

УДК 53.082.4+681.883.42

АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РЕЧОВИН В ПОВІТРІ НА ПРОСТОРОВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ БИТТЯХ

О. Й. РІШАН, канд. техн. наук

Одним із факторів ефективного функціонування будь-якої автоматизованої системи керування є наявність необхідних первинних вимірювальних перетворювачів технологічних параметрів, які забезпечують високі метрологічні характеристики, реалізуючи певний метод вимірювання.

Для вимірювання рівня рідин та сипучих матеріалів в повітрі широко використовується ультразвуковий ехо-локаційний метод [4]. В більшості звуколокаторів використовується випромінювання пакету ультразвукових коливань (імпульсне випромінювання), які служать засобом встановлення просторового контакту електроакустичного перетворювача з поверхнею контролюемого об'єкта. При вимірюванні рівня заповнення резервуарів рідинами або рівня завантаження бункерів сипучими матеріалами використовується схема одновимірного виміру відстані між двома точками, в одній із яких (базовій) розміщується приймально-випромінюючий акустичний блок, а в якості другої точки (її називають відбиваюча зона) використовується поверхня контролюємої за рівнем речовини (рідини чи сипучих матеріалів).

Така схема взаємного положення називається схемою ехо-локації: випромінювані ультразвукові коливання після відбивання від контролюємої поверхні повертаються до приймача. При реалізації методу має місце двонаправлене проходження вимірюємої відстані L_x пружкими хвилями. Відповідно інформація про відстань L_x до об'єкта (або рівень речовини) є часовим запізненням прийнятої відбитої хвилі відносно випроміненої:

$$T = 2L_x / C, \quad (1)$$

звідси

$$L_x = TC/2, \quad (2)$$

де C — швидкість розповсюдження ультразвукових коливань в повітрі.

Цей принцип використовується в усіх звукових вимірювачах відстані.

Можливість використання методу ехо-локації ґрунтується на теорії звуку Релея, у відповідності з якою інтенсивність звукових хвиль, що відбиваються від межі розподілу "повітря — речовина", залежить від акустичного опору кожного із середовищ, які знаходяться у взаємодії.

Коефіцієнт відбиття R при нормальному падінні звукової хвилі, що розповсюджується в повітрі, на поверхню розподілу з певною речовиною визначається як відношення інтенсивностей у відбитій та падаючій хвилях і може бути визначений із співвідношення:

$$R = \left(\frac{\rho_p C_p - \rho_n C_n}{\rho_p C_p + \rho_n C_n} \right)^2, \quad (3)$$

де $\rho_p C_p$ – акустичний опір речовини; $\rho_n C_n$ – акустичний опір повітря. Так як $\rho_p C_p$ для води, інших рідин та сипучих матеріалів складає практично на 3 порядки більшу величину, ніж для повітря (наприклад, $\rho C \left[\frac{\text{г}}{\text{с} \cdot \text{см}^2} \right]$ для повітря дорівнює 42, а для води – $149 \cdot 10^3$), то на межі розподілу “повітря – рідина чи сипучі матеріали” відбувається практично повне відбиття ультразвукової хвилі, що розповсюджується у повітрі, а коефіцієнт R практично дорівнює одиниці. Це явище і використовується в ультразвукових рівнемірах.

Дозволяюча властивість ехо-локаторів визначається, в першу чергу, частотою та формою випромінюваних хвиль, а також частотою пропускання смугових підсилювачів каналу приймання ехо-сигналу, способами опрацювання прийнятого сигналу та корекції на нестабільність швидкості звуку, рельєфом відбиваючої поверхні та її акустичним опором.

Основний недолік ехолотів, що ґрунтуються на такому методі, є їх відносно низька дозволяюча властивість. Багатьма публікаціями теоретично доведено, що дозволяюча властивість ехо-методу в повітрі не може бути меншою ніж ± 2 мм на частотах випромінювання в межах до 50 кГц. Використання більш високочастотних коливань у повітрі є проблематичним із-за значного зростання їх затухань. Основна абсолютна похибка ехолотів у повітрі складає не менше ± 6 мм.

