

УДК 681.586.773

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК УЛЬТРАЗВУКОВИХ РІВНЕМІРІВ МЕТОДОМ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МАТРИЦІ****Стенцель Й. І., Літвінов К. А., Рябіченко А.В., Шаповалов О.І.****RESEARCH ERRORS LEVEL GAUGES ULTRASONIC INTEGRATED BY THE METHOD MATRIX****Stenzel I. I., K.A. Litvinov, Ryabichenko A.V., Shapovalov A.I.**

*Виконано аналіз внутрішніх і зовнішніх факторів, котрі впливають на точність вимірювального контролю ультразвукових рівнемірив. Показано, що електрофізичні параметри викликають похибки вимірювального контролю для рівнемірив, які засновані на вимірюванні тривалості часу перенесення ультразвукового механічного імпульсу через газове середовище. Показано, що похибки рівнеміра розподіляються нелінійно як за діапазоном вимірювального контролю, так і за характером зміни впливового фактора. Досліджується метод інтегральної матриці для оцінки похибок ультразвукового рівнеміра.*

**Ключові слова:** ультразвук, випромінювач, п'єзокераміка, інтенсивність, газ, середовище, мембрана, матриця, варіація, похибка.

**1. Вступ.** Ультразвукові рівнеміри (УЗР), які побудовані на п'єзокерамічних елементах (ПКЕ), використовуються в різних галузях народного господарства як для контролю рівня рідинних середовищ (РС), так і для об'ємної витрати газових потоків [1, 2]. Суть ультразвукових рівнемірив рідини та об'ємної витрати газу полягає в тому, що ультразвуковий механічний імпульс (УЗМІ) переноситься через газове середовище (ГС) від мембранного блоку (МБ) ультразвукового випромінювача (УЗВ) до такого ж блоку ультразвукового приймача (УЗП). Як УЗВ так і УЗП конструктивно є ідентичними. У багатьох випадках УЗВ є одночасно й УЗП, так як процес випромінювання УЗМІ і його сприйняття є розділеними в часі [3]. Принцип роботи рівнемірив, і в витратомірив об'ємної витрати газових потоків є однаковим за винятком того, що в рівнемірах змінним параметром є товщина ГС (відстань  $\mathfrak{R}$  від УЗВ до поверхні РС), а у витратомірах – швидкість руху УЗІ через нормований відрізок трубопроводу. Як правило, у всіх випадках визначається час проходження УЗМІ змінної чи нормованої відстані в ГС. Для математичного описання руху УЗМІ в ГС

використовується, як правило, основний закон світлопоглинання Ламберта-Бугера-Бера, згідно з яким поточна інтенсивність  $I$  УЗМІ є пропорційною початковій інтенсивності  $I_0$  та за експонентою зменшується в залежності від фізичних параметрів газу, наприклад, лінійної швидкості його руху чи товщини  $\mathfrak{R}$  ГС. Згідно з цим законом поточна інтенсивність поглинання [4]

$$I(\mathfrak{R}) = I_0 \exp(-\varepsilon_\lambda \mathfrak{R} \rho_C), \quad (1)$$

де  $\varepsilon_\lambda$  - коефіцієнт поглинання УЗК, який залежить від частоти;  $\rho_C$  - густина ГС.

Так як вимірюваний час  $t_B$  пропорційний зміні інтенсивності УЗІ, то  $k_I \Delta I = t_B$ . Тоді з (1) знаходимо:

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\varepsilon_\lambda \rho_C} \ln(1 - t_B / k_I I_0). \quad (2)$$

Рівняння (2) є математичною моделлю рівнеміра РС при відсутності в УЗВ та УЗП похибок вимірювального контролю (ПВК). З (1) видно, що при  $\mathfrak{R} = const$  змінним параметром є густина  $\rho_C$  ГС. Цей принцип використовується для побудови витратомірив об'ємної витрати газових потоків [5]. УЗМІ, який випромінюються УЗВ, чинить відповідний тиск на ГС, який дорівнює [6]  $\bar{p} = \rho_C c \omega Y_M / \sqrt{2}$ , де  $\rho_C$  - густина ГС;  $c$  - швидкість звуку в цьому середовищі;  $\omega$  - кутова частота коливань;  $Y_M$  - амплітуда коливань;  $t$  - час. Звідки густина ГС

$$\rho_C = \bar{p} / \sqrt{2} c \omega Y_M \quad (3)$$

Враховуючи, що тиск звуку  $p_C = J/(c - v)$ , де  $J$  – сила звуку;  $v$  – лінійна швидкість руху газового потоку, то для витратомірів рівняння (1) приводиться до наступного:

$$I = I_0 \exp\left(-\varepsilon_\lambda \Re_0 \frac{JS}{\sqrt{2S}(Sc - F_O)c\omega Y_M}\right), \quad (4)$$

де  $\Re_0$  - нормована відстань трубопроводу, на кінцях котрої установлені УЗВ і УЗП;  $S$  – площа поперечного перетину ГС у трубопроводі;  $F_O$  – об'ємна витрата газового потоку.

Так як час  $t_B$  пропорційний зміні інтенсивності УЗІ, а  $k_I \Delta I = t_B$ , то з рівняння (4) знаходимо поточне значення витрати  $F_O(t_B)$  у такій формі:

$$F_O(t_B) = F_{O_{\max}} \left[ 1 - \frac{\varepsilon_\lambda \Re_0 J}{\sqrt{2c^2 \omega Y_M} \ln(1 - t_B / k_I I_0)} \right]. \quad (5)$$

де  $F_{O_{\max}} = Sc$  - теоретична максимальна об'ємна витрата газового потоку.

Аналіз рівнянь (4) і (5) показує, що в обох випадках у формули для відстані  $\Re$  та об'ємної витрати  $F_O$  входить початкова інтенсивність  $I_0$  випромінювання УЗМІ, яка формується УЗВ, і час  $t_B$ , котрий визначається електрорушійною силою (ЕРС)  $e(\Re)$  чи  $e(F_O)$  УЗП. Так як  $I_0$  і ЕРС є вихідними параметрами з відповідними похибками реологічних перетворень, то останні впливатимуть на точність вимірювання часу  $t_B$ , а значить на ПВК того чи іншого засобу вимірювального контролю.

Аналіз приведених нижче літературних джерел показує, що при дослідженні таких засобів контролю, які, основна увага приділяється поведінці УЗМІ у ГС і приймається, що основним джерелом ПВК таких засобів є тільки це середовище. У науковій літературі не виявлено досліджень ПВК, які обумовлюються зміною фізичних параметрів п'єзокерамічних елементів. Спостереження за роботою таких УЗВК, а також результати експериментальних досліджень показують, що джерелом похибок є не тільки ГС, але й власне УЗВ та УЗП, до складу котрих входять ПКЕ та мембранний блок. Як правило, вважається, що похибки, котрі обумовлені ПКЕ, незначні і ними можна нехтувати [7]. Але недостатня вивченість електродинамічних процесів, які проходять в ПКЕ, їх роль у формуванні УЗМІ в реальних умовах роботи обумовлюють необхідність проведення подальших досліджень у цьому напрямку.

Сучасні рівнеміри та витратоміри мають блоки оброблення вимірювальної інформації (БОВІ), а також управління (БУ). За результатами вимірювання впливових факторів (температури, тиску толщо) уводяться відповідні поправки до

результату вимірювального контролю. Як правило, приймається, що дія впливових факторів у заданих діапазонах їх зміни є лінійною, що приводить до збільшення абсолютної ПВК засобу контролю. Тому актуальною є задача розробки методів дослідження ПВК, які враховують нелінійні зміни впливових факторів на процес перетворення вимірювальної величини з метою підвищення її точності.

У більшості випадків для побудови УЗКР рідин використовується принцип вимірювання часу проходження УЗІ від УЗВ до УЗП [8]. Суть принципу полягає в тому, що з допомогою таймера вимірюється час проходження УЗІ від моменту подачі на УЗВ ЕЗІ до моменту появи ЕРС  $E_{\Pi}(t)$  на виході УЗП. У цьому разі напруга  $U$ , як правило, є сталою. Як видно з рівняння (1), залежність  $E_{\Pi}(t) = f(t)$  є експоненціальною. Можливі й інші варіанти побудови УЗКР. У роботі досліджений принцип побудови засобу, коли вихідною координатою є напруга ЕЗІ. У такому разі залежність  $E_{\Pi}(t) = f(U)$  є квадратичною. Основною перевагою цього методу є те, що при використанні стандартних пристроїв вилучення квадратного кореня статична характеристика стає лінійною. Достатньо ефективним є компенсаційний метод УЗКР рідин, коли визначається різниця між напругою, створеною  $E_{\Pi}(t)$ , і змінною опорною напругою  $U_0$  зразкового джерела. Розглянемо математичну модель УЗКР з кільцевим рухом УЗІ, коли контролю підлягає час проходження УЗІ з моменту подачі ЕЗІ до моменту появи вихідної ЕРС  $E_{\Pi}(t)$ . З метою підвищення достовірності вимірювального контролю рівень вихідного сигналу  $E_{\Pi}(t)$  підвищують до деякого значення, яке визначається опорною напругою  $u_{O\Pi} = const$ . Тоді, коли  $E_{\Pi}(t) = u_{O\Pi}(t_B) = const$ , де  $t_B$  - виміряний час, відключається ЛПІ і визначається час  $t_B$ . Вихідна напруга ультразвукового рівнеміра (УЗР) описується наступним рівнянням

$$E_{\Pi}(t_B) = K_0 \frac{UL_B}{H} \exp\left[-k_z \frac{x_0 L_B}{2\sqrt{D_{B\zeta} H}}\right] * \left\{ 1 - \exp(-\alpha_{\Pi} t_B + \varphi_{\Sigma}) [\cos(\omega_{\Pi 0} t_B)] \right\}^2 * \left[ 1 - \exp\left( \frac{-t_B / \varepsilon_\lambda (H - L_B) \frac{M_C}{M_{\Pi}} *}{\sqrt{k M_C R T_C \frac{P_A}{P_H}}} \right) \right] \quad (6)$$

