де E - енергія переносу; В - інтенсивність переносу енергії; v - швидкість переносу; τ_j^j - j - і сталі часу переносу імпульсу енергії; z - напрямок переносу.

Використовуючи метод нульового градієнта [2] для аналітичного рішення рівняння (18), отримуємо рівняння для руху мембрани в такій формі:

$$z(\theta) = Z_0 \exp(-\alpha L)\{[\exp(-\alpha_2|\Omega-\theta|)(1-y(t))]\}\cos(\omega\theta)\cdot\exp(\alpha_1|\Omega-t|),$$

де Z_0 - максимальна амплітуда коливань; $\alpha = Af^2$ - коефіцієнт зменшення амплітуди коливань, 1/м; L - відстань розповсюдження коливань, м; α_1 - коефіцієнт загасання енергії в залежності від фізичних властивостей середовища; α_2 - коефіцієнт загасання коливань в залежності від фізичних властивостей мембрани; Ω - час загасання енергії коливань; $y(t)$ - переміщення мембрани під дією збуджуючого імпульсу.

Висновки. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що при дії на хлопаючі мембрани ступіньчастих збуджуючих імпульсів їх рух складається з двох складових. Першою складовою є рух мембрани від початкого значення до деякого іншого сталого положення, яке може бути обмеженим на деякій відстані $y(t)$, або не обмеженим, коли мембрана переміщається на максимально можливу відстань, а другою складовою руху є загасаючий коливальний процес мембрани, який залежить від частоти її власних коливань і фізичних параметрів оточуючого середовища.

На основі теорії реологічних переходів і методу нульового градієнта отримана математична модель руху хлопаючої мембрани, яка дозволяє виконувати аналіз руху таких мембран з точки зору часу періодичності її роботи, надійності вимірювальних пристроїв, а також виконувати їх діагностування за частотою та затуханням вимушених коливань.

Література: 1.Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с.и2.Стенцель Й.І., Томсон А.В. Електродеформаційні процеси в п′єзоелектричних перетворювачах. Системи контроля и управления технологическими процессами. Сб. науч. статей. – Луганск; Світлиця, 2006. – С.144-150.

УДК 681.586.773

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 стаичні 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; П - 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_Γ - температура газового середовища; T_P - температура рідини; $\rho_\Gamma, \mu_\Gamma, \varphi$ - 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_Γ 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

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

де $y_1(J)$ - поточне значення амплітуди УЗК на відстані J від ПКП; D - жорсткість п′єзоелемента; S - його площа; П - 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.

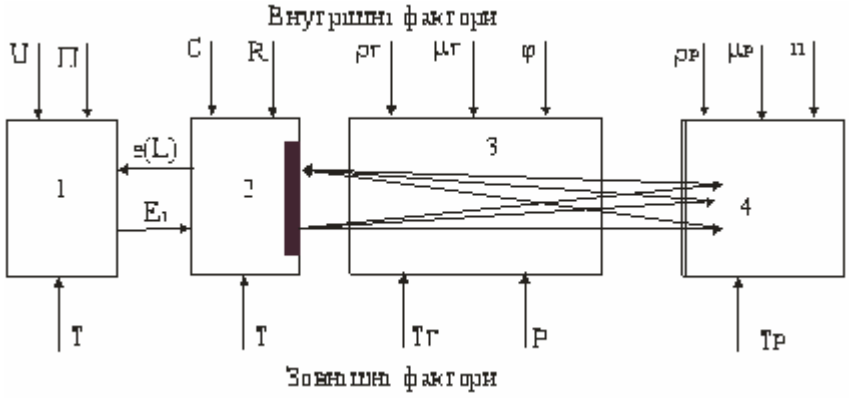

Рис. 1. Структурна схема вимірювання УЗР і фактори, які впливають на процес перетворень

Рівняння (1) можна записати таким чином

$$y_1(J) = Y_0(t)\exp(-\alpha J), \tag{2}$$

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 середовищі 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

