

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;
В.В. ЄВСЮКОВ, аспірант СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;
А.В. ТОМСОН, канд. техн.наук, стар. викл. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;
К.А. ЛІТВИНОВ, студент СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МЕТОДОМ ІНТЕГРАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛУ

У роботі наведено результати досліджень похибок ультразвукових засобів контролю рівня методом інтегрального функціоналу. Показано, що градувальна характеристика ультразвукових засобів контролю рівня є нелінійною з нерівномірним її розподілом уздовж діапазону вимірювального контролю. Нелінійність градувальної характеристики обумовлена нелінійним розподіленням похибок вимірювального контролю. Визначення похибок вимірювального контролю для ультразвукових засобів контролю рівня з реперним пристроями зводиться до вирішення оптимізаційної задачі Ейлера з одним закріпленим кінцем, яка вирішується використанням методу інтегрального функціоналу.

В работе приведены результаты исследования погрешностей ультразвуковых средств контроля уровня методом интегрального функционала. Показано, что градуировочная характеристика ультразвуковых средств контроля уровня является нелинейной с неравномерным распределением во всем диапазоне измерительного контроля. Не линейность градуировочной характеристики обусловлена нелинейным распределением погрешностей измерительного контроля. Определение погрешностей измерительного контроля для ультразвуковых средств контроля уровня с реперными устройствами сводится к решению оптимизационной задачи Эйлера с одним закрепленным концом, которая решается использованием метода интегрального функционала.

The results of researches of ultrasound level control device errors by the integral functional method are given in the work. It is shown that calibration characteristic of ultrasound level control device was nonlinear with maldistribution in whole measuring control range. Determination of measuring control errors of ultrasound level control device with reference unit is done by the solving the Euler optimization problem with one fixed end-point with using the integral functional method

Вступ. Метрологічні характеристики є тими параметрами, за якими оцінюють якість вимірювального приладу, перетворювача, пристрою чи засобу контролю [1, 2]. Одні вимірювальні засоби характеризуються статичною та градувальною характеристиками й похибками вимірювання, інші, як наприклад, засоби неруйнівного контролю – похибками вимірювального контролю [3]. Статичні, а відповідно й градувальні характеристики можуть бути як лінійними, так і нелійними, у той час як градувальні, як правило, є умовно лінійними, нелійними зі заданою нелінійністю або лінійними [4, 5]. Наприклад, рівнеміри, у тому числі ультразвукові, згідно з відповідними нормативними документами [6,7] повинні мати лінійну градувальну характеристику та забезпечувати певну точність вимірювального контролю. Якщо статичні характеристики засобів

вимірювання чи контролю є нелінійними, то градувальні у більшості випадків лінеаризуються з тою чи іншою похибкою [8]. У таких випадках при зміні як внутрішніх, так і зовнішніх впливових факторів появляються не тільки адитивні та мультиплікативні похибки, але й суттєві нелінійні їх складові. У науковій літературі описуються різні методи дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювального контролю, котрі, в основному, зводяться до визначення абсолютних похибок, як різниці між виміряним і дійсним значенням вимірювальної величини, визначення мультиплікативної складової, котра рахується, як правило, лінійною. Як показують експериментальні результати досліджень метрологічних характеристик різноманітних засобів вимірювального контролю, у тому числі й ультразвукових, їх статичні характеристики можуть бути не «гладко» нелінійними, тобто такими, для котрих похідна de/dx є знаковмінна, де e, x - вихідна та вхідна координата засобу контролю відповідно. Тому задача визначення та дослідження похибок вимірювального контролю є важливою та актуальною. Особливо це стосується засобів вимірювального контролю, які мають реперні пристрої для уведення поправок до результату цього контролю.

