з відомою швидкістю (див. Хамидуллин В.К. Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы.- Л.: Изд-во Ленингр. университета, 1989.- С. 159-163). Проте, часто швидкість поширення УЗХ в середовищі відома лише приблизно.

Відомий ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідин і глибин (див. Бабилов О.И. Контроль уровня с помощью ультразвука.- Л.: Энергия, 1971.- С. 67-69), який ґрунтується на випромінюванні в середовище УЗХ, прийнятті відбитих від границі розподілу середовищ УЗХ, порівнянні фази відбитих УЗХ з фазою УЗХ, що випромінюються, і визначенні рівня рідини або глибини h через різницю фаз УЗХ, що порівнюються, за формулою:

$$h = \frac{c}{4\pi f} \Delta\varphi,$$

де c - швидкість поширення УЗХ;

f - частота УЗХ;

$\Delta\varphi$ - різниця фаз УЗХ.

Якщо різниця фаз $\Delta\varphi$ УЗХ перевищує 2π , що має місце, коли довжина УЗХ $\lambda=c/f$ менше повного шляху проходження УЗХ, то виникає неоднозначність фазових вимірювань. При цьому можуть виникнути великі похибки, якщо заздалегідь невідомо приблизне значення рівня рідини або глибини чи швидкості поширення УЗХ.

Відомий ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідин і глибин (див. Бражников Н.И. Ультразвуковая фазометрия.- М.: Энергия, 1968.- С. 174-177), який ґрунтується на випромінюванні в середовище амплітудно-модульованих УЗХ, прийнятті відбитих від границі розподілу середовищ УЗХ, демодуляції прийнятого сигналу, порівнянні фази демодульованого сигналу з фазою сигналу, що модулює, і визначенні рівня рідини або глибини h за формулою:

$$h = \frac{c}{4\pi f} \Delta\varphi,$$

де c - швидкість поширення УЗХ;

F - частота сигналу, що модулює.

Для одержання однозначних результатів вимірювань частоту сигналу F , що модулює, вибирають досить низькою таким чином, щоб довжина хвилі цього сигналу $\lambda=c/F$ була менше повного шляху проходження УЗХ. Проте чутливість цього способу зменшується в число раз, яке дорівнює відношенню високої частоти f УЗХ до низької частоти F сигналу, що модулює. Тому точність вимірювання рівня рідини або глибини, особливо великих, залишається низькою.

Відомий також ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідин і глибин (див. Засоби вимірювання автоматичного зрівноважування / За ред. П.М. Таланчука.- К.: Либідь, 1997, с. 263-264), який ґрунтується на випромінюванні в середовище ультразвукових хвиль (УЗХ), прийнятті відбитих від границі розподілу середовищ УЗХ, порівнянні фази прийнятих УЗХ з фазою УЗХ, що випромінюються, за допомогою фазового детектора, зміні частот УЗХ, що порівнюються, і визначенні рівня рідини або глибини за формулою. Крім того, в відомому способі фіксують частоту, при якій спостерігають максимальне або мінімальне значення різниці фаз, змінюють цю частоту до досягнення повторного максимального чи мінімального значення різниці фаз, а рівень рідини або глибину h визначають за формулою:

$$h = \frac{c}{f_2 - f_1},$$

де c - швидкість поширення УЗХ;

f_1 і f_2 - частоти, що відповідають сусіднім максимумам або мінімумам.

Завдяки вимірюванням на двох частотах f_1 і f_2 виключається неоднозначність фазових вимірювань, а результат вимірювання не залежить від співвідношення рівня рідини або глибини h з довжиною УЗХ. Однак з розрахункової формули відомого способу видно, що рівень рідини або глибина h у формулі залежить від швидкості поширення УЗХ c , яка, в свою чергу, залежить від щільності, в'язкості, температури або складу середовища. Тому при вимірюванні рівня рідини або глибини середовища з невідомими або змінними параметрами можуть виникнути великі похибки. Крім того, перебудова частоти УЗХ в широкому діапазоні частот для визначення числа фазових циклів в 2π вносить неконтрольовані фазові зсуви через неідентичність фазових характеристик каналів фазовимірювального пристрою і нелінійність фазочастотної характеристики електроакустичного тракту, що веде до додаткових похибок вимірювання.

В основу винаходу покладена задача створення такого ультразвукового способу вимірювання рівня рідин і глибин, в якому шляхом введення нових операцій забезпечилося б підвищення точності вимірювання рівня рідин і глибин з невідомими щільністю, в'язкістю, температурою або складом.