Позначимо:  $A_0 = K_0 / u_{O\Pi}(t_{B0})$ ,  $A_1 = k_z / 2\sqrt{D_{B\zeta}}$   
 $A_2 = \varepsilon_\lambda (M_C / M_{\Pi}) \sqrt{k M_C R T_C (P_A / P_H)}$ . Тоді рівняння (6) приймає так форму:

$$L_B = \frac{J_H \exp[A_1 x_0 L_B / H]}{A_0 U \{ [1 - \exp(-\alpha_{\Pi} t_B) \cos(\omega_{\Pi 0} t_B + \varphi_{\Sigma})]^2 * [1 - \exp(-t_B / A_2 (H - L_B))] - 1 \}} \quad (7)$$

Рівняння (7) є математичною моделлю УЗР, так як в нього входять тільки дві змінні: вимірювальний параметр – рівень  $L_B$  і час  $t_B$  перенесення УЗМІ від УЗВ до УЗП. Як видно з (7), воно є нелінійним і має вигляд, показаний на рис. 1.

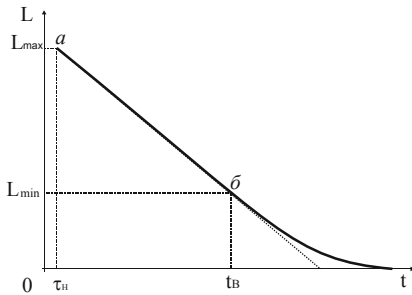


Рис. 1. Статична характеристика УЗР з вимірюванням часу проходження УЗМІ через газове середовище

На практиці, як правило, обмежуються тільки лінійною частиною статичної характеристики від  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$ . При дослідженні статичної характеристики, враховуючи ідентичність мембранних блоків УЗВ і УЗП, прийматимемо, що  $\alpha_{\Pi} = \delta_{\beta}$  і  $\omega_{B0} = \omega_{\Pi 0}$ . В УЗР у більшості випадків вихідною координатою є час  $t_B$ , котрий визначається з моменту подачі на ПКЕ УЗВ електричного збуджуючого імпульсу до моменту досягнення ЕРС  $e(\mathfrak{R})$  ПКЕ УЗП деякого заданого значення опорної напруги  $u_0$  [9]. Зміна інтенсивності  $\Delta I(\mathfrak{R}) = I_0 - I(\mathfrak{R})$  визначає тривалість часу, за який УЗІ переміщається від УЗВ до УЗП. Для лінійної частини статичної характеристики (градуированої характеристики рівнеміра) можна прийняти, що  $t_B = k_I \Delta I(\mathfrak{R})$ , де  $k_I$  - коефіцієнт передачі. З врахуванням цього товщина  $\mathfrak{R}$  ГС дорівнює:

$$\mathfrak{R} = (1 / \varepsilon_{\lambda} \rho_C) \ln(1 - t_B / k_I I_0). \quad (8)$$

Обмежимося тільки лінійною частиною рівняння (8). Тоді знаходимо час  $t_B$ , при якому  $e(\mathfrak{R}) = u_0$  і лічильник тактових імпульсів (ЛПІ) припиняє підрахунок кількості імпульсів від моменту подачі ЕЗІ на ПКЕ УЗВ:

$$t_B = k_I I_0 \varepsilon_{\lambda} \rho_C (H - L) \quad (9)$$

де  $\mathfrak{R} = H - L$ ;  $H$  – висота ємності;  $L$  – рівень рідини.

Рівняння (9) є ідеальною математичною моделлю статичної характеристики УЗКР і як видно, вона є лінійною. Знайдемо математичну модель для реальної статичної характеристики. Початкова

інтенсивність випромінювання  $I_0$  являє собою деяку імпульсну дельта-функцію Дірака і може бути представлена площею під обвідною. Інтенсивність випромінювання в ГС є змінною величиною, яка залежить від параметрів ПКЕ УЗВ і викликає додаткові ПВК. Прийmemo до уваги, що при  $e(\mathfrak{R}) = u_0$  процес фізичних перетворень в УЗП фактично припиняється, а далі починається програмна обробка кількості тактових імпульсів, які відрахував ЛПІ та розрахунок рівня рідини за відповідним алгоритмом. При цьому можуть мати місце наступні варіанти формування сигналу зупинки ЛПІ (рис. 2):

- за мінімальною опорною наругою, яка установлюється дещо вищою від рівня шумів ПКЕ (рис. 2, а);
- за максимумом обвідної УЗІ ЕРС (рис. 2, б);
- за половинною площею УЗІ ЕРС (рис. 2, в).

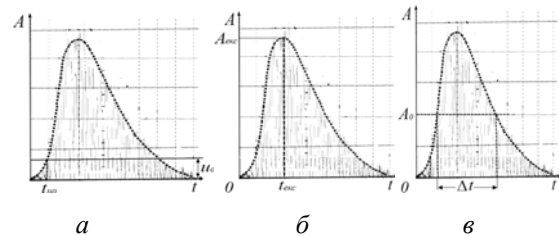


Рис. 2. Способи формування сигналу припинення роботи ЛПІ

Набільше розповсюдження отримав метод за мінімальним значенням опорної напруги. Для нього час, який відповідає установленому значенню опорної напруги для функцій  $\sin(\omega_1 t + \varphi_1)$  і  $\cos(\omega_2 t + \varphi_2)$  є незначним, але його зміна викликати похибку вимірювального контролю. Приймаючи до уваги сказане, враховуючи рівняння (6) та обмежившись його лінійною складовою, отримуємо наступне спрощене рівняння:

$$E(\mathfrak{R}) = K_0 (1 - \mathfrak{R} \varepsilon_{\lambda} \rho_C) (\omega_1 t + \varphi_1) \quad (10)$$

де  $K_0 = 0,0022 K_E R \omega^2 S^2 I_0 / z_0$ .

Так як  $E(\mathfrak{R}) = k_e N(\mathfrak{R}) \Delta t_T = k_e t_B$ , де  $k_e$  - коефіцієнт;  $N(\mathfrak{R})$  - кількість відрахованих тактових імпульсів тривалістю  $\Delta t_T$ , то рівняння (10) приймає наступну форму:

$$t_B(L) = K_{00} [1 - (H - L) \varepsilon_{\lambda} \rho_C] (\omega_1 t_{u_0} + \varphi_1) \quad (11)$$

де  $K_{00} = K_0 / k_e$ ;  $t_{u_0}$  - час за обвідною ЕРС, при котрому  $E(\mathfrak{R}) = u_0$ .

З рівняння (11) видно, що час вимірювального контролю  $t_B(L)$  залежить не тільки від параметрів ГС, але й від електричних параметрів ПКЕ, котрі визначають частоту власних коливань  $\omega_1$  струму, а також від кута його зсуву, котрий є функцією

температури нагріву УЗП. Так як зміщення фази  $\varphi_1$  приводить до зміни часу  $t_{uo}$ , то це приведе до збільшення кількості тактових імпульсів, а відповідно до появи ПВК. До основних недоліків цього методу є наступні:

- необхідність джерела, яке формує опорну напругу високої точності;
- зміна (деформація) переднього фронту обвідної УЗІ електрорушійної сили як за часом (старіння ПКЕ), так і через дію внутрішніх і зовнішніх впливових факторів;
- з метою підвищення точності рівнеміра опорна напруга повинна бути мінімальною.

Більш ефективним є метод визначення часу закінчення відліку вимірювального контролю за максимумом обвідної електричного УЗІ УЗП (рис. 1, б). Як показують експериментальні дослідження максимум обвідної не змінюється в широкому діапазоні зміни рівня рідини. Це дозволяє зменшити ПВК за рахунок деформації переднього фронту обвідної. Метод, показаного на рис. 1, в, заснований на принципі оброблення хроматографічної інформації і потребує додаткових теоретичних та експериментальних досліджень.

**2 Аналіз впливових факторів на роботу УЗР.**

Питання ПВК УЗР є важливим при їх розробці та експлуатації, так як необхідна інформація не тільки про значення вимірювальної величини, але й її достовірність, точність та межі, в яких знаходиться дійсне значення вимірюваного рівня рідини. УЗР характеризуються ПВК, які є наслідком недосконалості технології виготовлення УЗВ та УЗП, програмного забезпечення та умов експлуатації. Похибки УЗР з кільцевим рухом УЗМІ можна класифікувати за такими ознаками:

- за характером впливу та виникнення - систематичні та випадкові;
- за причиною виникнення та залежністю від швидкості зміни рівня: статичні та динамічні.

