

А. В.РЯБІЧЕНКО, Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р техн. наук, СНУ ім.В.Даля

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РІВНЕМІРА РІДИНИ З КОМПЕНСУЮЧИМ ВХІДНИМ СИГНАЛОМ

Пропонується новий принцип роботи ультразвукового рівнеміра, який заснований на адаптивному зрівноваженні вхідного сигналу. Приведені математичні моделі такого рівнеміра і результати його теоретичних та експериментальних досліджень. Показано, що статичні характеристики ультразвукового рівнеміра з компенсуючим вхідним сигналом є квадратичними. Даються рекомендації щодо зменшення зони нечутливості рівнеміра та підвищення точності контролю.

The new principle of operation of the ultrasonic liquid level meter, which is based on an adaptive equilibration of an input signal is offered. The mathematical models of this liquid level meter and the results its theoretical and experimental researches are given. It is shown, that static performances of a ultrasonic liquid level meter with a compensating input signal are quadratic. The recommendations on diminution of a dead band of a liquid level meter and increase of precision of the check are given.

Ультразвукові рівнеміри (УЗР) рідин знаходять все ширше використання в промисловості через свою високу надійність і точність вимірювання. Але в таких областях промисловості як хімічній і нафтовій, в яких необхідно вимірювати рівень рідин з достатньо високою точністю, у технологічних апаратах під тиском, високих температурах, при зміні складу газового середовища ультразвукові рівнеміри мають достатньо великі додаткові похибки вимірювання, котрі обумовлені різними впливаючими факторами. З метою зменшення цих похибок у сучасних рівнемірах використовуються різні методи. Тому підвищення точності контролю рівня хімічно складних і легколетких речовин є актуальною задачею.

Метою роботи є дослідження ультразвукового методу, який дозволить зменшити похибки вимірювання і тим самим підвищити точність вимірювання рівня складних рідин, а також зменшити зону нечутливості.

Відомо [1, 2], що робота більшості сучасних УЗР полягає у вимірюванні часу $\Theta = 2t_p$, де t_p час, за який випромінюваний сигнал досягає поверхні рідини. Час t_p залежить від фізико-хімічних параметрів газового середовища, через яке розповсюджуються ультразвукові коливання (УЗК), що викликає значні додаткові похибки вимірювання.

У даній роботі розглядається новий принцип вимірювання рівня, в якому вимірюється амплітуда електричного імпульсу, який збуджує УЗК, при зрівноваженні електрорушійних сил (ЕРС), котрі індукуються п'єзоелектричним перетворювачем (ПЕП), при відбитті УЗК від механічного репера (пластини) та поверхні вимірювального середовища. Ультразвуковий

сигнал (УЗС) E_{OP} , який подається на реперну пластину, має однакову частоту f та амплітуду E_{OP} незалежно від вимірюваного рівня. Відбитий від реперної пластини та сприйнятий п'єзоелементом УЗС e_p залежить від фізико-хімічних параметрів газового середовища. Сигнал e_p можна описати наступним рівнянням [2]

$$e_p = E_p \left\{ \left[\frac{1 - \exp(-\alpha_{1p}n|2J_p/c-t|)}{\cos(\omega n(2J_p/c-t))} \right] (1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n|2J_p/c-t|)) \right\}, \quad (1)$$

де E_p - амплітуда електричного сигналу, який збуджує УЗК для подачі його на репер; J_p - відстань від ПЕП до репера; α_{1p} - ступінь загасання УЗС у газовому середовищі на відстані J_p ; c - швидкість розповсюдження УЗК у газі; t - поточний час розповсюдження УЗК; k_0 - стала; ω - частота власних коливань ПЕП; n - поправочний коефіцієнт, який залежить від властивостей п'єзоелемента (для випромінюючого УЗС $n=10-30$, а для відбитого $n=5-10$).

ЕРС e_L , яка створюється ПЕП при сприйнятті відбитого від поверхні рідини УЗС, описується таким рівнянням:

$$e_L = E_L \left\{ \left[\frac{1 - \exp(-\alpha_{1L}n|2J_L/c-t|)}{\cos(\omega n(2J_L/c-t))} \right] (1 - k_0 \exp(-\alpha_{1L}n|2J_L/c-t|)) \right\} * \left[\exp(-\alpha_2 n|2J_L/c-t|) \right], \quad (2)$$

де E_L - амплітуда електричного сигналу, який збуджує УЗК для подачі його на поверхню рідини; J_L - відстань від ПЕП до поверхні рідини; α_{1L} - ступінь загасання УЗ сигналу в газовому середовищі на відстані J_L ; α_2 - ступінь загасання УЗК в рідині.