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

Підставивши рівняння (3) в (2), одержуємо

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

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

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

де $M_1, M_2, \cdots M_n$ - молекулярна вага n компонентів газової суміші; $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ - 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 описається наступним рівнянням [3]

$$y_3(z) = y_1(J)\exp(-\alpha_P z), \tag{5}$$

де $\alpha_P = Af^2$ - 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

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

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

$$y_2(J) = Y_0(t)\exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{8\pi^2 \mu_P f^2 \sqrt{\rho_P}}{3(S\gamma)^{3/2}} z\right)\right]. \quad (7)$$

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

$$W = W_0\left(\frac{\rho_Г c_Г - \rho_P c_P}{\rho_Г c_Г + \rho_P c_P}\right)^2, \quad (8)$$

де W_0 - енергія, яка приходить до границі розділу середовищ; $\rho_Г, c_Г$ - густина та швидкість розповсюдження УЗК у газовому середовиші; ρ_P, c_P - густина та швидкість розповсюдження УЗК у рінинному середовиші.

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

$$z = Y_0(t)\left(\frac{\rho_Г c_Г - \rho_P c_P}{\rho_Г c_Г + \rho_P c_P}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right). \quad (9)$$

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

$$y_2(J) = Y_0(t)\exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right)\left[1 - \exp\left(-Y_0(t)\frac{8\pi^2 \mu_P f^2 \sqrt{\rho_P}}{3(S\gamma)^{3/2}} * \right.\right.$$
$$\left.\left. * \left(\frac{\rho_Г c_Г - \rho_P c_p}{\rho_Г c_Г + \rho_p c_p}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right)\right)\right]. \quad (10)$$

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

$$e(t, J) = Y_0(t)\sin(\omega t)\exp\left[-\left(\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J + \alpha_2 t\right)\right]\left[1 - \exp\left(-Y_0(t)\frac{8\pi^2 \mu_P f^2 \sqrt{\rho_P}}{3(S\gamma)^{3/2}} * \right.\right.$$
$$\left.\left. * \left(\frac{\rho_Г c_Г - \rho_P c_p}{\rho_Г c_Г + \rho_p c_p}\right)^2 \exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right)\right)\right]. \quad (11)$$

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

$$\Delta E(J) = E_0 \frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J - E_0 \frac{8\pi^2 \mu_P f^2 \sqrt{\rho_P}}{3(S\gamma)^{3/2}}\left[1 - \left(\frac{\rho_Г c_Г - \rho_P c_P}{\rho_Г c_Г + \rho_P c_P}\right)^2\right] *$$
$$* \exp\left(-\frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J\right), \quad (12)$$

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 $\rho_Г c_Г << \rho_P c_P$ другим членом рівняння (12) можна знехтувати. Для такого випадку маємо

$$\Delta E(J) = E_0 \frac{M_c P V_m}{848 Z D_c}\sqrt{\frac{\nu R}{T}} J. \quad (13)$$

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 градуювальної характиристики рівнеміра. Значна нелінійність спостерігається й при малих відстанях до поверхні рідини. На рис. 2 показані експериментальна та теоретична статичні характеристики УЗР.

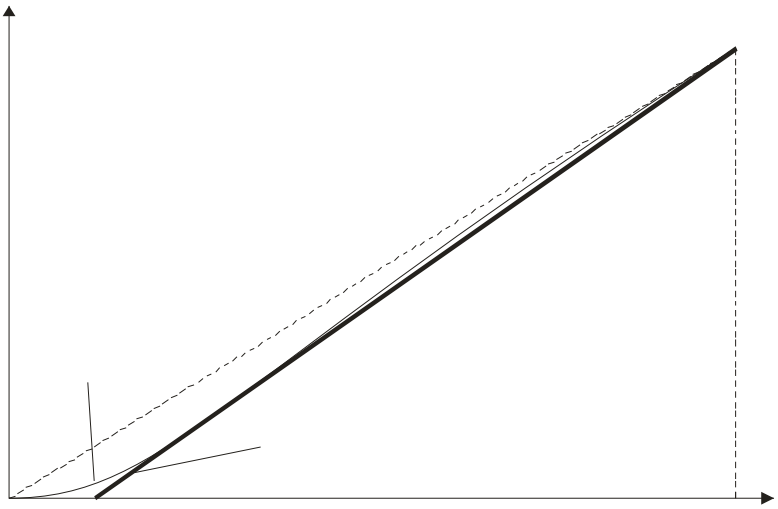

Рис. 2. Теоретична та експериментальна статичні характеристики ультразвукового рівноміра