За характером впливу на статичну характеристику розрізняють адитивні, мультиплікативні та нелінійні складові похибок. Кожна з цих похибок може мати як систематичну, так і випадкову складову. ПВК умовно можна розділити на три групи: конструктивні, технологічні та експлуатаційні. До першої групи відносять джерела, які обумовлені вибраними схемними та програмними рішеннями. До другої групи можна віднести джерела, що визначаються порушеннями або недосконалістю технології виготовлення окремих елементів УЗКР. До третьої групи відносяться ПВК, які обумовлені різними внутрішніми та зовнішніми факторами, як температура, тиск, склад ГС, напруга живлення ЕВС, випадкові відхилення параметрів елементної бази від їх номінальних значень тощо. Вимірювальний процес в УЗР складається з наступних реологічних перетворень:

1. Енергії ЕЗІ з амплітудою  $E_0$ , яка створює в УЗВ напруженість електричного поля, перетворюється в електродинамічне зусилля (ЕДЗ)  $F_\delta$  (зусилля Ампера).

2. ЕДЗ, яке приводить до механічного руху МБ перетворюється на відстань  $x_0$  відхилення мембрани з ПКЕ від сталого положення.

3. Вільний механічний рух МБ, перетворюється в УЗК з кутовою частотою  $\omega$ .

4. Механічні УЗК перетворюються в ЕРС  $E_{П}$  ПКЕ, а відповідно напруженість  $H$  електромагнітного поля (ЕМП).

5. ЕМП перетворюється у вторинну механічну дію, яка направлена протилежно основним УЗК.

6 Механічні УЗК, котрі випромінюються в ГС, терплять відповідне поглинання ультразвукової енергії, що призводить до їх часткової деформації.

7. Ультразвукова енергія, яка дійшла до УЗП, перетворюється в переміщення його МБ теж з ультразвуковою частотою.

8. Переміщення МБ УЗП перетворюється в ЕРС ПКЕ, котра направляється в блок обробки вимірювальної інформації для розрахунку поточного значення рівня рідини.

На кожне реологічне перетворення діють впливові фактори, котрі призводять до відхилення вимірювальної величини від нормованого значення, а відповідно до появи ПВК. На рис. 3. приведена структурна схема зовнішніх і внутрішніх впливових факторів, які приводять до відхилення вимірювальної вихідної координати на процес перетворення УЗР.

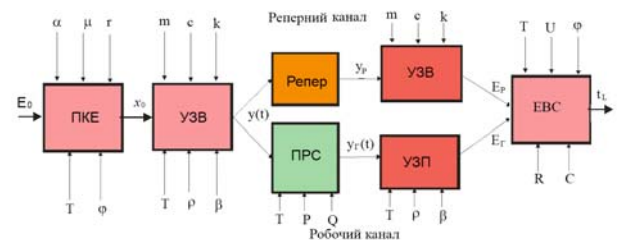


Рис. 3. Структурна схема впливових факторів

На схемі позначено:  $U$  - напруга живлення УЗКР;  $R, C$  - активний опір та ємність ПКЕ  $T, \varphi$  - температура і вологість навколишнього середовища;  $E_0$  - напруга ЕЗІ;  $\alpha$  - питома електропровідність ПКЕ;  $\mu$  - відносна магнітна сприйнятливості ПКЕ;  $r$  - умовний радіус ПКЕ;  $x_0$  - максимальне відхилення ПКЕ;  $P$  - тиск ГС;  $m, c, k$  - маса, жорсткість і коефіцієнт демпферування мембрани УЗВ;  $\beta$  - коефіцієнт тертя;  $y(t)$  - амплітуда УЗК;  $y_r$  - реперний сигнал;  $y_r(t)$  - УЗМІ, який пройшов ГС;  $E_p$  - ЕРС, яка створена реперним сигналом;  $E_r$  - ЕРС, яка створена робочим УЗІ;  $T, P$  - температура і тиск ГС відповідно;  $Q$  - концентрація ГС; ЕВС – електрична вимірювальна схема.

Аналіз впливових факторів показує, що найбільший вплив на роботу УЗР чинять наступні фактори: температура, тиск і хімічний склад ГС, в якому розповсюджуються УЗМІ. Температура чинить значну дію на парціальну густину компонентів газової суміші. Густина газу описується наступним рівнянням

$$\rho_{\Gamma} = MP/848ZT, \quad (12)$$

де  $M$  - молекулярна вага газу;  $P$  - тиск;  $Z$  - коефіцієнт.

Швидкість розповсюдження звуку в ГС

$$c = \sqrt{\chi P / \rho_{\Gamma}}, \quad (13)$$

де  $\chi$  - показник адиабати.

Таким чином на процес перетворень чинять дію різноманітні впливові фактори.

**2. Дослідження ПВК методом інтегрального матричного функціоналу.** З допомогою метрологічних характеристик оцінюються якість вимірювального приладу, перетворювача чи засобу контролю [10]. Засоби вимірювального контролю (ЗВК) описуються залежністю вихідної координати  $y$  від вхідної  $x$ , яка має наступну форму  $y = f(x, z_i)$ , де  $z_i$  - впливові параметри, котрі викликають додаткові ПВК. Така залежність називається статичною характеристикою, а її частина, для котрої нормовані метрологічні характеристики – градуйованими. Додаткові ПВК появляються внаслідок зміни як внутрішніх  $z_k$ , так і зовнішніх  $z_n$  факторів. Якщо  $z_k = z_{k0}$ , а  $z_n = z_{n0}$ , то вищезгадана залежність описуватиметься такою функцією:  $y_0 = f_0(x, z_{0k}, z_{0n})$ . При зміні внутрішніх  $z_k$  і зовнішніх  $z_n$  факторів останнє рівняння приймає таку форму:  $y_m = f[x, (z_{0k} \pm \Delta z_k), (z_{0n} \pm \Delta z_n)]$ , де індекс  $m$  показує кількість змін вихідної координати при зміні кожного впливового фактора або їх сукупності. Як правило, для визначеності додаткової ПВК  $\Delta y = y_0 - y_m$  використовується принцип автономності, суть якого полягає в тому, що додаткова ПВК визначається для окремо взятого впливового фактора, наприклад, температури навколишнього середовища, чи напруги живлення. Додаткові ПВК, які обумовлені основними впливовими факторами, як температура  $T_C$  навколишнього середовища, атмосферний тиск  $P_A$ , вологість повітря  $\varphi_{\Pi}$ , напруга  $U$  живлення ЕВС, зовнішні ЕМП  $H$  і деякі інші, вказуються в технічній документації на ЗВК. Якщо на цей засіб одночасно діють як внутрішні, так і зовнішні фактори, то сукупну додаткову похибку визначають або як суму всіх часткових додаткових похибок за формулою:

$$\Delta_{k,n} = \Delta_{1k} + \Delta_{2k} + \dots + \Delta_{kk} + \Delta_{1n} + \Delta_{2n} + \dots + \Delta_{nn},$$

або як корінь квадратний із суми квадратів часткових похибок (якщо ці похибки некорельовані)

$$\Delta_{k,n} = \sqrt{\Delta_{1k}^2 + \Delta_{2k}^2 + \dots + \Delta_{kk}^2 + \Delta_{1n}^2 + \Delta_{2n}^2 + \dots + \Delta_{nn}^2},$$

або для корельованих похибок за формулою:

$$\Delta_{k,n} = \sqrt{k_{1kn}\Delta_{1k}^2 + k_{2kn}\Delta_{2k}^2 + \dots + k_{kkn}\Delta_{kk}^2 + k_{1nk}\Delta_{1n}^2 + k_{2nk}\Delta_{2n}^2 + \dots + k_{nkn}\Delta_{nn}^2},$$

де  $k_{1kn}, k_{2kn}, \dots, k_{kkn}; k_{1nk}, k_{2nk}, \dots, k_{nkn}$  - вагові коефіцієнти.

Іноді для сильно корельованих додаткових похибок використовується наступна формула визначення сукупної додаткової похибки

$$\Delta_{kn} = \sqrt{(\Delta_{1k}^2 + \Delta_{2k}^2 + \dots + \Delta_{kk}^2) + (\Delta_{1n}^2 + \Delta_{2n}^2 + \dots + \Delta_{nn}^2) + 2(\Delta_{1k}\Delta_{2k} + \Delta_{1k}\Delta_{3k} + \dots + \Delta_{2k}\Delta_{3k} + \dots) + 2(\Delta_{1k}\Delta_{1n} + \Delta_{1k}\Delta_{2n} + \dots + \Delta_{kk}\Delta_{nn}) + \dots}.$$

Такі методи визначення сукупної додаткової ПВК можуть бути використані при лабораторних дослідженнях ЗВК. В умовах промислового використання таких багатопараметричних ЗВК додаткова похибка, як правило, обумовлюється одночасним впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів, визначення якої є актуальною задачею, особливо в умовах невизначеності характеру впливу цих факторів. ПВК - це відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірювальної величини. За дійсне приймається її теоретичне значення при постійних параметрах вимірювального перетворювача та навколишнього середовища. Для нормальних умов експлуатації вимірювального засобу вихідна координата описується таким рівнянням

$$y_0 = f(x, z_{10}, z_{20}, \dots, z_{k0}; z_{10}, z_{20}, \dots, z_{n0}).$$

Так як похідні для ідеальної статичної характеристики

$$\frac{\partial y_0}{\partial z_{1k0}} = K_{1K0};$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial z_{kk0}} = K_{KK0};$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial z_{2n0}} = K_{1N0}; \frac{\partial y_0}{\partial z_{2n0}} = K_{2N0}; \dots \frac{\partial y_0}{\partial z_{mn0}} = K_{NN0}$$

є сталими коефіцієнтами, то залежності є однозначною і може бути описані таким рівнянням:

$$y_0 = \bar{K}_{E0} f(x), \quad (14)$$

де  $\bar{K}_{E0}$  - еквівалентний коефіцієнт перетворення.