У режимі компенсації незалежно від відстані J_L виконується рівність: $e_L = e_p$ або $e_L / e_p = 1$. У рівняння (1) уведемо наступні позначення:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 - \exp(-\alpha_{1p}n(2J_p/c-t)), & A_2 &= 1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n(2J_p/c-t)), \\ A_3 &= \cos(\omega n(2J_p/c-t)), & B_1 &= 1 - \exp(-\alpha_{1L}n(2J_L/c-t)), \\ B_2 &= 1 - k_0 \exp(-\alpha_{1p}n(2J_L/c-t)), & B_3 &= \cos(\omega n(2J_L/c-t)), \\ B_4 &= 1 - \exp(\alpha_2 n(2J_L/c-t)). \end{aligned}$$

Розкладемо ці рівняння в ряд Маклорена та обмежимося тільки їх лінійною частиною. У результаті маємо:

$$\begin{aligned} A_1 &= \alpha_{1p}n(2J_p/c-t), & A_2 &= \alpha_{1p}n(2J_p/c-t), & A_3 &= 1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c-t)^2, \\ B_1 &= \alpha_{1L}n(2J_L/c-t), & B_2 &= \alpha_{1L}n(2J_L/c-t), & B_3 &= 1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c-t)^2, \end{aligned}$$

$B_4 = 1 - \alpha_2 n(2J_L/c-t)$. Приймаючи, що $t=0$, знайдемо такі відношення:

$$D_1 = \frac{A_1}{B_1} = \frac{\alpha_{1p}J_p}{\alpha_{1L}J_L}, \quad D_2 = \frac{A_2}{B_2} = \frac{\alpha_{1p}J_p}{\alpha_{1L}J_L}, \quad D_3 = \frac{A_3}{B_3} = \frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L/c)^2}.$$

З врахуванням цього отримуємо наступну формулу для визначення робочого збуджуючого електричного сигналу в такій формі

$$E_L = E_p \left(\frac{\alpha_{1L}J_L}{\alpha_{1p}J_p} \right)^2 \left\{ \frac{1}{(1 - 2\alpha_2 nJ_L/c)} \left[\frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L/c)^2} \right] \right\}. \quad (3)$$

Якщо множник у фігурних дужках мало впливає на характер залежності

$$E_L = f(J_L), \quad \text{то позначивши} \quad N = \frac{1}{(1 - 2\alpha_2 nJ_L/c)} \cdot \left[\frac{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_p/c)^2}{1 - 0,5\omega^2 n^2 (2J_L/c)^2} \right],$$

одержуємо наступне рівняння статичної характеристики рівнеміра

$$E_L = E_p (\alpha_{1L} N / \alpha_{1p} J_p^2) J_L^2. \quad (4)$$

Так як відстань J_p від поверхні п'єзоелемента до реперної пластини і збуджуючий електричний сигнал E_p , який подається на цю пластину, є фіксованими величинами, то їх відношення являтиме собою деяку сталу, яка залежатиме тільки від фізико-хімічних параметрів газового середовища. Якщо прийняти, що множник у круглих дужках рівняння (4) є сталою величиною, яка характеризує чутливість перетворення, то залежність $E_L = f(J_L)$ матиме квадратичну форму. Практично ступінь поглинання УЗК газом залежить як від частоти УЗК, так і від таких параметрів як температура, тиску, концентрації компонентів газового середовища тощо. Тому залежність $E_L = f(J_L)$ тим більше відхиляється від квадратичної, чим більший коефіцієнт поглинання УЗК. При великих значеннях коефіцієнта поглинання може наступити режим повного поглинання, при якому УЗК повністю поглинаються газом і не досягають п'єзоелемента після їх відбиття від поверхні рідини, або навіть не доходять до цієї поверхні.

Якщо поглинання УЗК підпорядковується закону Бугера-Бера, то

$$I_{IP} = I_{OP} \exp(-k_{\Gamma} J_p), \quad (5)$$

де k_{Γ} - коефіцієнт поглинання УЗК газовим середовищем.

Зменшення амплітуди УЗК обумовлюється поглинанням енергії газовим середовищем на відстані J_L і може бути описане таким рівнянням

$$I_{IL} = I_{OL} \exp(-k_{\Gamma} J_L), \quad (6)$$

Ступінь загасання УЗС газом на відстані J_p дорівнює

$$\alpha_{1p} = I_{IP} / I_{OP} = \exp(-k_{\Gamma} J_p), \quad (7)$$

а ступінь загасання на відстані J_L

$$\alpha_{1L} = I_{1L} / I_{0L} = \exp(-k_{\Gamma} J_L). \quad (8)$$

Відношення

$$\alpha_{1L} / \alpha_{1P} = \exp[-k_{\Gamma}(J_L - J_P)]. \quad (9)$$

Підставимо рівняння (9) у (4). У результаті одержуємо

$$E_L = E_P \left(N / J_P^2 \right) J_L^2 \exp[-k_{\Gamma} J_L (1 - J_P / J_L)]. \quad (10)$$

Рівняння (10) є математичною моделлю ультразвукового рівнеміра з компенсацією вхідного сигналу.

