

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

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ РІВНЕМІРІВ

Розглядаються фактори, які впливають на вихідні й вхідні сигнали п'єзоелектричних перетворювачів. Приводиться структурна схема зовнішніх і внутрішніх впливаючих факторів, а також математичні моделі для похибок вимірювання рівня, які обумовлені цими факторами. Теоретичними та експериментальними дослідженнями показано вплив цих факторів на статичні характеристики ультразвукових рівнемірів рідин.

The factors, which influence on input and output signals of piezoelectric transducers are observed. The block diagram of external and internal influencing factors is shown. The mathematical models for lapses of measurement of a level, which are caused by these factors is given. The agency of these factors on static characteristics of ultrasonic level meter of liquids is shown by theoretical and experimental researches.

Підвищення точності й розширення діапазону вимірювання ультразвукових рівнемірів (УЗР) є однією з основних актуальних задач. Далеко не повністю вивчені всі фактори, які впливають на процеси перетворення в УЗР і викликають похибки вимірювання. Структурно процес вимірювання рівня рідини УЗР можна зобразити так, як показано на рис. 1, де: 1 – джерело живлення й схема вимірювання; 2 – п'єзокерамічний перетворювач (ПКП); 3 – газове середовище; 4 – рідина; U - напруга живлення; Π - параметри електричної вимірювальної схеми; E_i - вхідний електричний імпульс ПКП; $e(L)$ - вихідний електричний сигнал ПКП, який залежить від рівня рідини L ; C, R - ємність та опір ПКП; T - температура навколишнього середовища; T_g - температура газового середовища; T_p - температура рідини; ρ_g, μ_g, φ - густина, вязкість і вологість газового середовища; ρ_p, μ_p, n - густина, вязкість і коефіцієнт розсіяння УЗК відповідно; P - тиск газової суміші.

До основних впливаючих факторів віднесемо такі: вхідний електричний імпульс E_i , температури - T, T_g і T_p ; коефіцієнт поглинання УЗК в газовому середовищі, а також коефіцієнт поглинання УЗК в рідині. Як показано в [1], динамічна модель УЗК, які направляються до поверхні рідини, описується таким рівнянням

$$y_1(j) = \frac{2DS\Pi}{CRP} \exp(-\alpha j) \{1 - X_0 \exp(-\alpha_2 t) [\cos(\omega t)]\}, \quad (1)$$

де $y_1(J)$ - поточне значення амплітуди УЗК на відстані J від ПКП; D - жорсткість п'єзоелемента; S - його площа; Π - периметр пластини; C, R - ємність та активний опір ПКП; P - потужність розсіювання п'єзоелемента; α - коефіцієнт поглинання УЗК в газовому середовищі; X_0 - відносне значення амплітуди вихідного сигналу ПКП до амплітуди вхідного сигналу; $\alpha_2 = \beta/2m$ - коефіцієнт загасання УЗК; β - коефіцієнт тертя; m - маса пластини ПКП; t - тривалість імпульсу УЗК; $\omega = \sqrt{D/m}$ частота власних коливань ПКП.

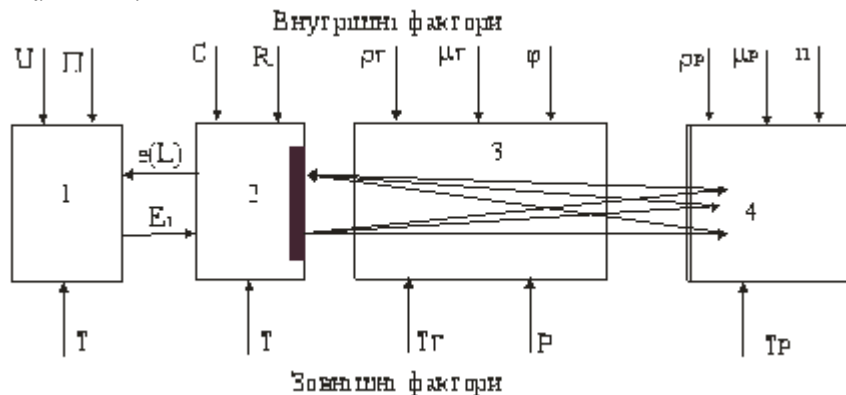


Рис. 1. Структурна схема вимірювання УЗР і фактори, які впливають на процес перетворень

Рівняння (1) можна записати таким чином

$$y_1(J) = Y_0(t) \exp(-\alpha J), \quad (2)$$

де $Y_0(t) = \frac{2DS\Pi}{CRP} \{1 - X_0 \exp(-\alpha_2 t) [\cos(\omega t)]\}$ - поточне значення амплітуди сигналу ПКП, який формується на його виході.