Коефіцієнт  $\bar{K}_{E0}$  при сталих зовнішніх і внутрішніх впливових факторах можна визначити зі структурної схеми перетворень, які мають місце у ЗВК. Наприклад, при послідовному з'єднанні перетворюючих ланок маємо

$$\bar{K}_{E0} = (K_{1K0} K_{2K0} \dots K_{KK0})^* \quad (15)$$

$$* (K_{1N0} K_{2N0} \dots K_{NN0}) = const$$

Якщо впливові фактори є змінними величинами, то еквівалентний коефіцієнт перетворення  $\bar{K}_E = var$ . У цьому разі можна прийняти, що кожній зміні коефіцієнта  $\bar{K}_E$  відповідатиме своя статична характеристика. Дія впливових факторів, котрі викликають додаткові похибки ЗВК здійснюється через коефіцієнти перетворення основних ланок його перетворення. На рис. 3.4 приведена структурна схема перетворень, на якій жирними лініями показані основні канали перетворень, на які чинять дію впливові фактори.

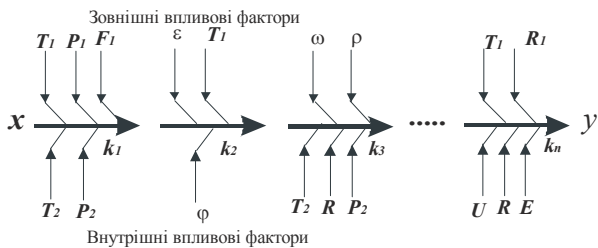


Рис. 4. Структурна схема перетворень УЗР

Вхідна вимірювальна величина  $x$  діє на перший перетворювач з коефіцієнтом перетворення  $k_1$ , вихідний сигнал котрого подається на перетворювач 2 з коефіцієнтом перетворення  $k_2$  і так далі. На виході останнього перетворювача з коефіцієнтом  $k_n$  створюється вихідний сигнал  $y$ , за величиною котрого оцінюється дійсне значення вхідного сигналу  $x$ . Точність оцінки сигналу  $x$  визначатиметься ступенем зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. Тобто:

$$x \Rightarrow y \pm \Delta y \left( \Delta T_1, \Delta P_1, \Delta F_1, \Delta T_2, \Delta P_2, \Delta \varepsilon, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \rho, \Delta R, \Delta U, \Delta E \right). \quad (16)$$

Коефіцієнти перетворення є функціями зовнішніх і внутрішніх впливових параметрів, тобто  $k_1 = f(T_1, P_1, F_1, T_2, P_2)$ ,  $k_2 = f(\varepsilon, T_1, \varphi)$ ,  $k_3 = f(\omega, \rho, T_2, R, P_2)$  і  $k_n = f(T_1, R_1, U, R, E)$ . З приведеного видно, що коефіцієнти перетворення мають спільні впливові параметри як  $T_1, T_2, P_2, R$  тощо. З цього випливає, що коефіцієнти перетворення можуть бути взаємозалежними.

Залежності коефіцієнтів перетворення при зміні впливових параметрів можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Тому в загальному випадку функції для коефіцієнтів перетворення можна розкласти в ряд Тейлора. Причому нелінійна квадратична та нелінійна кубічна складові для ЗВК, як правило, повинні мати протилежну дію, що забезпечує зменшення сумарної ПВК. При подальшому дослідженні приймемо, що нелінійні складові похибок є незначними, якими можна знехтувати. Тоді при дії впливових параметрів для коефіцієнтів перетворення маємо:

$$\Delta k_1 = r_{11} \Delta T_1 + r_{12} \Delta P_1 + r_{13} \Delta F_1 + r_{14} \Delta T_2 + r_{15} \Delta P_2 = \Delta k_{11} + \Delta k_{12} + \Delta k_{13} + \Delta k_{14} + \Delta k_{15}$$

$$\Delta k_2 = r_{21} \Delta \varepsilon + r_{22} \Delta T_1 + r_{23} \Delta \varphi = \Delta k_{21} + \Delta k_{22} + \Delta k_{23};$$

$$\Delta k_3 = r_{31} \Delta \omega + r_{32} \Delta \rho + r_{33} \Delta T_2 + r_{34} \Delta R + r_{35} \Delta P_2 = \Delta k_{31} + \Delta k_{32} + \Delta k_{33} + \Delta k_{34} + \Delta k_{35}$$

$$\Delta k_n = r_{n1} \Delta T_1 + r_{n2} \Delta R_1 + r_{n3} \Delta U + r_{n4} \Delta R + r_{n5} \Delta E = \Delta k_{n1} + \Delta k_{n2} + \Delta k_{n3} + \Delta k_{n4} + \Delta k_{n5}$$

де  $r_{11}, \dots, r_{15}; r_{21}, \dots, r_{23}; r_{31}, \dots, r_{35}; r_{n1}, \dots, r_{n5}$  - коефіцієнти впливу.

Для номінальних значень коефіцієнтів перетворення відповідно отримуємо:

$$k_{10} = r_{11} T_{10} + r_{12} P_{10} + r_{13} F_{10} + r_{14} T_{20} + r_{15} P_{20} = k_{11}^0 + k_{12}^0 + k_{13}^0 + k_{14}^0 + k_{15}^0$$

$$k_{20} = r_{21} \varepsilon_0 + r_{22} T_{10} + r_{23} \varphi_0 = k_{21}^0 + k_{22}^0 + k_{23}^0$$

$$k_{30} = r_{31} \omega_0 + r_{32} \rho_0 + r_{33} T_{20} + r_{34} R_0 + r_{35} P_{20} = k_{31}^0 + k_{32}^0 + k_{33}^0 + k_{34}^0 + k_{35}^0$$

$$k_{n0} = r_{n1} T_{10} + r_{n2} R_{10} + r_{n3} U_0 + r_{n4} R_0 + r_{n5} E_0 = k_{n1}^0 + k_{n2}^0 + k_{n3}^0 + k_{n4}^0 + k_{n5}^0$$

де  $T_{10}, P_{10}, F_{10}, T_{20}, P_{20}, \varepsilon_0, \varphi_0, \omega_0, \rho_0, R_0, R_{10}, U_0, E_0$  - номінальні значення впливових параметрів.

Якщо діапазон вимірювального контролю розділений на  $n$  ділянок, то рівняння номінальної статичної характеристики може бути представлено в такій матричній формі

$$\begin{pmatrix} y_{10} \\ y_{20} \\ y_{30} \\ \dots \\ y_{n0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{20} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{30} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{m0} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Тоді для кожної точки статичної характеристики маємо:

$$y_{10} = (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_1 = K_0x_1.$$

$$y_{n0} = (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_n = K_0x_n.$$

У реальних умовах експлуатації впливові параметри є змінними величинами, за рахунок чого коефіцієнти перетворення  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_b$  відхиляються від їх номінальних значень, що призводить до відповідної зміни вихідної координати  $y$  на величину похибки  $\pm \Delta y_i$ , де  $i$  - кількість впливових параметрів. У цьому випадку вихідна координата  $y$  може приймати різні значення навіть при  $x = const$ . Для такого випадку кожне значення вхідної координати описуватиметься наступною матрицею

$$|y_i| = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & \dots & k_{1(i-1)} & k_{1i} \\ k_{2i} & k_{21} & k_{23} & k_{23} & \dots & k_{2(i-2)} & k_{2(i-1)} \\ k_{3(i-1)} & k_{3i} & k_{31} & k_{32} & \dots & k_{3(i-3)} & k_{3(i-2)} \\ k_{4(i-2)} & k_{4(i-1)} & k_{4i} & k_{41} & \dots & k_{4(i-4)} & k_{4(i-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{(n-1)(i-2)} & k_{(n-1)(i-1)} & k_{(n-1)(i-1)} & k_{(n-1)i} & \dots & k_{(n-1)i} & k_{(n-1)} \\ k_{n2} & k_{n3} & k_{n4} & k_{n5} & \dots & k_{ni} & k_{n1} \end{pmatrix} * |x_1|.$$