Значне збільшення дозволяючої властивості при застосуванні ультразвукових методів для вимірювання відстані в повітрі можна отримати, використовуючи інтерференційні методи на стоячій ультразвуковій хвилі, яка утворюється в просторі між електроакустичним перетворювачем та контролюємою поверхнею за рахунок суперпозиції прямої та зворотної, відбитої від контрольованої поверхні, хвиль при безперервному озвучуванні поверхні, положення якої контролюється [2,3]. Можливість їх реалізації ґрунтується на тому ж великому значенні коефіцієнта відбиття R .

Амплітуда U_p та фаза сигналу на виході первинного вимірювального перетворювача, що реалізує метод на стоячій хвилі, змінюються в відповідності з виразом:

$$U_p = 2K_p P_{OP} |\cos(KH_p)| = U_0 |\cos K(h + n\lambda/2)| = U_0 |\cos Kh|, \quad (4)$$

де P_{OP} – амплітуда тиску в прямій та зворотній інтерферуючих хвилях; K_p – коефіцієнт перетворення приймача (його чутливість); K – хвильове число; H_p – відстань між площиною випромінювання-приймання ультразвукових хвиль електроакустичного перетворювача та відбиваючою поверхнею; n – ціле число полухвиль, що можуть бути розташовані на відстані H_p ; h – зміна відстані між випромінюючою та відбиваючою поверхнями в межах половини довжини стоячої хвилі, що визивається зміною рівня; U_0 – амплітудне значення сигналу на виході приймача при вибраному режимі випромінювання та $h = 0$.

Досліди показують, що при випромінюванні в описаному вище просторі відносно низьких ультразвукових коливань з частотою 17-18 кГц з утворенням стоячої хвилі і при використанні в якості вимірювальної інформації зміни амплітуди тиску в стоячій хвилі або зміни її фази досягається дозволяюча властивість при вимірюванні відхилення контрольованої поверхні від номінального (налаштованого у вихідному стані) її положення в межах 0,01 – 0,02 мм, тобто практично на два порядки вище, ніж у методу ультразвукової локації.

Недоліками таких методів є:

по-перше, їх відносно вузький діапазон вимірювання, який знаходиться в ме-

жах чвертї довжини випромінюємої ультразвукової хвилі і дорівнює на частотах 17-18 кГц ≈ 4 мм;

по-друге, необхідність використання прецизійних підсилювачів та вимірювачів фази стоячої хвилі або її амплітуди на приймачі;

по-третє, статична характеристика перетворення таких первинних вимірних перетворювачів має вигляд синусоїди або косінусоїди в залежності від їх налаштування, і відповідно виникає питання необхідності її лінеаризації.

Найбільш перспективним із ультразвукових інтерференційних методів для вимірювання рівня з високою дозволяючою властивістю є метод контролю положення поверхні розділу "повітря – речовина" з використанням просторових акустичних биттів, які утворюються в просторі між поверхнею "випромінювання – прийому" ультразвукового перетворювача та контрольованою поверхнею [1]. Фактично метод ґрунтується на використанні в просторі вимірювання явища суперпозиції двох стоячих хвиль. Метод має таку ж високу дозволяючу властивість, що притаманна інтерференційним методам на стоячій хвилі, але дозволяє суттєво спростити опрацювання інформативного сигналу, використовуючи цифрову його обробку.