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

$$K = K_0\left\{1-\frac{8\pi^2\mu_P f^2\sqrt{\rho_P}}{3(S\gamma)^{3/2}}\left[1-\frac{\rho_\Gamma c_\Gamma-\rho_P c_P}{\rho_\Gamma c_\Gamma+\rho_P c_P}\right]\right\}. \qquad (14)$$

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 рівноміра являє собою функцію багатьох змінних, котрі можуть викликати похибки вимірювання.

Висновки. На процес перетворення в ультразукових 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 вязкостірідини 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., Калинкин І.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. – Л.: Химия, 1986. – 432 с. 4.АгейкинД.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.

УДК 681.586.773

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

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВГО 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 летколетких 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 одинакову 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]

$$e_P = E_P\left\{\left[\begin{array}{l}\left[1-\exp\left(-\alpha_{1P}n\left|2J_P/c-t\right|\right)\right]\left[1-k_0\exp\left(-\alpha_{1P}n\left|2J_P/c-t\right|\right)\right]\\ \left[\cos\left(\omega n\left(2J_P/c-t\right)\right)\right]\end{array}\right]\right\}, \qquad (1)$$

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:

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

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:

$A_1 = 1-\exp\left(-\alpha_{1P}n\left(2J_P/c-t\right)\right)$, $A_2 = 1-k_0\exp\left(-\alpha_{1P}n\left(2J_P/c-t\right)\right)$,

$A_3 = \cos\left(\omega n\left(2J_P/c-t\right)\right)$, $B_1 = 1-\exp\left(-\alpha_{1L}n\left(2J_L/c-t\right)\right)$,

$B_2 = 1-k_0\exp\left(-\alpha_{1P}n\left(2J_L/c-t\right)\right)$, $B_3 = \cos\left(\omega n\left(2J_L/c-t\right)\right)$,

$B_4 = 1-\exp\left(\alpha_2 n\left(2J_L/c-t\right)\right)$.

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

$A_1 = \alpha_{1P}n\left(2J_P/c-t\right)$, $A_2 = \alpha_{1P}n\left(2J_P/c-t\right)$, $A_3 = 1-0{,}5\omega^2n^2\left(2J_P/c-t\right)^2$,

$B_1 = \alpha_{1L}n\left(2J_L/c-t\right)$, $B_2 = \alpha_{1L}n\left(2J_L/c-t\right)$, $A_3 = 1-0{,}5\omega^2n^2\left(2J_P/c-t\right)^2$,

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

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

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

$$E_L = E_P\left(\frac{\alpha_{1L}J_L}{\alpha_{1P}J_P}\right)^2\left\{\frac{1}{\left(1-2\alpha_2 nJ_L/c\right)}\left[\frac{1-0{,}5\omega^2n^2\left(2J_P/c\right)^2}{1-0{,}5\omega^2n^2\left(2J_L/c\right)^2}\right]\right\}. \qquad (3)$$

Якщо множник у фігурних дужках мало впливає на характер залежності $E_L = f(J_L)$, то позначивши $N = \frac{1}{(1-2\alpha_2 n J_L / c)} \cdot \left[\frac{1-0{,}5\omega^2 n^2 (2J_P / c)^2}{1-0{,}5\omega^2 n^2 (2J_L / c)^2} \right]$, 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