З матричного рівняння можна визначити дію кожного впливового параметра, а також їх сукупності на вихідну координату ЗВК. Так як часткові коефіцієнти перетворення є змінними величинами і залежать від зміни впливових параметрів, тобто  $k_{ni} = k_{(ni)0} \pm \Delta k_{ni}$ , то, враховуючи лінійність статичної характеристики, можна записати матричне рівняння для ПВК при  $x_1 = const$  у такій формі:

$$|\Delta y_i| = \begin{pmatrix} \Delta k_{11} & \Delta k_{12} & \Delta k_{13} & \Delta k_{14} & \dots & \Delta k_{1(i-1)} & \Delta k_{1i} \\ \Delta k_{2i} & \Delta k_{21} & \Delta k_{22} & \Delta k_{23} & \dots & \Delta k_{2(i-2)} & \Delta k_{2(i-1)} \\ \Delta k_{3(i-1)} & \Delta k_{3i} & \Delta k_{31} & \Delta k_{32} & \dots & \Delta k_{3(i-3)} & \Delta k_{3(i-2)} \\ \Delta k_{4(i-2)} & \Delta k_{4(i-1)} & \Delta k_{4i} & \Delta k_{41} & \dots & \Delta k_{4(i-4)} & \Delta k_{4(i-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta k_{n2} & \Delta k_{n3} & \Delta k_{n4} & \Delta k_{n5} & \dots & \Delta k_{ni} & \Delta k_{n1} \end{pmatrix} * |x_1|,$$

де  $\Delta y_1$  - абсолютна ПВК, яка обумовлена зміною впливових параметрів;  $\Delta k_{ni}$  - зміна часткового коефіцієнта перетворення.

Розрахунок результату вимірювального контролю виконується за таким алгоритмом

$$y_1 = \left[ \begin{pmatrix} k_{11}k_{21}k_{31}k_{41} \dots k_{n1} + k_{12}k_{22}k_{32}k_{42} \dots k_{n2} + k_{13}k_{23}k_{33}k_{43} \dots k_{n3} + \dots \\ + k_{14}k_{24}k_{34}k_{44} \dots k_{n4} + \dots + k_{1i}k_{2i}k_{3i}k_{4i} \dots k_{ni} \\ - (k_{1i}k_{2(i-1)}k_{3(i-2)} \dots k_{n2} + k_{1(i-1)}k_{2(i-2)}k_{3(i-3)} \dots k_{n3} + \dots) \\ + k_{14}k_{22}k_{3i} \dots k_{ni} + k_{13}k_{21}k_{3(i-1)} \dots k_{ni} + \dots \end{pmatrix} \right] * x_1$$

Кожна складова цього рівняння являє собою еквівалентний передавальний коефіцієнт за впливовими параметрами. Так, наприклад, для структурної схеми рис. 3 маємо наступне рівняння:

$$y_1 = r_1 T_1 \varepsilon \omega \dots T_1 + r_2 P_1 T_1 \rho \dots R_1 + r_3 F_1 \varphi T_2 \dots U + r_4 T_2 O R_0 R_0 + \dots + r_n P_2 O P_2 E - r_{1i} P_1 T_1 R \dots E - \dots, \quad (17)$$

де  $r_1 = r_{11}r_{21}r_{31} \dots r_{n1}$ ;  $r_2 = r_{12}r_{22}r_{32} \dots r_{n2}$ ;  $r_3 = r_{13}r_{23}r_{33} \dots r_{n3}$ ;  $r_4 = r_{14}r_{24}r_{34} \dots r_{n4}$  - сталі величини, які незалежні від зміни впливових параметрів.

Продиференціювавши рівняння (17) за змінними впливовими параметрами отримуємо:

- для мультиплікативної складової:

$$\Delta y_M = \alpha_1 \Delta T_1 + \alpha_2 \Delta P_1 + \alpha_3 \Delta F_1 + \alpha_4 \Delta \varepsilon + \alpha_5 \Delta \omega + \alpha_6 \Delta \rho + \alpha_7 \Delta T_2 + \alpha_8 \Delta \varphi + \alpha_9 \Delta U + \alpha_{10} \Delta R + \dots; \\ + \alpha_{11} \Delta R_1 + \alpha_{12} \Delta E + \alpha_{13} \Delta P_2$$

- для нелінійної квадратичної складової:

$$\Delta y_{H2} = \beta_1 (\Delta T_1 \Delta \varepsilon + \Delta T_1 \Delta \omega + \Delta \varepsilon \Delta \omega) + \beta_2 (\Delta P_1 \Delta T_1 + \Delta P_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta R_1) + \dots; \\ + \beta_3 (\Delta F_1 \Delta \varphi + \Delta F_1 \Delta T_2 + \Delta F_1 \Delta U + \dots) + \dots$$

- для нелінійної кубічної складової:

$$\Delta y_{H3} = \gamma_1 (\Delta T_1 \Delta \varepsilon \Delta \omega + \dots) + \gamma_2 \left( \Delta P_1 \Delta T_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta T_1 \Delta R_1 + \dots \right) + \dots$$

Таким чином встановлено, що ЗВК, які мають номінальну та робочу статичні характеристики, характеризуються наявністю мультиплікативної та нелінійних складових, обумовлених відхиленнями впливових факторів від їх номінальних значень, можна розглядати як оптимізаційну задачу Ейлера з одним закріпленням кінцем. Рішення оптимізаційної задачі дозволяє визначити вплив того чи іншого впливового фактора на ПВК та відповідним чином їх оптимізувати не тільки у вимірювальній точці але й за шкалою. Метод дозволяє оптимізувати статичну характеристику ЗВК за рахунок вибору таких конструктивних параметрів, при котрих різниця між приростами нелінійності ДВК були б мінімальними. За відповідним алгоритмом можна розраховувати дію впливового параметра на положення статичної характеристики та вводити поправки щодо підвищення точності вимірювального контролю.

**3. Дослідження похибок УЗР методом варіаційної матриці.** Метод дослідження ПВК заснований на розкладанні матриці, яка описує

статичну характеристику УЗР, у ряд Тейлора за малими приростами та обмеженням тільки лінійної її частини. У загальному випадку рівняння статичної характеристики УЗР при способі вимірювання рівня рідини за часом проходження УЗМІ відстані  $\mathfrak{R}_n$  в ГС у матричній формі має вигляд

$$\bar{\Omega}_j = (\bar{K}_0 \pm \Delta\bar{K})\mathfrak{R}_n, \quad (18)$$

де  $\bar{\Omega}_j$  - матриця зміни вихідної координати в  $j$ -ій точці градуйованої характеристики;  $\bar{K}_0$  - матриця номінальних значень коефіцієнтів перетворення;  $\Delta\bar{K}$  - матриця відхилень коефіцієнтів перетворення, викликаних впливовими факторами;  $\mathfrak{R}_n$  - матриця зміни вхідної координати (товщини ГС) в  $n$ -ій точці.

Члени вищого порядку ряду не враховуються або рахуються малими. Як правило, їх уводять у невиключені систематичні похибки. Експериментальні дослідження показують, що для багатьох ЗВК при такому підході до дослідження ПВК виникають суттєві відхилення від їх теоретичних значень. Обмеження тільки лінійною частиною ряду розкладання функції перетворення є недостатнім. Задовільна адекватність має місце при обмеженні ряду розкладання такої функції до третього порядку і тільки в тому випадку, коли нелінійна квадратична складова похибки протилежна за знаком до мультиплікативної. Установлено, що можуть бути впливові фактори, зміна котрих викликає суттєві нелінійні складові похибок. З іншої сторони, коефіцієнти впливу похибок, які є частковими похідними, залежать від значення впливового параметра і не є сталими вздовж ДВК. Дослідження ПВК методом інтегрального функціоналу направлений на узагальнення та доповнення існуючих. Як і для відомих методів, реальна статична характеристика описується деякою функцією  $\Phi(L) = f(L, \bar{\beta})$ , де  $L$  - рівень рідини;  $\bar{\beta}$  - вектор узагальнених впливових зовнішніх і внутрішніх факторів. При відхиленні вектора  $\bar{\beta}$  від його номінального значення  $\bar{\beta}_0$  функціональна залежність також змінюється на  $\delta\Phi(l)$ , тобто

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_j(\mathfrak{R}_n) \pm \delta\bar{\Omega}_j(\mathfrak{R}_n) &= \bar{K}_0\mathfrak{R}_n \pm \Delta\bar{K}\mathfrak{R}_n = \\ &= \bar{\Phi}_0(\bar{K}_0, \mathfrak{R}) \pm \bar{\Phi}(\Delta\bar{K}, \mathfrak{R}_n) \end{aligned}, \quad (19)$$

де  $\bar{\Phi}_0(\bar{K}_0, \mathfrak{R}_n)$  - номінальна функція статичної характеристики при дії впливових параметрів;  $\bar{\Phi}(\Delta\bar{K}, \mathfrak{R}_n)$  - зміна функції статичної характеристики при дії впливових параметрів.

Рівняння (19) запишемо в наступній формі

$$\begin{aligned} \delta\bar{\Omega}_j(\mathfrak{R}_n) &= \bar{\Omega}_{0j}(\mathfrak{R}_n) - \bar{\Omega}_j(\mathfrak{R}_n) = \\ &= \bar{\Phi}_0(\mathfrak{R}, \bar{K}_0) - \bar{\Phi}(\mathfrak{R}, \bar{K}) \end{aligned}, \quad (20)$$

де  $\bar{\Omega}_{0j}(\mathfrak{R}_n)$  - функція-матриця при номінальному значенні впливових параметрів.