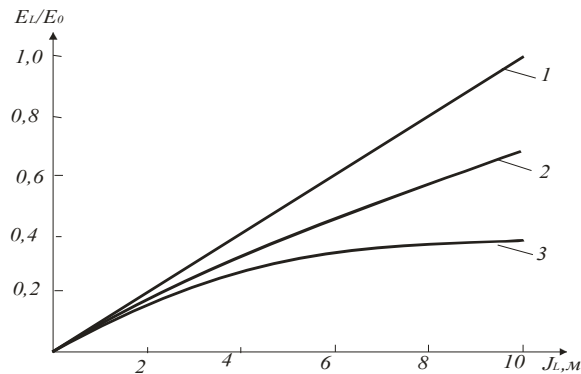


Рис. 1. Статична характеристика рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня для коефіцієнтів поглинання: 1 - $k_{\Gamma} = 0.0015$; 2 - $k_{\Gamma} = 0.01$; 3 - $k_{\Gamma} = 0.03$

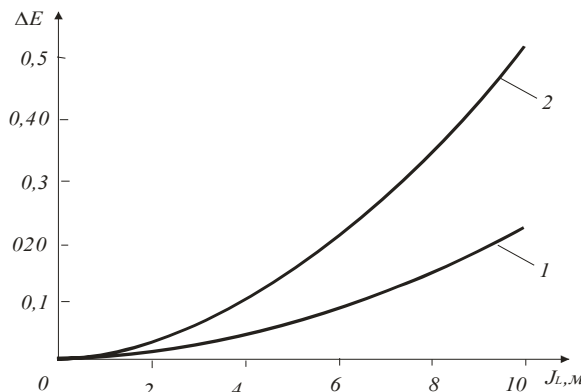


Рис. 2. Відхилення статичних характеристик рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня від лінійної для коефіцієнтів поглинання: 1 - $k_{\Gamma} = 0.01$; 2 - $k_{\Gamma} = 0.03$

Якщо коефіцієнт поглинання УЗК незначний, то статична характеристика приладу практично має квадратичну форму так як параметр N близький до одиниці в широких межах вимірювання рівня. На рис. 1 приведена ця залежність з блоком вилучення квадратного кореня. Дослідження показали, що відхилення теоретичної характеристики від експериментальної незначні і не перевищують 0,35 % від максимальної відстані, якщо газовим середовищем є повітря.

Якщо рівнемір з компенсуючим вхідним сигналом має блок вилучення квадратного кореня, то рівняння (10) приймає таку форму

$$E_L = J_L \sqrt{E_P \left(\frac{N}{J_P^2} \right) \exp \left[-k_{\Gamma} J_L \left(1 - \frac{J_P}{J_L} \right) \right]}. \quad (11)$$

Рівняння (11) показує, що відхилення від нелінійності викликати тільки підкореневий вираз. На рис. 2 показані залежності $E_L = f(J_L)$ для різних коефіцієнтів поглинання. З рис. 2 видно, що збільшення коефіцієнта поглинання УЗК газовим середовищем суттєво зменшує чутливість перетворення, а відповідно збільшує як мультиплікативну, так і нелінійні складові похибки вимірювання.

Висновки. Новий принцип вимірювання рівня рідини полягає у вимірюванні амплітуда електричного імпульсу, який збуджує УЗК, при наявності зрівноваження ЕРС, котрі індукуються ПЕП. При такому способі вимірювання час розповсюдження УЗК може використовуватися для компенсації впливу фізико-хімічних параметрів газового середовища.

Статична характеристика УЗР з компенсуючим вхідним сигналом є нелінійною, яка в основному обумовлюється фізико-хімічними параметрами газового середовища. Збільшення коефіцієнта поглинання газовим середовищем приводить до значного зростання мультиплікативної та нелінійних складових похибок вимірювання, а також до зменшення діапазону вимірювання.

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень можуть бути покладені в основу розробки методів підвищення точності вимірювання рівня ультразвуковим методом.

Література: 1. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичне моделювання ультразвукових рівномірів на основі теорії реологічних переходів. Матеріали другої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції „Актуальні проблеми сучасної науки”. – Київ: 2006. – с.78-81.2. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Теоретичні та експериментальні дослідження ультразвукових пьезоелектричних перетворювачів рівня рідин. Матеріали другої Міжнародної науково-практичної конференції „Розвиток наукових досліджень 2006”. – Полтава: 2006. – с.61-63.3. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. – Міжнародний НТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький. №2. – 2006, с. 55 – 58. 4.Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.