$$I_{ПР} = I_{0P} \exp(-k_\Gamma J_P), \quad (5)$$

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

$$I_{ПЛ} = I_{0L} \exp(-k_\Gamma J_L), \quad (6)$$

Ступінь загасання УЗС газом на відстані J_P дорівнює

$$\alpha_{1P} = I_{ПР} / I_{0P} = \exp(-k_\Gamma J_P), \quad (7)$$

а ступінь загасання на відстані J_L

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

Відношення

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

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

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

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

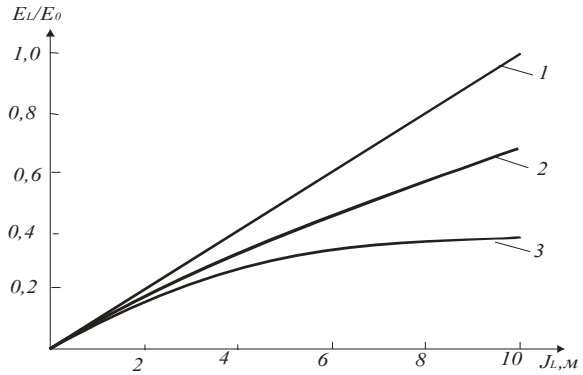

Рис. 1. Статична характеристика рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня для коефіцієнтів поглинання: 1 - $k_\Gamma = 0.0015$; 2 - $k_\Gamma = 0.01$; 3 - $k_\Gamma = 0.03$

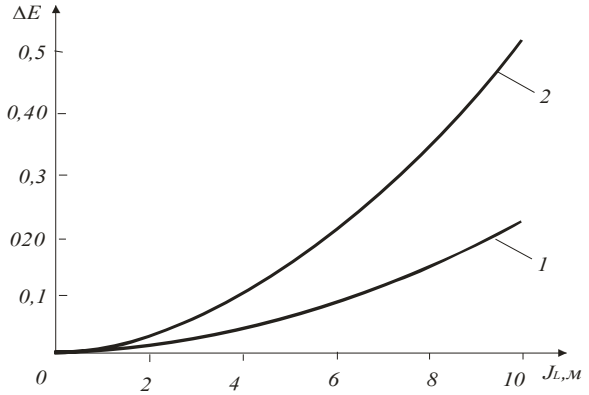

Рис. 2. Відхилення статичних характеристик рівнеміра з блоком вилучення квадратного кореня від лінійної для коефіцієнтів поглинання:
$1 - k_{\Gamma} = 0.01$; $2 - k_{\Gamma} = 0.03$

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

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

Рівняння (11) показує, що відхилення від нелінійності викликатиме 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 пєзоелектричних 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.

УДК 681.586.773

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

КОМПЕНСАЦІЙНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ РІВНЕМІР

Описується новий принцип вимірювання рівня рідини компенсаційним ультразвуковим рівнеміром за принципом визначення амплітуди збуджуючого сигналу, який сприймається п′єзокерамічним елементом після відбиття від реперного пристрою, і такого ж сигналу, який сприймається тим же елементом після відбиття від поверхні рідини. Приводиться математичне описання такого рівнеміра і показано, що він має зменшену зону нечутливості, практично не чутливий до зміни складу газового середовища, його температури і тиску.

The new principle of measurement of liquid's level by the compensating ultrasound level meter by a principle of definition of amplitude of a stimulating signal, which is perceived by piezoceramic element after reflection from the fiducial plate and after reflection from a surface of the liquid are observed. The mathematical description of this level meter is given. It is shown, that it has reduced zone to insensitivity, practically non-sensitive to change the gas ambience, the temperature and the pressures.