Рівняння (20) являє собою різницю двох матричних функцій  $\bar{\Phi}_0(\mathfrak{R}, \bar{K}_0)$  і  $\bar{\Phi}(\mathfrak{R}, \bar{K})$ . Згідно з теорією варіаційного числення ця різниця називається приростом або варіацією  $\delta\bar{\Omega}(\mathfrak{R}_n)$  векторного аргументу  $\bar{\Omega}(\mathfrak{R}_n)$  деякого функціоналу  $\sqrt{[\bar{\Omega}(\mathfrak{R}_n)]}$ . Припустимо, що  $\bar{\Omega}(\mathfrak{R}_n)$  є довільною функцією в деякому класі функцій. Тоді з рівняння (20) випливає, що для всіх значень рівня варіація є абсолютною похибкою. Тоді отримуємо:

$$\bar{\Delta}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}) = \bar{\Phi}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0 \pm \delta\bar{K}_0) - \bar{\Phi}_0(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0)$$

або

$$\bar{\Phi}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0 \pm \delta\bar{K}_0) = \bar{\Phi}_0(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0) - \bar{\Delta}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}). \quad (21)$$

Ліву частину рівняння (21) розкладемо в ряд Тейлора за змінними  $\mathfrak{R}_n$  і  $\bar{K}_n$ . У результаті маємо:

- мультиплікативну складову:

$$\bar{\Delta}_\mu(\mathfrak{R}_n, \bar{K}) = \frac{\partial\bar{\Phi}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0)}{\partial\bar{K}}(\delta\bar{K}); \quad (22)$$

- нелінійну квадратичну складову

$$\bar{\Delta}_{H2}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}) = \frac{\partial^2\bar{\Phi}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0)}{2\partial\bar{K}^2}(\delta\bar{K})^2; \quad (23)$$

- нелінійну кубічну складову

$$\bar{\Delta}_{H3}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}) = \frac{\partial^3\bar{\Phi}(\mathfrak{R}_n, \bar{K}_0)}{3\partial\bar{K}^3}(\delta\bar{K})^3; \quad (24)$$

Адитивна складова може виникати в двох випадках: якщо функція  $\Phi_0(0, \bar{K}_0) \neq 0$ , тобто шкала ЗВК зміщена на величину  $\bar{\Delta}_{a0}$ , і при  $\bar{\Phi}(0, \bar{K}) \neq 0$ , коли джерелом похибки є впливовий фактор. У першому випадку адитивна складова ПВК являє собою суму зміщення  $\bar{\Delta}_{a0}$ , мультиплікативної та нелінійних складових, тобто:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_a &= \bar{\Delta}_{a0} + \frac{\partial\bar{\Phi}(0, \bar{K}_0)}{\partial\bar{K}}(\delta\bar{K}) + \\ &+ \frac{\partial^2\bar{\Phi}(0, \bar{K}_0)}{2\partial\bar{K}^2}(\delta\bar{K})^2 + \frac{\partial^3\bar{\Phi}(0, \bar{K}_0)}{3\partial\bar{K}^3}(\delta\bar{K})^3 + \dots \end{aligned}, \quad (25)$$

а для другого випадку -  $\bar{\Delta}_a = 0$ .

Так як в УЗР статична характеристика є обмеженою зверху за рахунок так званої «мертвої» зони і знизу, то загальна ПВК УЗР матиме вигляд:



$$\bar{\Delta}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) = \bar{\Delta}_a + \bar{\Delta}_\mu(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) + \bar{\Delta}_{H2}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) + \bar{\Delta}_{H3}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) + \sigma(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) \quad (26)$$

Нехай статична характеристика УЗР являє собою функціональну залежність  $\bar{\Omega}(\bar{\mathfrak{R}}_n) = \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K})$ , де  $\bar{\Omega}(\bar{\mathfrak{R}})$  - вихідний сигнал УЗР;  $\bar{K}$  - деякий узагальнений змінний параметр. Впливові фактори приводять до відхилення цього параметра від нормованого значення, а відповідно, до появи ПВК. Якщо прийняти, що адитивна складова ПВК є незначною й нею можна знехтувати, то задача зводиться до оптимізаційної задачі з одним закріпленим кінцем. Функціонал функції, яка описує статичну характеристику УЗР, являє собою площу під цією кривою і її можна описати таким чином:

$$\bar{S} = \int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \bar{\Phi}(\bar{\Omega}_j, \bar{\mathfrak{R}}_n) d\bar{\mathfrak{R}}_n \quad (27)$$

де  $\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}$  - матриця вимірювальної величини, яка відповідає верхньому значенню ДВК.

Нехай при нормованих значеннях впливових факторів верхня точка ДВК належить прямій, яка з'єднує обидва кінці шкали УЗКР. Тоді площина під цією кривою являє собою наступний функціонал:

$$\bar{S}_0 = 0,5 \bar{\mathfrak{R}}_{n0} \bar{\Omega}_j, \quad (28)$$

де  $\bar{\Omega}_j$  - матриця максимальних значень вихідного сигналу.

Різниця між площами, обумовленими функціоналами  $\bar{S}$  і  $\bar{S}_0$ , дає приріст  $\Delta\bar{S}$ , котрий намагається до нуля при їх рівності або до деякого значення  $\bar{\varepsilon}$ :

$$\Delta\bar{S} = \int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\Omega}(\bar{\mathfrak{R}}_n)) - 0,5\Phi_0(\bar{\mathfrak{R}}_n) \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} = \bar{\varepsilon} \rightarrow 0. \quad (29)$$

Вихідний сигнал УЗР:

$$\bar{\Omega}_j(\bar{\mathfrak{R}}_n) = \bar{\mathfrak{R}}_{n0}(\bar{\Omega}_j) \pm \delta\bar{\mathfrak{R}}_{n0}(\bar{\Omega}_j),$$

де  $\delta\bar{\Phi}(\bar{\Omega}_j)$  - її варіація.

Тоді, розклавши підінтегральну функцію рівняння (29) в ряд Тейлора та обмежившись його лінійною частиною, з врахуванням того, що  $\bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\Omega}_j) = \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\Omega}_j, \bar{K})$ , отримуємо:

$$\int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\Omega}_j, \bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n \pm \int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \frac{\partial \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\Omega}_j, \bar{K})}{\partial \bar{K}} (\delta\bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n - 0,5\Phi_0(\bar{\Omega}_j) \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} = \bar{\varepsilon} \rightarrow 0$$

У рівнянні невідомим параметром є тільки матриця варійованого параметра  $\bar{K}$ , вимірювана величина та вихідний сигнал, які відповідають кінцю ДВК. Після інтегрування цього рівняння

отримуємо матричне критеріальне рівняння, дійсний корінь котрого й буде тим оптимальним значенням варійованого параметра, при якому статична характеристика УЗР буде максимально близькою до лінійної. Приймаючи до уваги, що матриця параметра  $\bar{K}$  функціонально пов'язана з основними конструктивними та технологічними параметрами УЗР, то з отриманої рівності можна визначити їх оптимальне співвідношення. Під впливом різних факторів статична характеристика УЗР змінює своє положення (її верхній кінець переміщується вгору або вниз при сталому значенні матриці вимірювальних величин  $\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}$ ). Тоді положення лінії, яка з'єднує дві крайні точки статичної характеристики, теж змінюватиметься. Функціональна матриця такої характеристики матиме вигляд

$$\bar{S}'_0 = (0,5 \pm \bar{\delta}_{\Pi}) \bar{\Phi}_0 \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} \quad (30)$$

де  $\bar{\delta}_{\Pi}$  - вектор відносного відхилення верхнього кінця ДВК, яке залежить від величини впливового фактора.

З урахуванням (30) критеріальне рівняння приймає наступну форму:

$$\int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n \pm \int_0^{\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}} \frac{\partial \bar{\Phi}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K})}{\partial \bar{K}} (\delta\bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n - (0,5 \pm \bar{\delta}_{\Pi}) \bar{\Phi}_0 \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} = 0 \quad (31)$$

Матричне рівняння (31) містить дві змінні: матричний вектор змінного параметр  $\bar{K}$  і відносне відхилення  $\bar{\delta}_{\Pi}$ . Кожному значенню  $\bar{\delta}_{\Pi}$  відповідає таке значення  $\bar{K}$ , при котрому виконується рівність (31). Залежність  $\Delta\bar{K} = \bar{\Phi}(\bar{\delta}_{\Pi})$  показує зміщення верхньої частини ДВК, а відповідно, відхилення останньої від її нормованого положення. Відхилення  $\bar{\delta}_{\Pi}$  можна знайти як відношення складової абсолютної похибки або її повного значення до функції  $\Phi_0(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K})$  при  $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_{n\Pi}$ . Тоді маємо:

- мультиплікативна складова:

$$\bar{\delta}_{\Pi\mu} = \frac{\bar{\Delta}_\mu(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K})}{\bar{\Phi}_0(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K}_0)} = N_\mu \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi}; \quad (32)$$

- нелінійна квадратична складова:

$$\bar{\delta}_{\Pi H2} = \frac{\bar{\Delta}_{H2}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K})}{\bar{\Phi}_0(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K}_0)} = N_{H2} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right)^2; \quad (33)$$

- нелінійна кубічна складова:

$$\bar{\delta}_{\Pi H3} = \frac{\bar{\Delta}_{H3}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K})}{\bar{\Phi}_0(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K}_0)} = N_{H3} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right)^3; \quad (34)$$

- загальна похибка вимірювального контролю:

$$\bar{\delta}_{\Pi 0} = \frac{\bar{\Delta}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K})}{\bar{\Phi}_0(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}, \bar{K}_0)} = \left[ 1 + \frac{N_{H2}}{N_{\mu}} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right) + \frac{N_{H3}}{N_{\mu}} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right)^2 \right] N_{\mu} \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi}, \quad (35)$$

де  $N_{\mu}, N_{H2}, N_{H3}$  - коефіцієнти впливової величини  $\chi$ ;  $\bar{\Delta}\chi$  - матриця приростів.