Поставлена задача вирішується тим, що в ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідин і глибин,

який ґрунтується на випромінюванні в середовище ультразвукових хвиль (УЗХ), прийнятті відбитих від границі розподілу середовищ УЗХ, порівнянні фази прийнятих УЗХ з фазою УЗХ, що випромінюються, за допомогою фазового детектора, зміні частот УЗХ, що порівнюються, і визначенні рівня рідини або глибини за формулою, згідно з винаходом, після прийняття відбитих від границі розподілу середовищ УЗХ на першій акустичній базі l_1 змінюють частоту УЗХ, що порівнюються, до одержання нульового рівня сигналу на виході фазового детектора, вимірюють перше значення частоти f_1 приймають відбиті від границі розподілу середовищ УЗХ на другій акустичній базі l_2 , яку вибирають більше l_1 зменшують частоту УЗХ, що порівнюються, до відновлення нульового рівня сигналу фазового детектора, вимірюють друге значення частоти f_2 , а рівень рідини або глибину h визначають за формулою:

$$h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{f_2 l_2^2 - f_1 l_1^2}{f_1 - f_2}}.$$

Саме зміна частоти УЗХ після їх прийому на першій акустичній базі l_1 до одержання нульового рівня сигналу на виході фазового детектора, вимірювання цієї частоти f_1 , зміна частоти УЗХ після її прийому на другій акустичній базі l_2 , яку вибирають більше l_1 до відновлення нульового рівня сигналу фазового детектора, вимірювання цієї частоти f_2 , визначення рівня рідини або глибини за допомогою двох частот f_1 і f_2 з урахуванням двох значень акустичних баз l_1 і l_2 виключає вплив швидкості поширення УЗХ у середовищі на результат вимірювань і звужує діапазон перебудови частоти УЗХ, що підвищує точність вимірювання рівня рідини або глибини з невідомими щільністю, в'язкістю, температурою або складом.

На малюнку представлена функціональна схема, за допомогою якої здійснюється ультразвуковий спосіб вимірювання рівня рідини і глибини.

Схема містить генератор 1, підсилювач потужності 2, трьохелементний роздільно-сумісний п'єзоперетворювач 3, який включає дисковий випромінювач 4, перший кільцевий приймач 5 і другий кільцевий приймач 6, перемикач 7, підсилювач напруги 8, блок автоматичного регулювання підсилення (АРП) 9, фазовий детектор 10, нуль-орган 11 і цифровий частотомір 12.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Змінна напруга з виходу генератора 1 надходить через підсилювач потужності 2 на дисковий випромінювач 4 трьохелементного роздільно-сумісного п'єзоперетворювача 3. УЗХ поширюються в середовищі, що контролюється, до границі розподілу середовищ рідина-повітря або рідина-дно. Відбившись від границі розподілу середовищ, УЗХ надходять на перший і другий кільцеві приймачі 5 і 6 трьохелементного роздільно-сумісного п'єзоперетворювача 3. В зв'язку з тим, що відбиття від границі розподілу середовищ має дифузний характер, особливо від поверхні дна, відбиті УЗХ надходять на обидва кільцеві приймачі 5 і 6. Кільцеві приймачі 5 і 6 перетворюють прийняті УЗХ в електричну напругу.

Спочатку перемикач 7 підключає підсилювач напруги 8 з блоком АРП 9 до виходу кільцевого приймача 5. Підсилена і стабілізована по амплітуді напруга надходить на перший вхід фазового детектора 10, на другий вхід якого надходить напруга безпосередньо з виходу генератора 1. При акустичній базі l_1 між дисковим випромінювачем 4 і кільцевим приймачем 5 УЗХ проходять шлях

$$L_1 = h + \sqrt{h^2 + (l_1 / 2)^2}, \quad 1$$

де h - рівень рідини або глибина.

Довжина хвилі λ залежить від швидкості поширення УЗХ в середовищі, що контролюється, і від їх частоти:

$$\lambda = c / f \quad 2$$

де c - швидкість поширення УЗХ;

f - частота УЗХ.

Якщо довжина хвилі $\lambda > h$, то повну фазу прийнятих УЗХ можна представити у вигляді

$$\Phi_1 = 2\pi f \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + (l_1 / 2)^2}}{c} \right) = 2\pi(n_1 + \alpha_1), \quad 3$$

де $n_1 = [L_1 / \lambda]$ - ціле число фазових циклів у 2π ;

$\alpha_1 = \{L_1 / \lambda\}$ - дробова частина останнього фазового циклу.