Сучасні ультразвукові рівнеміри (УЗР), як правило, мають реперний пристрій (репер) у вигляді пластини або шайби, від якої випромінений ультразвуковий сигнал (УЗС) відбивається та сприймається п′єзоелектричним приймачем. При цьому вимірювальним блоком визначається час проходження цим сигналом подвійної відстані від випромінювача до репера. Такий метод уведення корекції в процес вимірювання є достатньо недосконалим, так як не враховує похибки, коли відстань до контрольованого рівня перевищує відстань до репера. З метою усунення цього недоліку пропонується компенсаційний УЗР. Такий спосіб вимірювання рівня значно зменшує зону нечутливості рівнеміра, а також підвищує точність контролю. Структурна схема компенсаційного рівнеміра приведена на рис. 1. На відміну від відомих рівнемірів, у яких амплітуда випроміненого сигналу є сталою, у запропонованому приладі амплітуда випроміненого сигналу в залежності від рівня рідини змінюється до тих пір, поки різниця між цими амплітудами не стане рівною нулю. Для врахування впливу температури газу, його тиску, а також складу газового середовища реперний пристрій розташовується в газовому середовищі на фіксованій відстані від п′єзокерамічного випромінювача (ПКВ). Так як відбиті ультразвукові сигнали (УЗС) від репера та від поверхні контрольованого середовища проходять одне і теж газове середовище, то при їх зрівноваженні компенсується зміна параметрів цього середовища., що призводить до зменшення похибок вимірювання рівня. Рівнемір працює наступним чином. Після включення рівнеміра в роботу мікроконтролер видає управляючий сигнал на регулююче джерело імпульсів збудження, яке формує і видає на ПКВ електричний імпульс з мінімальною амплітудою. Одночасно обнуляється і включається лічильник тактових сигналів. ПКВ генерує УЗС, який відбивається від репера і сприймається тим же п′єзокерамічним елементом, формуючи на його виході електричний сигнал. Останній нормується підсилювачем, перетворюється у цифровий код аналого-цифровим перетворювачем і запам′ятовується в блоці пам′яті. Після цього мікроконтролер ініціює подачу на ПКВ послідовності імпульсів з наростаючою амплітудою до величини, при якій запам′ятований електричний сигнал стане рівним сигналу, котрий сформований при відбитті УЗС від поверхні контрольованої речовини. Коли ці електричні сигнали стануть рівними нулю, то мікроконтролер виключає регульоване джерело імпульсів збудження і видає сигнал на блок оброблення інформації [1].

Рис. 1. Структурна схема компенсаційного ультразвукового рівнеміра

Статична характеристика компенсаційного рівнеміра є практично квадратичною, яку можна описати наступним рівнянням [2]

$$E = E_P\left(\frac{N}{J_P^2}\right)J_L^2 \exp\left\{-n_0\frac{J_L}{J_P}\left(1-\frac{J_P}{J_L}\right)\left[1+\sqrt{\left(1+\frac{\Delta e_P}{N_{0P}}\right)-2k_{CT}J_P}\right]\right\}, \quad (1)$$

де E_p - амплітуда випроміненого сигналу; N, N_{0P}, n_0, k_{CT} - сталі; J_P, J_L - відстань від випромінювача до реперного пристрою та поверхні рідини відповідно; Δe_P - різниця сигналів, яка поступає на компаратор.

Приймається, що підсилювачі, компаратор і джерело регульованої напруги є електричними елементами з лінійною статичною характеристикою. Тому для них можна записати наступне рівняння

$$U_i = k_E e_C, \quad (2)$$

де k_E - узагальнюючий коефіцієнт передачі електричних схем підсилювачів, компаратора і джерела регульованої напруги.

Інтенсивність сигналу ультразвукових коливань (УЗК), який випромінюється ПКВ, можна описати наступним рівнянням

$$I_0 = 2DS\Pi U_i / CrP = k_0 U_i = \rho c\left(\omega Y_0\right)^2 / 2, \quad (3)$$

де $k_0 = 2DS\Pi / CrP$ - стала п′єзоелемента; D - жорсткість його пластини S - поверхня пластини; П - умовний розмір п′єзоелемента; C - його ємність; r - активний опір; P - активна потужність розсіювання; ρ - густина газу; c - швидкість розповсюдження УЗК в газовому середовищі; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота УЗК; f - частота коливань; Y_0 - амплітуда УЗК на вході в газове середовище.

Інтенсивність сигналу УЗК, який досягнув поверхні рідини дорівнює [3]

$$I_{П} = \rho c V_{1m}^2 / 2 = \rho c(\omega Y_{П})^2 / 2, \quad (4)$$

де $V_{1m} = \omega Y_{1m}$ - максимальна коливальна швидкість частинок газу при досягненні поверхні рідини; $Y_{П}$ - амплітуда сигналу УЗК на поверхні рідини.

Зменшення амплітуди сигналу УЗК обумовлюється поглинанням енергії газовим середовищем. Якщо поглинання інтенсивності сигналу УЗК підпорядковується закону Бугера-Ламберта-Бера, то

$$I_{П} = I_0 \exp(-k_{Г} R), \quad (5)$$

де $k_{Г}$ - коефіцієнт поглинання сигналу УЗК газовим середовищем; R - відстань від випромінювача УЗК до поверхні рідини.