При реалізації методу поверхня контрольованої по рівню речовини озвучується в безперервному режимі одночасно двома близькими по частоті F_1 та F_2 (наприклад, в межах тих же 17 – 18 кГц) ультразвуковими коливаннями з утворенням просторових биттів між поверхнею речовини та площиною "випромінювання – прийому" блоку ультразвукових перетворювачів, причому вихідну відстань $H_{\text{вих}}$ між останніми визначають за формулою:

$$H_{\text{вих}} = \frac{L}{m}, \quad (5)$$

де $L = \frac{2\pi}{K_1 - K_2}$ – довжина періоду просторових биттів; K_1 та K_2 – хвильові

числа компонент озвучуючих ультразвукових коливань; $m \leq \frac{L}{H_0}$ – ціле позитивне

число, кратне кількості $H_{\text{вих}}$, які вміщуються на відстані L ;

$H_0 = \frac{D_v + 2(D_p + \delta)}{4 \operatorname{tg} \alpha}$ – мінімально можлива відстань між контрольованою по-

верхнею і площиною "випромінювання – прийому" блоку ультразвукових перетворювачів; D_v та D_p – діаметри випромінюючого та приймаючого перетворювачів; δ – відстань акустичної розв'язки між останніми; α – кут розходження випромінювання.

Випромінювання двох частот F_1 та F_2 здійснюється одним випромінювачем, який використовується одночасно і як випромінювач коливань, і як їх змішувач.

Суттєвим є те, що на відстані, дещо більшій ніж $H_{\text{вих}}$, тобто в бік $H = L/(m - 1)$, частота вихідного сигналу приймача відповідає тільки одному значенню F_1 або F_2 і не змінюється в межах

$$L/m < H < L/(m - 1). \quad (6)$$

Аналогічне явище відбувається на відстані, дещо меншій в бік $H = L/(m + 1)$, коли частота сигналу приймача відповідає частоті F_2 або F_1 в межах

$$L/(m + 1) < H < L/m. \quad (7)$$

На відстані, що дорівнює $H_{\text{вих}}$ по формулі (5), на приймачі відбувається безперервна зміна частоти F_1 на F_2 і навпаки. Це явище, що виникає на відстанях, кратних вузлу просторової огинаючої, і використовується для отримання інформації про знаходження блоку ультразвукових перетворювачів на відстані $H_{\text{вих}}$ від контрольованої за рівнем поверхні за допомогою дискретної схеми визначення різниці частот F_1 та F_2 .

При реалізації способу блок ультразвукових перетворювачів за допомогою мікропроцесорного електронного блоку та механічного вузла з кроковим електродвигуном виводиться на відстань $H_{\text{вих}}$. Із зміною цієї відстані, що спричиняється зміною рівня речовини, за рахунок відповідного переміщення блоку ультразвукових перетворювачів значення відстані $H_{\text{вих}}$ знову поновлюється, тобто відстань $H_{\text{вих}}$ підтримується незмінною. При такому відслідковуванні положення контрольованої поверхні по кількості відпрацьованих кроковим електродвигуном імпульсів визначають рівень речовини.

Відстань $H_{\text{вих}}$ при вибраному числі m із залежності (5) визначається тільки довжиною періоду L огинаючої просторових биттів і залежить від різниці хвильових чисел K_1 та K_2 . Так як випромінювання та приймання обох ультразвукових коливань виконується одним випромінювачем та одним приймачем, тобто випромінювання та приймання обох коливань відбувається в одному акустичному тракті, то прирости хвильових чисел (останні пов'язані з дестабілізуючими факторами, що впливають на довжину ультразвукової хвилі в акустичному тракті) за рахунок їх віднімання взаємно компенсуються і відповідно довжина просторової огинаючої практично не змінюється, що і підвищує точність вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акустические методы измерения расстояний и управления / Горбатов А. А. и др. — М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. А.с. № 994911. Способ ультразвукового контроля движущихся изделий / Ришан А.И. и др. // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 5.
3. А.с. № 1397730. Ультразвуковой интерферометрический толщиномер / Ришан А.И. // Открытия. Изобретения. — 1988. — № 18.
4. А.с. № 1520332. Способ ультразвукового измерения толщины движущейся листочной заготовки и устройство для его осуществления / Ришан А.И. // Открытия. Изобретения. — 1989. — № 41.