Якщо вираз у квадратних дужках рівняння (35) близький до одиниці, то повна похибка наближається до мультиплікативної складової. Якщо нелінійна квадратична складова протилежна за знаком до мультиплікативної, то рівняння (35) приймає вигляд:

$$\bar{\delta}_{\Pi 0} = \left[ 1 - \frac{N_{H2}}{N_{\mu}} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right) + \frac{N_{H3}}{N_{\mu}} \left( \frac{\bar{\Delta}\chi}{\chi} \right)^2 \right] \bar{\delta}_{\mu}. \quad (36)$$

Для дослідження похибок УЗР з кільцевим рухом УЗМІ використаємо критеріальне рівняння, яке дає наступну форму:

$$\int_0^{t_{\Pi}} \Phi(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) dt \pm \int_0^{t_{\Pi}} \frac{\partial \Phi(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K})}{\partial \bar{K}} (\delta \bar{K}) dt - (0,5 \pm k_t \bar{\delta}_{\Pi}) \bar{t}_{\Pi} \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} = 0 \quad (37)$$

де  $\bar{t}_{\Pi} = k_t \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}$ ,  $\bar{t} = k_t \bar{\mathfrak{R}}_n$  - матриця максимального та поточного часу;

$k_t$  - коефіцієнт перетворення;  $\Phi(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K})$  - матрична функція вихідного сигналу від відстані  $\bar{\mathfrak{R}}_n$  та впливового параметра  $\bar{K}$ ;  $\bar{\delta}_{\Pi}$  - матриця відносних похибок, які притаманні кінцю ДВК;  $\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}$  - матриця поточного та кінцевого значення ДВК;

У рівнянні (37) змінним параметром є матриця впливових величин  $\bar{K}$  та відносного відхилення  $\bar{\delta}_{\Pi}$ . Залежність  $\Delta \bar{K} = \Phi(\bar{\delta}_{\Pi})$  показує зміщення верхньої точки ДВК, а відповідно, відхилення останньої від її нормованого положення. Матриця відхилень  $\bar{\delta}_{\Pi}$  може бути знайдена як відношення тої чи іншої складової абсолютної похибки або її повного значення до номінальної функції  $\Phi_0(\bar{t}, \bar{K})$  при  $\mathfrak{R}_n = \mathfrak{R}_{n\Pi}$ . Впливовим може бути як деякий індивідуальний параметр, наприклад, амплітуда ЕЗІ, електромагнітне поле, температура, тиск ГС, його концентрація, так й узагальнюючий, яким може би деяка сукупність фізичних параметрів, пов'язаних між собою певною функціональною залежністю. Виконаємо дослідження основних ПВК УЗР, обумовлених різними індивідуальними та сукупними впливовими факторами. Якщо для ДВК

$\bar{\delta}_{\Pi} = 0$ , то УЗР описуватиметься таким інтегральним рівнянням:

$$\int_0^{t_{\Pi}} t(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}_0) d\bar{\mathfrak{R}}_n \pm \int_0^{t_{\Pi}} \frac{\partial t(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}_0)}{\partial \bar{K}} (\delta \bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n - (0,5) \bar{t}_{\Pi} \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi} = 0 \quad (38)$$

де  $\bar{t}(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}_0)$ ,  $\bar{t}_{\Pi}$  - матриця поточних і максимальних значень вихідного сигналу;  $\bar{K}_0$  - матриця номінальних значень впливового параметра.

Для оптимізаційної задачі з одним закріпленням кінцем, коли початкова відстань  $\bar{\mathfrak{R}}_n = 0$ , площа під ДВК  $S_0 = 0,5 t_{\Pi} \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}$ . Для лінійної характеристики ДВК при  $\bar{K} = \bar{K}_0 = k \bar{\mathfrak{R}}_n$ , де  $k$  - деяка стала, маємо:

$$\int_0^{t_{\Pi}} t(\bar{\mathfrak{R}}_n, \bar{K}) d\bar{\mathfrak{R}}_n = 0,5 t_{\Pi} \bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}. \quad (39)$$

Матрицею відносних похибок  $\bar{\delta}_{\Pi}$  може бути як мультиплікативна, так і нелінійні складові загальної ПВК. Для складових похибок можна записати наступні рівняння:  $\bar{\Delta}_{\mu} = K_{\mu}(\chi_0) \bar{\Delta}_{\chi}$ ,  $\bar{\Delta}_{H2} = K_{H2}(\chi_0) \bar{\Delta}_{\chi}^2$ ,  $\bar{\Delta}_{H3} = K_{H3}(\chi_0) \bar{\Delta}_{\chi}^3$ . Так як у методі матричного функціоналу використовується матриця відносних ПВК, то доцільно матрицю загальної похибки записати у наступному вигляді:

$$\bar{\delta}_{\Sigma} = \pm \bar{K}_a \bar{\delta}_a + \bar{K}_{\mu}^0 \bar{\delta}_{\chi} + \bar{K}_{H2}^0 \bar{\delta}_{\chi}^2 - \bar{K}_{H3}^0 \bar{\delta}_{\chi}^3, \quad \text{де } \bar{\delta}_{\Sigma} = \bar{\Delta}_{\Sigma} / \bar{t}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi}); \quad \bar{\delta}_{\chi} = \bar{\Delta}_{\mu} / \chi_0; \quad \bar{\delta}_{H2} = (\bar{\Delta}_{H2} / \chi_0)^2; \quad \bar{\delta}_{H3} = (\bar{\Delta}_{H3} / \chi_0)^3; \quad \bar{K}_{\mu}^0 = \bar{K}_{\mu}(\chi_0) \frac{\chi_0}{\bar{t}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi})};$$

$$\bar{K}_{H2}^0 = \bar{K}_{H2}(\chi_0) \frac{\chi_0^2}{\bar{t}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi})}; \quad \bar{K}_{H3}^0 = \bar{K}_{H3}(\chi_0) \frac{\chi_0^3}{\bar{t}(\bar{\mathfrak{R}}_{n\Pi})}; \quad \bar{K}_a$$

- матриця коефіцієнтів впливу для адитивної відносної похибки;  $\bar{\delta}_a$  - матриця адитивної відносної похибки.

**3. Висновки.** Процес формування ультразвукового механічного імпульсу, який передається через газове середовище та поступає в блок обробки вимірювальної інформації для розрахунку рівня рідини, складається з наступних незворотних реологічних переходів (НРП): зусилля механічних ультразвукових коливань, які пройшли газове середовище, в механічні коливання мембранного блоку з п'єзокерамічним елементом ультразвукового приймача; механічних коливань п'єзокерамічного елемента в електрорушійну силу, котра викликає струм в п'єзокерамічному елементі; перетворення струму в електродинамічне зусилля, котре приводить до вторинних механічних коливань

мембранного блоку та створення вторинної електрорушійної сили.

Кожний незворотний реологічний перехід описується математичною моделлю, яка показує вплив електрофізичних параметрів на точність вимірювального контролю. Показано, що джерелом похибок рівнеміра є не тільки газове середовище, але й п'єзокерамічний елемент, фізичні параметри якого змінюються не тільки від зміни внутрішніх і зовнішніх параметрів, але й з часом експлуатації за рахунок старіння.

Для оцінки похибок вимірювального контролю рівнемірів запропоновано метод матричного функціоналу, який дозволяє визначити похибки вимірювального контролю як за діапазоном вимірювального контролю, так і за зміною впливових факторів, а також виконувати їх оптимізацію в процесі вимірювання. Показано, що діагональний розрахунок матриці являє собою окремі послідовні реологічні перетворення, котрі створюють відповідні часткові вимірювальні канали, за якими можна оцінити відповідні складові похибки.