З врахуванням (3) і (4) маємо

$$Y_{П} = Y_0[1 - \exp(-0{,}5k_{Г} R)]. \quad (6)$$

При досягненні поверхні рідини частина енергії сигналу УЗК поглинається рідиною, а друга частина відбивається від поверхні. Якщо рахувати, що процес розповсюдження УЗК у рідині підпорядковується закону Бугера-Ламберта–Бера, то інтенсивність поглинання

$$I_{P} = I_{П}[1 - \exp(-k_{P}\delta_{P})], \quad (7)$$

де I_{P} - інтенсивність сигналу УЗК, який поглинається рідиною; k_{P} - коефіцієнт поглинання УЗК рідиною; δ_{P} - глибина поглинання УЗК рідиною, яка залежить від її фізико-хімічного складу і температури.

Інтенсивність сигналу УЗК, яка відбивається від поверхні рідини

$$I_{B} = I_{П} - I_{P} = I_0\left\{1 - \exp\left[-k_{Г} R\left(1 + \frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]\right\}. \quad (8)$$

або, враховуючи (2) – (6), маємо

$$Y_{B} = Y_0\left\{1 - \exp\left[-k_{Г} R\left(1 + \frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]\right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Інтенсивність сигналуУЗК, яка сприймається п′єзокерамічним елементом

$$I_{C} = \rho c V_{2m}^2 / 2 = \rho c(\omega Y_{C})^2 / 2, \quad (10)$$

де $V_{2m} = \omega Y_{C}$ - максимальна коливальна швидкість частинок газу при досягненні поверхні п′єзоелектричного елемента; Y_{C} . – амплітуда сприймаючого п′єзоелектричним елементом сигналу УЗК.

Якщо прийняти, що газове середовище для падаючого і відбитого УЗК одне й теж, то інтенсивність поглинання відбитого сигналу УЗК можна описати рівнянням

$$I_{C} = I_0\left\{1 - \exp\left[-2k_{Г} R\left(1 + 0{,}5\frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]\right\} \quad (11)$$

або

$$Y_{C} = Y_0\left\{1 - \exp\left[-2k_{Г} R\left(1 + 0{,}5\frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]^{1/2}\right\}. \quad (15)$$

Рахуватимемо, що амплітуда e_{C} електрорушійної сили, яка створюється п′єзоелементом, пропорційна амплітуді Y_{C} . Тоді маємо

$$e_{C} = k_{\Pi} Y_0\left\{1 - \exp\left[-2k_{Г} R\left(1 + 0{,}5\frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]^{1/2}\right\}, \quad (12)$$

де k_{Π} - коефіцієнт передачі п′єзоелемента.

З рівняння (2) знайдемо амплітуду випромінюючого імпульса, яка дорівнює

$$Y_0 = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{2k_0 U_i}{\rho c}}. \quad (13)$$

Підставивши (13) у рівняння (12), маємо

$$e_{C} = \frac{k_{E}}{\omega}\sqrt{\frac{2k_0 U_i}{\rho c}}\left\{1 - \exp\left[-2k_{Г} R\left(1 + 0{,}5\frac{k_{P}\delta_{P}}{k_{Г} R}\right)\right]^{1/2}\right\}. \quad (14)$$

Згідно з принципом вимірювання амплітуда e_C створюваного п′єзоелементом електричного сигналу, є сталою величиною. Тоді, приймаючи, що $e_C = E_C = const$, з (14) одержуємо

$$U_i = \frac{\rho c}{2k_0}\left(\frac{\omega E_C}{k_E}\right)\left\{1-\exp\left[-2k_\Gamma R\left(1+0{,}5\frac{k_P\delta_P}{k_\Gamma R}\right)\right]^{1/2}\right\}. \qquad (15)$$