Ультразвукові рівнеміри мають реперний пристрій у вигляді металевої пластини або шайби, який викорис товується, як правило, для зменшення адитивної складової вимірювального (робочого) каналу, а фактично для приведення результату вимірювального контролю після подачі імпульсу ультразвукового сигналу (УЗС) до деякого нормованого значення [9 - 11]. Так як реперний пристрій (далі репер) розташовується на невеликій відстані від мембрани ультразвукового випромінювача (УЗВ), то УЗС спочатку відбивається від репера і сприймається ультразвуковим приймачем (УЗП), а тільки через деякий час цей же сигнал доходить до поверхні рідинного середовища (ПРС), відбивається від нього і сприймається тим же УЗП. Так як реперний і робочий сигнали випромінюються одним і тим же УЗВ і проходять через одне й теж газове середовище (ГС), то зміна електромеханічних параметрів УЗВ й фізико-хімічних параметрів газового середовища дещо компенсується. Але, враховуючи, що відстань від репера до ПРС є змінною, а робочий УЗС може поглинатися рідиною, то повної компенсації впливу збурюючих параметрів не відбувається. За рахунок цього градувальна характеристика такого засобу контролю є умовно нелінійною з нерівномірним її розподілом уздовж діапазону вимірювального контролю.

Постановка задачі. В ультразвукових засобах контролю рівня (УЗКР) з реперним пристроєм при кожній подачі електричного збуджуючого імпульсу (ЕЗІ) створюється УЗВ пакет ультразвукових коливань (УЗК), тривалість котрих дорівнює часу вільних коливань його мембрани. Спочатку цей сигнал досягає поверхні реперного пристрою, відбивається від нього і сприймається ультразвуковим приймачем, яким у більшості випадків є той же УЗВ, і

створює сприймаючий електричний сигнал e_p . Той же пакет УЗК направляється в газове середовище технологічного апарату, доходить до ПРС, відбивається від нього і сприймається тим же УЗП, створюючи електричний сигнал e_c . Так як сигнали e_p і e_c розділені в часі, то вони запам'ятовуються у відповідних запам'товуючих пристроях вимірювальної системи (мікроконтролері) і визначається їх різниця $\Delta e = e_p - e_c$. Так як $e_c = f(L)$, то зі зменшенням рівня в технологічному апараті цей сигнал зменшуватиметься і при $e_c = 0$, що відповідає «насиченню» статичної характеристики вимірювального каналу, має місце перша точка «насичення» статичної характеристики ($L \geq L_{min}$). Якщо $\Delta e = 0$, тобто $e_p = e_c$, то має місце друге «насичення» статичної характеристики вимірювального каналу, яке відповідає умові $L \leq L_{max}$.

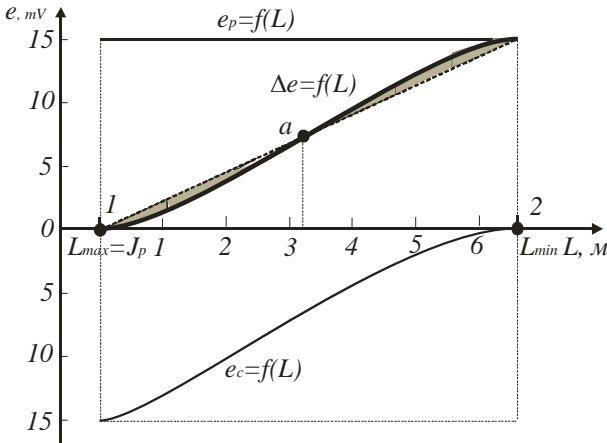


Рис. 1. Статичні характеристики: реперного каналу $e_p = f(L)$;

робочого каналу без репера $e_c = f(L)$; робочого каналу з репером $e = f(L)$;
лінеаризована (пунктирна)