Сигнал $Y_0(t)$ практично не залежить від зовнішніх впливаючих факторів і визначається властивостями ПКП. Основним параметром, який викликає похибки вимірювання, є коефіцієнт загасання α , який для газового середовища залежить від ультразвукового тиску $P_{УЗК}$, тиску в апараті P та відстані J розповсюдження коливань. У першому наближенні можна записати, що $\alpha = P_{УЗК}/D_c$ де D_c жорсткість газового середовища. З врахуванням того, що ультразвуковий тиск $P_{УЗК} = \rho c V_m$, де ρ - густина газу; c - швидкість УЗК в газовому середовищі; V_m - максимальна коливальна швидкість частинок газу, а швидкість УЗК $c = \sqrt{\nu RT}$, де ν - показник

адіабати; R - універсальна газова стала; T - температура газу. Приймаючи до уваги те, що густина газу $\rho = MP/848ZT$ [2], де M - молекулярна вага газу, Z - стала, рівняння для коефіцієнта загасання УЗК приймає вигляд

$$\alpha = \frac{MPV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{\nu R}{T}}. \quad (3)$$

Підставивши рівняння (3) в (2), одержуємо

$$y_1(J) = Y_0(t) \exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right). \quad (4)$$

З рівняння (4) видно, що основний вплив на зменшення амплітуди УЗК при їх проходженні в газовому середовищі чинить тиск газу P , температура T і склад газового середовища так як молекулярна вага газової суміші

$$M_c = \frac{M_1 \rho_1 + M_2 \rho_2 + \dots + M_n \rho_n}{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n},$$

де M_1, M_2, \dots, M_n - молекулярна вага n компонентів газової суміші; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ - їх густина.

Після досягнення поверхні рідини потужність УЗК з амплітудою $y_1(J)$ частково відбивається від поверхні й повертається до ПКП, а частина проникає в рідину і там поглинається. Тому можна записати, що $y_1(J) = y_2(J) + y_3(z)$, де $y_2(J)$ - амплітуда, з якою УЗК повертаються до ПКП; $y_3(z)$ - амплітуда, з якою УЗК поглинається рідиною на відстані z . Амплітуда проходження УЗК через рідину товщиною z описується наступним рівнянням [3]

$$y_3(z) = y_1(J) \exp(-\alpha_p z), \quad (5)$$

де $\alpha_p = A f^2$ - коефіцієнт поглинання; $A = \frac{8\pi^2 \mu_p}{3\rho_p c_p^3}$ - стала поглинання;

μ_p, ρ_p - динамічна в'язкість і густина рідини; $c_p = \sqrt{S\gamma/\rho_p}$ - швидкість розповсюдження УЗК у рідині; S - модуль стискуваності рідини; γ - показник адіабати.

З врахуванням сказаного рівняння (5) приймає наступну форму

$$y_3(z) = y_1(J) \exp\left(-\frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} z\right). \quad (6)$$

Амплітуда, з якою УЗК повертається до ПКП,

$$y_2(J) = y_1(J) - y_3(z) = y_1(J) \left[1 - \exp\left(-\frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} z\right)\right],$$

або, підставляючи рівняння (4), одержуємо

$$y_2(J) = Y_0(t) \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} z\right)\right]. \quad (7)$$

Як показано в [4], звукова енергія, яка поглинається рідиною при переході від одного середовища в інше, описується наступним рівнянням

$$W = W_0 \left(\frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p}\right)^2, \quad (8)$$

де W_0 - енергія, яка приходить до границі розділу середовищ; ρ_r, c_r - густина та швидкість розповсюдження УЗК у газовому середовищі;

густина та швидкість розповсюдження УЗК у рідинному середовищі.

Приймаючи до уваги, що відношення енергій W/W_0 дорівнює відношенню амплітуд $z/y_1(J)$, то використовуючи рівняння (6) і (7), маємо

$$z = Y_0(t) \left(\frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right). \quad (9)$$

Підставивши рівняння (9) у (7), отримуємо математичну модель для амплітуди УЗК, що сприймається ПКП у такому вигляді

$$y_2(J) = Y_0(t) \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right) \left[1 - \exp\left(-Y_0(t) \frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} * \left(\frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right)\right)\right]. \quad (10)$$

Приймаючи до уваги, що в момент приходу відбитого сигналу $y_2(J)$ ПКП знаходився в початковому стані, то електрорушійна сила на його виході дорівнюватиме $e(t) = y_2(J) \exp(-\alpha_2 t) \sin(\omega t)$. З врахуванням (10) отримуємо розгорнуту математичну модель для УЗР у такій формі

$$e(t, J) = Y_0(t) \sin(\omega t) \exp\left[-\left(\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J + \alpha_2 t\right)\right] \left[1 - \exp\left(-Y_0(t) \frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} * \left(\frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right)\right)\right]. \quad (11)$$

Якщо проінтегрувати рівняння (11) за часом t , то після деякого спрощення рівняння статичної характеристики рівнеміра приймає вигляд:

$$\Delta E(J) = E_0 \frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J - E_0 \frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} \left[1 - \left(\frac{\rho_r c_r - \rho_p c_p}{\rho_r c_r + \rho_p c_p}\right)^2\right] * \exp\left(-\frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J\right), \quad (12)$$

де E_0 - вхідний електричний імпульс ПКП.