Формально рівняння (15) є статичною характеристикою рівноміра зі змінним збуджуючим імпульсом. Нижній рівень збуджуючого імпульса U_H характеризує реперну точку і визначається репером. Відстань R_0 від п′єзоелемента до репера визначається зоною нечутливості рівноміра. Якщо $R = R_0$, то збуджуючий сигнал, який є реперним, дорівнює

$$U_{Pi} = \frac{\rho c}{2k_0}\left(\frac{\omega E_C}{k_E}\right)\exp\left(2k_\Gamma R_0\right). \qquad (16)$$

З врахуванням реперної напруги імпульса і того, що $R = H - L$ рівняння статичної характеристики рівноміра набуває вигляду

$$U_i = \frac{\rho c}{2k_0}\left(\frac{\omega E_C}{k_E}\right)\left[1-\exp\left[-2k_\Gamma R\left(1+0{,}5\frac{k_P\delta_P}{k_\Gamma R}\right)\right]^{1/2}+\exp\left(-2k_\Gamma R_0\right)\right]. \qquad (17)$$

Позначимо $N_0 = \rho c\omega E_C / 2k_0k_E$. Тоді рівняння (17) приймає наступну форму

$$U_i = N_0\left[\left\{1-\exp\left[-2k_\Gamma R\left(1+0{,}5\frac{k_P\delta_P}{k_\Gamma R}\right)\right]^{1/2}\right\}+\exp\left(-2k_\Gamma R_0\right)\right]. \qquad (18)$$

Розрахована за формулою (18) статична характеристика рівноміра, призначеного для вимірювання рівня води, коли газовим середовищем є повітря, близька до лінійної і має вигляд показаний на рис. 5.

Статична характеристика має зміщення на величину $U_0 = kR_0$ при (див. рис. 5, крива 2) $R_0 = 0$. При градуюванні рівнеміра на заданий діапазон вимірювання статичну характеристику приводять до наступної форми (рис. 5, крива 3)

$$U_i = N_0R^2\left\{1-\exp\left[-2k_\Gamma\left(R+2R_0\right)\left(1+0{,}5\frac{k_P\delta_P}{k_\Gamma R}\right)\right]^{1/2}+\exp\left(-2k_\Gamma R_0\right)\right\}-k_0R_0, \quad (19)$$

де k_0 - налагоджувальний параметр рівнеміра.

Рівень рідини в апараті розраховується в обчислювальному пристрої вимірювальної схеми за формулою $L = k_L\left(U_{0i} - U_i\right)$, де k_L - коефіцієнт перетворення рівноміра; U_{0i} - збуджуючий електричний сигнал, який відповідає нульовому рівню рідини в апараті. Експериментальна статична характеристика рівноміра показана на рис. 5, крива 1. ЇЇ відхилення від теоретичної не перевищує 0,25 %, що свідчить про адекватність математичних моделей.

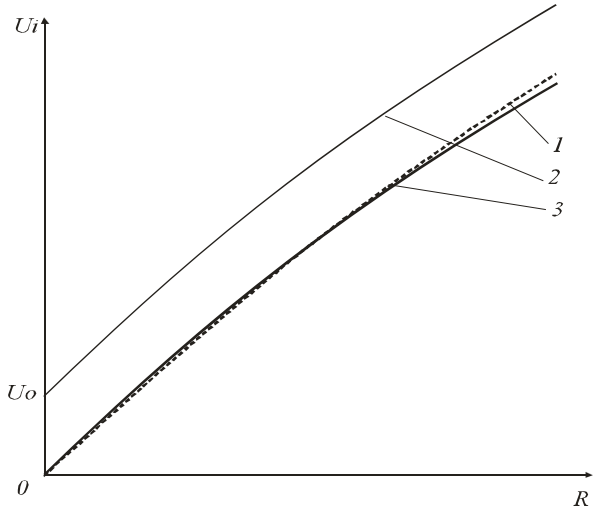

Рис. 5. Статична характеристика рівноміра зі змінним збуджуючим імпульсом.