В зв'язку з тим, що фазовий детектор реагує тільки на фазовий зсув в межах від 0 до 2π , його вихідний сигнал буде пропорційний дробовій частині повної фази Φ_1 згідно з формулою (3):

$$\Delta\Phi_1 = 2\pi\alpha_1 = 2\pi \left(f \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_1 / 2)^2}}{c} - n_1 \right). \quad 4$$

Частоту генератора 1 змінюють до одержання нульового показання нуль-органа 11 ($\Delta\Phi_1=0$). При цьому частота f_1 визначається рівністю

$$f_1 \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_1 / 2)^2}}{c} = n_1. \quad 5$$

Вимірюють перше значення частоти f_1 генератора 1 цифровим частотоміром 12. Потім перемикач 7 підключає підсилювач напруги 8 з блоком АРП 9 до виходу кільцевого приймача 6. Шлях, який проходять

УЗХ, зростає і приймає значення

$$L_2 = h + \sqrt{h^2 + (l_2 / 2)^2} > L_1. \quad 6$$

Згідно з формулою (3) повна фаза прийнятих УЗХ

$$\Phi_2 = 2\pi f_1 \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + (l_2 / 2)^2}}{c} \right) = 2\pi(n_2 + \alpha_2), \quad 7$$

де $n_2 = [L_2/\lambda]$ - ціле число фазових циклів у 2π ;

$\alpha_2 = \{L_2/\lambda\}$ - дробова частина останнього фазового циклу.

Різницю фаз, яка впливає на фазовий детектор 10, можна представити у вигляді

$$\Delta\Phi_2 = \Phi_1 - \Phi_2 = 2\pi f_1 \left(\frac{L_2 - L_1}{c} \right) + n_2 - n_1 \quad 8$$

Підставивши в формулу (8) вирази для L_1 і L_2 формул (1) і (6), одержимо:

$$\Delta\Phi_2 = 2\pi f_1 h \frac{\sqrt{1 - (l_2 / 2h)^2} - \sqrt{1 - (l_1 / 2h)^2}}{c} + n_2 - n_1. \quad 9$$

В зв'язку з тим, що відношення $l_2/2h$ і $l_1/2h$ набагато менше одиниці ($l_1, l_2 \ll 1$), без урахування членів другого порядку малості маємо:

$$\Delta\Phi_2 = 2\pi f_1 \frac{l_2^2 - l_1^2}{8hc} + n_2 - n_1. \quad 10$$

На початковій частоті f_1 різницю акустичних баз l_1 і l_2 вибирають такою, щоб внесена різниця фаз

$$\pi f_1 \frac{l_2^2 - l_1^2}{4hc} = \Delta\Phi_{\text{зад}} \leq \frac{\pi}{2}, \quad 11$$

де $\Delta\Phi_{\text{зад}}$ - значення заданої різниці фаз в діапазоні значень від 0 до $\pi/2$.

При виконанні умови формули (11) можна вважати, що при перемиканні кільцевих приймачів 5 і 6 ціле число фазових циклів у 2π не змінюється. Тому дробова частина повної фази на частоті f_1 при другому прийомі, як і у формулі (4), буде визначатися однаковим цілим числом $n_2 = n_1$:

$$\Delta\Phi_1 = 2\pi\alpha_2 = 2\pi \left(f_1 \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_2 / 2)^2}}{c} - n_1 \right). \quad 12$$

Частоту генератора 1 зменшують до відновлення нульового показання нуль-органа 11 ($\Delta\Phi_2 = 0$). Стале значення частоти f_2 визначається рівністю

$$f_2 \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_2 / 2)^2}}{c} = n_1. \quad 13$$

Прирівнюючи формули (5) і (13) між собою, одержимо:

$$f_1 \left(h + \sqrt{h^2 + (l_1 / 2)^2} \right) = f_2 \left(h + \sqrt{h^2 + (l_2 / 2)^2} \right). \quad 14$$

Після математичних перетворень маємо:

$$f_1 - f_2 = f_2 \left(1 + \sqrt{1 + (l_2 / 2)^2} \right) - f_1 \left(1 + \sqrt{1 + (l_1 / 2)^2} \right). \quad 15$$

Так як

$$l_1/2h \ll 1 \text{ і } l_2/2h \ll 1, \text{ то } \sqrt{1 + (l_1 / 2h)^2} \approx 1 + 0,5(l_1 / 2h)^2;$$

$$\sqrt{1 + (l_2 / 2h)^2} \approx 1 + 0,5(l_2 / 2h)^2$$

З урахуванням цих перетворень маємо:

$$2(f_1 - f_2) = \frac{f_2 l_2^2 - f_1 l_1^2}{8h^2}. \quad 16$$

Вирішивши формулу (16) щодо шуканого рівня рідини або глибини, остаточно отримаємо

$$h \frac{1}{4} \sqrt{\frac{f_2 l_2^2 - f_1 l_1^2}{f_1 - f_2}}. \quad 17$$

Як видно з формули (17), рівень рідини або глибина h не залежить від швидкості поширення УЗХ, а отже, від щільності, в'язкості, температури або складу середовища. Відносний діапазон перебудови частоти f для визначення рівня рідини або глибини за формулою (17) представимо у вигляді:

$$\varepsilon = \frac{f_1 - f_2}{f_1}. \quad 18$$

З урахуванням формули (16) маємо інший вираз для частоти:

$$f_2 = \frac{16h^2 + l_1^2}{16h^2 + l_2^2} f_1. \quad 19$$

З урахуванням формули (19) відносний діапазон перебудови частоти в формулі (18) приймає вигляд:

$$\varepsilon = 1 - \frac{16h^2 + l_1^2}{16h^2 + l_2^2} = \frac{l_2^2 - l_1^2}{16h^2 + l_2^2}. \quad 20$$