### Література

- Subhash, N N; Balasubramaniam, K. (2014). Fluid level sensing using ultrasonic waveguides. [Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring](#), Volume 56, Number 11, November, pp. 607-612(6) [The British Institute of Non-Destructive Testing](#).
- Moore, P. I., Drown G. J., & Jackson D. A. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modeled with theoretical velocity profiles: metrology [Text] / P.I. Moore, G. J. Drown, & D. A. Jackson Meas. Sci. Technol. 11, 1802-1811.
- Ultrasonic level measurement [Електронний ресурс]: Level: Technical Information / Endress+Hauser GmbH+Co.KG. – Endress+Hauser GmbH+Co.KG, 2002. – (Endress+Hauser. Описание продукции, июнь 2006) – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): кольор.; 12 см. – Систем. вимоги: 500 MHz; 256 Mb RAM; CD-ROM Drive; Windows 2000/XP. Acrobat Reader. – Назва з титул. екрану.
- Пат. 82594 Україна, МПК G01S15/00, G01F23/28. Спосіб вимірювання рівня рідких середовищ і ультразвуковий рівнемір [Текст] / Лагода Д. П., Метьолкін М. І., Посошко В. Н., Уваров А. Я.; заявник і патентовласник товариство з обмеженою відповідальністю Науково-виробниче підприємство «Мікротерм». - №a200608554; заявл. 31.07.06; опубл. 25.04.08. Бюл. № 8. – 3 с.; іл.
- Ultrasonic level measurement [Електронний ресурс]: Level: Technical Information / Endress+Hauser GmbH+Co.KG. – Endress+Hauser GmbH+Co.KG, 2002. – Endress+Hauser. [Text].
- Froysa, K-E., & Lunde, P. (2001, January 28-31). A ray theory approach to investigate the influence of flow velocity profiles on transit times in ultrasonic flow meters for gas and liquid [Text] / K-E. Froysa, & P. Lunde. Paper presented at the 24 Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Ustaoset, Norway.
- Пат. 74227 Україна, МПК G01F 23/28 (2006/01). Ультразвуковий пристрій для вимірювання рівня середовищ з нерівномірною поверхнею [Текст] / Стенцель Й. І., Томсон А. В., Шаповалов О.І., Літвінов К. А., Рябіченко А. В.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. - № u201203182; заявл. 19.03.2012; опубл. 25.10.2012. Бюл. № 20. – 3 с.: іл.
- Стенцель, Й. І., Томсон А. В. Електродеформаційні процеси в п'єзоелектричних перетворювачах [Текст] / Й.І. Стенцель, А. В. Томсон. // Системы контроля и управления технологическими процессами. Сборник научных статей / Под общей редакцией В.В. Елисеева. – Луганск: Світлиця, 2006. – С. 144 – 149. – Бібліогр.; с. 149. – 1000 екз.
- Пат. 110220 Україна, МПК G01F 23/296 (2006/01). Ультразвуковий пристрій для контролю рівня рідких середовищ [Текст] / Стенцель Й. І., Літвінов К. А., Рябіченко А. В.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. - № a201305151; заявл. 22.04.2013; опубл. 10.12.2015. Бюл. № 23. – 3 с.: іл.
- Стенцель, И. И., Томсон А. В. Математические модели ультразвуковых датчиков уровня веществ / И. И. Стенцель, А. В. Томсон. // Вопросы химии и химической технологии. - Днепропетровск: УГХТУ, 2007. – Выпуск №5. – С. 182 – 185. Бібліогр.; с. 185.

### References

- Subhash, N N; Balasubramaniam, K. (2014). Fluid level sensing using ultrasonic waveguides. [Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring](#), Volume 56, Number 11, November, pp. 607-612(6) [The British Institute of Non-Destructive Testing](#).
- Moore, P. I., Drown G. J., & Jackson D. A. (2000). Ultrasonic transit-time flowmeters modeled with theoretical velocity profiles: metrology [Text] / P.I. Moore, G. J. Drown, & D. A. Jackson Meas. Sci. Technol. 11, 1802-1811.
- Ultrasonic level measurement [Elektronnyj resurs]: Level: Technical Information / Endress+Hauser GmbH+Co.KG. – Endress+Hauser GmbH+Co.KG, 2002. – (Endress+Hauser. Opy'sany'e produkcy'y, y'yun' 2006) – 1 elektron. opt. dy'sk (CD-ROM): kol'or.; 12 sm. – Sy'stem. vy'mogy': 500 MHz; 256 Mb RAM; CD-ROM Drive; Windows 2000/XP. Acrobat Reader. – Nazva z ty'tul. ekranu.
- Pat. 82594 Ukrayina, MPK G01S15/00, G01F23/28. Sposib vy'miryuvannya rivnya ridky'x seredovy'shh i ul'trazvukovy'j rivnemir [Tekst] / Lagoda D. P., Myet'olkin M. I., Pososhko V. N., Uvarov A. Ya.; zayavny'k i patentovlasny'k tovary'stvo z обмеженою відповідальністю Науково-виробниче підприємство «Мікротерм». - #a200608554; zayavl. 31.07.06; opubl. 25.04.08. Byul. # 8. – 3 s.; il.
- International Organization for Standardization. (2010) / ISO 17989-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
- Froysa, K-E., & Lunde, P. (2001, January 28-31). A ray theory approach to investigate the influence of flow velocity profiles on transit times in ultrasonic flow meters for gas and liquid [Text] / K-E. Froysa, & P. Lunde. Paper presented at the 24 Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Ustaoset, Norway.
- Pat. 74227 Ukrayina, MPK G01F 23/28 (2006/01). Ul'trazvukovy'j pry'strij dlya vy'miryuvannya rivnya seredovy'shh z nerivnomirnoyu poverxneyu [Tekst] /

- Stencel' J. I., Tomson A. V., Shapovalov O.I., Litvinov K. A., Ryabichenko A. V.; *zayavny`k i patentovlasny`k Sxidnoukrayins`ky`j nacional`ny`j univerty`tet im. V. Dalya.* - # u201203182; *zayavl.* 19.03.2012; *opubl.* 25.10.2012. *Byul.* # 20. – 3 s.: il.
8. Stencel', J. I., Tomson A. V. *Elektrodeformacijni procesy` v p`yezoelektry`chny`x peretvoryuvachax* [Tekst] / J.I. Stencel', A. V. Tomson. // *Sy`stemy kontrolya y` upravleny`ya technology`chesky`my` processamy`.* *Sborny`k nauchny`x statej / Pod obshej redakcy`ej V.V. Ely`seeva.* – Lugansk: Svitly`cya, 2006. – S. 144 – 149. – *Bibliogr.*; s. 149. – 1000 ekz.
9. Pat. 110220 *Ukrayina*, МПК G01F 23/296 (2006/01). *Ul`trazvukovy`j pry`strij dlya kontrolyu rivnya ridy`nny`x seredovy`shh* [Tekst] / Stencel' J. I., Litvinov K. A., Ryabichenko A. V.; *zayavny`k i patentovlasny`k Sxidnoukrayins`ky`j nacional`ny`j univerty`tet im. V. Dalya.* - # a201305151; *zayavl.* 22.04.2013; *opubl.* 10.12.2015. *Byul.* # 23. – 3 s.: il.
10. Stencel', Y'. Y'. , Tomson A. V. *Matematy`chesky`e modely` ul`trazvukovy`x datchy`kov urovnya veshhestv / Y`. Y`. Stencel', A. V. Tomson.* // *Voprosy xy`my`y` y` xy`my`cheskoj technology`y`.* - Dnepropetrovsk: UGXТУ, 2007. – *Vypusk* #5. – S. 182 – 185. *Bibliogr.*; s. 185.

**Стенцель И. И., Литвинов К. А., Рябиченко А. В., Шаповалов А. И. Исследование погрешностей уразвуковых уровнемеров методом интегральной матрицы**

*Выполнен анализ внутренних и внешних факторов, которые влияют на точность измерительного контроля ультразвуковых уровнемеров. Показано, что электрофизические параметры вызывают погрешности измерительного контроля уровнемеров, которые основаны на измерении длительности времени переноса ультразвукового механического импульса через газовую среду. Показано, что погрешности уровнемера распределяются нелинейно как за диапазоном*

*измерительного контроля, так и за характером изменения влияющего фактора. Исследуется метод интегральной матрицы для оценки погрешностей ультразвукового уровнемера.*

**Ключевые слова:** *ультразвук, излучатель, пьезокерамика, интенсивность, газ, среда, мембрана, матрица, вариация, погрешность.*

**Stenzel I. I., K.A. Litvinov, Ryabichenko A.V., Shapovalov A.I. Research errors level gauges ultrasonic integrated by the method matrix**

*The analysis of internal and external factors that affect the accuracy of measuring ultrasonic monitoring gauges. It is shown that the electrical parameters of measuring cause control for level gauges, which are based on the measurement of the length of time the transfer mechanical ultrasonic pulse through the gas environment. It is shown that the error level gauges distributed nonlinear than measuring range control and change the nature of the influential factor. Investigated integrated matrix method for assessing errors ultrasonic level gauges.*

**Keywords:** *ultrasound emitter, piezoceramic, intensity, gas, environment, membrane matrix, variation, error.*

**Стенцель Й.І.** – д.т.н., проф., зав. кафедрою комп'ютерно-інтегрованих систем управління ЧНУ ім. В. Даля

**Літвінов К.А.** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління ЧНУ ім. В. Даля

**Рябиченко А.В.** – к.т.н., ТОВ «Мікротерм»

**Шаповалов А.В.** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління ЧНУ ім. В. Даля

*Рецензент:* д.т.н., профессор **Суворин А. В.**

Стаття подана 01.06.2016