Висновки. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що статична характеристика компенсаційного ультразвукового рівноміра є близькою до лінійної. Величина нелінійності, в основному, обумовлюється фізизо-хімічними параметрами газового середовища, в якому розповсюджуються УЗК. Як показують експериментальні дослідженя, при висоті рівня до 20 м нелінійність статичної характеристики не перевищує 0,3 %. Зона нечутливості рівноміра не перевищує 0,2 м. Показано, що компенсаційний принцип

вимірювання дозволяє суттєво зменшити вплив температури, тиску та складу газового середовища на точність контролю.

Література: 1. Патент України на корисну модель 32894 МКВ G 01 F 23/28. Ультразвуковий рівнемір / Рябіченко А.В.., Стенцель Й. І.; Заявл. 10. 12. 2007; Опубл. 10.06.2008. Бюл. 11. 2. 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. 3. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

УДК 620.179.14

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
Н.Н. СИРЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, асп., НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

У роботі запропоновано теоретичну модель вихорострумового перетворювача прохідного типу з феромагнітним зразком представленим у вигляді соленоїда з геометрією витка еквівалентною глибині проникнення електромагнітного поля. Отримано вирази для визначення складових комплексного опору котушки перетворювача та просторовий розподіл еквівалентного опору перетворювача зі зразком.

In the work the theoretical model of bobbin probe type eddy current converter with the ferromagnetic sample represented as a solenoid with geometry of coil to the equivalent depth of penetration of the electromagnetic field is offered. Expressions are got for determination of constituents of complex resistance of bobbin of converter and spatial distributing of equivalent resistance of converter with a sample.

Введение. Для надежного контроля и эффективного диагностирования поверхностного состояния металлических конструкций широко применяется вихретоковый бесконтактный метод неразрушающего контроля. В основе данного метода лежит взаимодействие внешнего по отношению к объекту контроля намагничивающего электромагнитного поля с индуцированными в материале объекта вихревыми токами. Вихретоковый метод контроля постоянно развивается и является весьма перспективным, поскольку обладает рядом существенных преимуществ в силу отсутствия необходимой подготовки поверхности изделия, высокой скорости и автоматизации процесса контроля, возможностью контроля через защитные поверхности и т.д. [1].

Несмотря на достаточное развитие теоретических и прикладных аспектов современных методов и средств вихретокового неразрушающего контроля, надежных и эффективных средств получения и обработки экспериментальных данных в настоящее время не существует.

Иными словами, определение функциональных зависимостей между состоянием объекта и сигналами преобразователя, а также восстановление параметров дефекта или структуры объекта по измеренным данным разработаны слабо в силу большой сложности и многозначности задачи [2].

Надежный метод получения результатов должен опираться на разработанную математическую модель, адекватно описывающую процесс получения экспериментальных данных. Математическую модель можно описать как аналитически, так и численными методами.

Постановка задачи. Основным элементом, преобразующим физические явления в электрический сигнал, при вихретоковом контроле является вихретоковый преобразователь (ВТП). При проектировании ВТП всегда возникает задача определения распределения электромагнитного поля в преобразователе, объекте контроля и окружающем пространстве. Аналитические методы решения подобных задач для определения поля в областях с простой геометрией и однородной средой подробно рассмотрены в [3]. При существенной неоднородности среды целесообразно воспользоваться методами граничных интегральных и пространственных интегральных уравнений [4,5]. Применение перечисленных методов при проектировании ВТП позволяет успешно находить распределение электромагнитного поля в объекте со сложной геометрией и нелинейными свойствами с достаточно высокой точностью, но при больших затратах машинного времени. На данный момент в современных исследованиях в области вихретокового контроля основной упор сделан на совершенствование алгоритмов расчетных операций, направленных на сокращение временных затрат [6]. Эффективность численных методов расчета оценивается по конечным параметрам: точности и производительности программного продукта, простоте реализации. Это, в частности, можно достичь при создании упрощенных моделей ВТП с исследуемым образцом за счет конкретизации параметров контроля объекта и ограничении диапазонов контроля.

Основная часть. Рассмотрим простейшую модель кольцевого витка (см. рис. 1) с поперечным сечением в виде окружности.

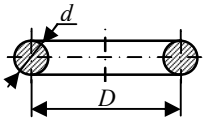

Рис. 1. Схематичное изображение одного витка с поперечным сечением в виде окружности.