Так як в знаменнику формули (20) член $16h^2 \gg l_2^2$, то остаточно одержимо відносний діапазон перебудови частоти у відсотках:

$$\varepsilon = \frac{l_2^2 - l_1^2}{16h^2} 100\%. \quad 21$$

З формули (21) випливає, що чим менше різниця акустичних баз l_2 і l_1 тим менше діапазон перебудови частоти генератора 1 і тим менше похибка від неконтрольованих фазочастотних перетворень у фазовому детекторі 10 і в трьохелементному роздільно-сумісному п'єзоперетворювачі 3.

Приклад. Визначимо необхідний діапазон зміни частоти генератора при вимірюванні рівня рідини в резервуарі по запропонованому способу і способу-прототипу при наступних вихідних даних: рівень рідини $h = 1$ м, швидкість поширення УЗХ $\lambda = 1500$ м/с, початкове значення частоти генератора $f_1 = 15$ кГц.

Для зазначених параметрів довжина УЗХ $\lambda = c/f_1 = 0,1$ м, в зв'язку з чим виникає неоднозначність у результатах фазових вимірювань ($n = h/\lambda = 10$).

Виберемо першу акустичну базу такою, щоб вона дорівнювала довжині хвилі: $l_1 = \lambda = 0,1$ м. Другу акустичну базу l_2 визначимо за формулою (11). Для цього задамося фазовим зсувом $\Delta\varphi_{\text{зад}} = \pi/10$. Тоді з урахуванням значення акустичної бази l_1 одержимо:

За формулою (19) визначимо друге значення частоти генератора:

$$l_2 = \sqrt{\frac{4hc\Delta\varphi_{\text{зад}}}{\pi f_1} + l_1^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1\text{м} \cdot 1500\text{м/с} \cdot \pi/10}{\pi \cdot 15000\text{Гц}} + (0,1\text{м})^2} = 0,224\text{м}.$$

$$f_2 = \frac{16h^2 + l_1^2}{16h^2 + l_2^2} f_1 = \frac{16 \cdot (1\text{м})^2 + (0,1\text{м})^2}{16 \cdot (1\text{м})^2 + (0,224\text{м})^2} 15000\text{Гц} = 14963\text{Гц}.$$

Відносний діапазон зміни частоти у відсотках згідно з формулою (21):

$$\varepsilon_1 = \frac{l_2^2 - l_1^2}{16h^2} 100 = \frac{(0,224\text{м})^2 - (0,1\text{м})^2}{16 \cdot (1\text{м})^2} 100 = 0,25\%$$

В способі-прототипі друге значення частоти

$$f_2 = \frac{c}{h} + f_1 = \frac{1500\text{м/с}}{1\text{м}} + 15000\text{Гц} = 16500\text{Гц}.$$

Відносний діапазон зміни частоти

$$\varepsilon_2 = \frac{f_2 - f_1}{f_1} 100 = \frac{16500\text{Гц} - 15000\text{Гц}}{15000\text{Гц}} 100 = 10\%$$

Таким чином, у відомому способі для вимірювання рівня $h = 1$ м потрібно початкову частоту $f = 15$ кГц перебудувати на 1500 Гц, тобто на 10% . Згідно з запропонованим способом ту ж початкову частоту потрібно змінити лише на 37 Гц, тобто на $0,25\%$. Стиснення частотного діапазону досягнуто приблизно в 40 разів. Ще більшого стиснення можна досягти, якщо в запропонованому способі зменшити $\Delta\varphi_{\text{зад}}$ до значення порога чутливості фазового детектора. Так, поріг чутливості сучасних фазових детекторів складає приблизно $0,01 \dots 0,05^\circ$. Тому реально знизити відносний діапазон перебудови до $0,010 \dots 0,005\%$. При настільки малому діапазоні перебудови частоти УЗХ стає можливим застосування резонансних п'єзоелектричних перетворювачів для випромінювання і прийому УЗХ, а також вузькосмугових підсилювачів для посилення слабких відбитих сигналів. Звуження смуги проходження електроакустичного тракту зменшує вплив шумів і підвищує перешкодозахищеність від зовнішніх впливів.

Таким чином, підвищення точності вимірювання рівня рідин і глибин досягнуто за рахунок виключення впливу на результат вимірювання швидкості поширення УЗХ у середовищі, яке контролюється, і стисненням діапазону перебудови частоти УЗХ.



Fig.