Між кривою $e = f(L)$ і пунктирною є зона, яка називається зоною нелінійності, або зоною нелінійної похибки вимірювального контролю. При розробці засобу контролю з метою забезпечення мінімальної похибки нелінійності стараються, щоб точка «а» (оптимальна точка) на градуовальній характеристиці знаходилася приблизно посередині діапазону вимірювання. Під впливом різних внутрішніх і зовнішніх факторів оптимальна точка може зміщатися за діапазоном вимірювання як вліво, так і вправо, збільшуючи нелінійність у тій чи іншій частині шкали, а тим самим похибки вимірювального контролю. Як показали експериментальні дослідження ультразвукових засобів контролю рівня рідинних середовищ,

розподілення похибок вимірювання вздовж діапазону вимірювального контролю є нерівномірним, викликає значні труднощі їх визначення особливо в режимі їх промислової експлуатації. У зв'язку з цим, постає задача знайти ефективний спосіб визначення похибок вимірювального контролю за контролюючими параметрами та враховувати їх у результат вимірювання. При такій постановці задачі, коли повністю компенсуються похибки вимірювального контролю тільки в одній точці, (у розглядуваному випадку в точці «1» при $L_{max} = J_p$, де J_p - відстань від УЗВ до реперного пристрою), а точка «2» є вільно плаваючою, то така задача відповідає оптимізаційній задачі Ейлера з одним закріпленим кінцем.

Основна частина. Критеріальне рівняння, яке описує оптимізаційну задачу для дослідження похибок УЗКР, має наступну форму [11]

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm \delta_2) e_2 L_2 = 0, \quad (1)$$

де L_2, L - максимальна і поточна зміна рівня рідинного середовища; $e(L, v)$ - функція залежності сприймаючого сигналу у залежності від рівня L та впливаючого параметра v ; δ_2 - відносна похибка, яка притаманна відстані L_2 ; e_2 - сприймаючий сигнал, який відповідає рівню L_2 .

У рівнянні (1) варюючим параметром є впливаюча величина v та відносне відхилення δ_2 . Кожному значенню δ_2 відповідає така величина v , при котрій виконується рівність (1). Залежність $\Delta v = f(\delta_2)$ показує зміщення верхньої точки статичної характеристики засобу, а відповідно, відхилення останньої від її нормованого положення. Відхилення δ_2 може бути знайдено як відношення тої чи іншої складової абсолютної похибки або її повного значення до номінальної функції $f_0(L, v)$ при $L = L_2$. Впливаючим може бути як деякий індивідуальний параметр, наприклад, напруга живлення, температура, тиск або склад газового середовища тощо, так й узагальнюючий, яким може бути деяка сукупність фізичних параметрів, пов'язаних між собою певною функціональною залежністю. Виконаємо дослідження основних похибок УЗКР, обумовлених різними індивідуальними та сукупними впливаючими факторами. Для номінальної статичної характеристики $\delta_2 = 0$, тому вона описуватиметься таким інтегральним рівнянням

$$\int_0^{L_2} e(L, v_0) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v_0)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5) e_{20} L_2 = 0, \quad (2)$$

де $e(L, v_0)$, e_{20} - поточне і максимальне значення вихідного сигналу УЗКР; v_0 - номінальне значення впливаючого параметра.

Графічне пояснення методу інтегрального функціоналу показано на рис. 2, де: $S_0 = e_2 L_2$ - площа обмежена максимальним значенням відстані L_2 і вихідним сигналом e_2 , який відповідає відстані L_2 ;

$$\Delta S(v_0, L) = \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v_0)}{\partial v} (\delta v) dL - \text{площа, яка обмежена змінними параметрами}$$

v і L (на рис. 2 показана темною заливкою); $S(L) = \int_0^{L_2} e(L, v_0) dL$ - площа, яка обмежена номінальною статичною характеристикою.