Як видно з рівняння (12), статична характеристика рівнеміра в загальному вигляді є нелінійною. Для рідин з високою густиною, коли $\rho_r c_r \ll \rho_p c_p$ другим членом рівняння (12) можна знехтувати. Для такого випадку маємо

$$\Delta E(J) = E_0 \frac{M_c PV_m}{848ZD_c} \sqrt{\frac{vR}{T}} J. \quad (13)$$

Рівняння (13) підтверджується експериментальними дослідженнями. Установлено, що при вимірюванні рівня рідин з малою густиною та в'язкістю значно погіршується точність вимірювання за рахунок збільшення нелінійності градуовальної характеристики рівнеміра. Значна нелінійність спостерігається й при малих відстанях до поверхні рідини. На рис. 2 показані експериментальна та теоретична статичні характеристики УЗР.

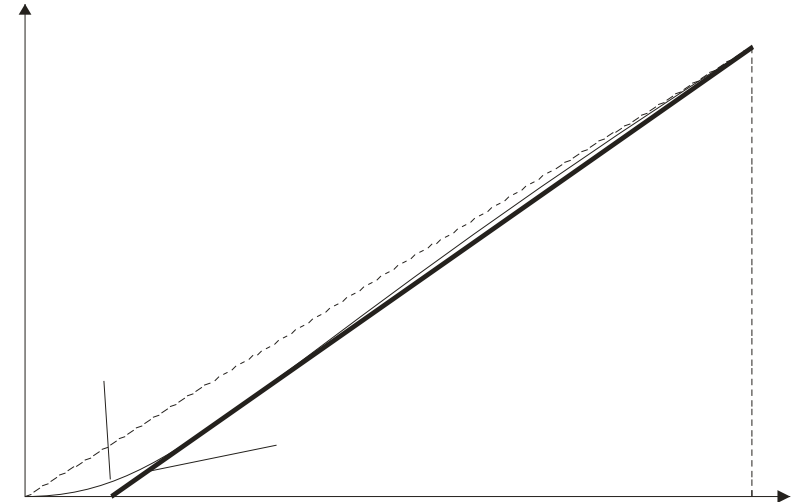


Рис. 2. Теоретична та експериментальна статичні характеристики ультразвукового рівнеміра

Відхилення статичної характеристики від прямої 1 залежить від фізичних параметрів рідини та умов експлуатації рівнеміра (тиску, температури та складу рідинного середовища). Для нормальних умов експлуатації при великих густинах рідини статична характеристика рівнеміра співпадає з прямою 1.

Якщо в рівнянні (12) обмежитися тільки лінійною складовою експоненціальної функції, то коефіцієнт передачі приладу описуватиметься таким рівнянням

$$K = K_0 \left\{ 1 - \frac{8\pi^2 \mu_p f^2 \sqrt{\rho_p}}{3(S\gamma)^{3/2}} \left[1 - \frac{\rho_g c_g - \rho_p c_p}{\rho_g c_g + \rho_p c_p} \right] \right\}. \quad (14)$$

де $K_0 = \frac{M_c P V_m}{848 Z D_c} \sqrt{\frac{\nu R}{N}}$ - коефіцієнт передачі ідеальної статичної характеристики рівнеміра.

З рівняння (14) видно, що коефіцієнт передачі ультразвукового рівнеміра являє собою функцію багатьох змінних, котрі можуть викликати похибки вимірювання.

Висновки. На процес перетворення в ультразвукових рівнемірах впливають різноманітні внутрішні та зовнішні фактори. До основних впливаючих факторів відноситься тиск, температура та хімічний склад газового середовища, через яке розповсюджуються ультразвукові коливання. Отримані математичні моделі для описання похибок вимірювання, обумовлених цим впливом. Теоретично та експериментально показано, що найбільші похибки вимірювання виникають за рахунок зміни температури і тиску газового середовища. Виконано дослідження впливу фізико-хімічних параметрів рідини на точність вимірювання її рівня. Показано, що зменшення густини та вязкості рідини призводить до появи додаткових похибок вимірювання, які обумовлені збільшенням енергії поглинання ультразвукових коливань.

Література: 1. Стенцель Й.І., Томсон А.В. Електродеформаційні процеси в п'єзоелектричних перетворювачах. В сб. „ Системы контроля и управления технологическими процессами. – Луганск: Світлиця, 2006. – С. 144-150. 2. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: Гос. науч. техн. изд-во хим. литературы, 1961. – 820 с. 3. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. – Л.: Химия, 1986. – 432 с. 4. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.