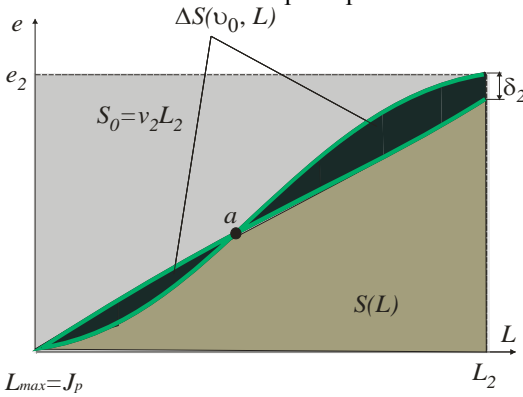


Рис. 2. Графічне пояснення методу інтегрального функціоналу

Для оптимізаційної задачі з одним закріпленим кінцем, коли початкова відстань $L_{max} - J_0 = 0$, площа під лінійною статичною характеристикою $S_0 = 0,5 e_{20} L_2$. Для абсолютно лінійної статичної характеристики при $v = v_0 = kL$, де k - деяка стала, маємо

$$\int_0^{L_2} e(L, v_0) dL - (0,5) e_{20} L_2 = 0. \quad (3)$$

Другий інтеграл у рівняння (2) характеризує вклад нелінійної складової на характер статичної характеристики засобу контролю. Так як в основу дослідження похибок покладена класична оптимізаційна задача з одним закріпленим кінцем ($L_{max} - J_p = 0, \Delta e = 0$) то при зміні різних впливаючих факторів змінюватиметься тільки вільний кінець статичної характеристики при $L_2 = L_{min}$, $\Delta e(L_2) = \text{var}$. Відносною похибкою δ_2 може бути як

мультиплікативна так і нелінійні складові загальної похибки контролю, котрі можуть бути визначені варіаційним методом [13]. Загальна похибка такого засобу складається з мультиплікативної, нелінійної квадратичної та нелінійної кубічної складової. Для цих похибок можна записати наступні рівняння:

$$\Delta_{\mu} = K_{\mu}(v_0)\Delta_v, \quad \Delta_{H2} = K_{H2}(v_0)\Delta_v^2, \quad \Delta_{H3} = K_{H3}(v_0)\Delta_v^3. \quad (4)$$

Так як у методі інтегрального функціоналу використовується відносна похибка контролю, то доцільно загальну похибку контролю записати у такій формі

$$\delta_{\Sigma} = K_{\mu}^0\delta_v + K_{H2}^0\delta_v^2 + K_{H3}^0\delta_v^3, \quad (5)$$

$$\text{де } \delta_{\Sigma} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{e(L_2)}; \quad \delta_v = \frac{\Delta_{\mu}}{v_0}; \quad \delta_{H2} = \left(\frac{\Delta_{H2}}{v_0}\right)^2; \quad \delta_{H3} = \left(\frac{\Delta_{H3}}{v_0}\right)^3;$$

$$K_{\mu}^0 = K_{\mu}(v_0)\frac{v_0}{\Delta e(L_2)}; \quad K_{H2}^0 = K_{H2}(v_0)\frac{v_0^2}{\Delta e(L_2)}; \quad K_{H3}^0 = K_{H3}(v_0)\frac{v_0^3}{\Delta e(L_2)}.$$

Ураховуючи рівності (4) для похибок вимірjuвального контролю отримуємо наступні рівняння:

- для мультиплікативної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{\mu}^0 \delta_{\mu}) e(L_2) L_2 = 0; \quad (6)$$

- для нелінійної квадратичної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{H2}^0 \delta_{H2}^2) e(L_2) L_2 = 0; \quad (7)$$

- для нелінійної кубічної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{H3}^0 \delta_{H3}^3) e(L_2) L_2 = 0; \quad (8)$$

Виконаємо дослідження похибок вимірjuвального контролю для ультразвукового ЗКР з компенсуючим вхідним сигналом. Рівняння статичної характеристики має вигляд

$$e_c(L, n) = K_{L0} e_p \left\{ 1 - \frac{L}{H} \left(\frac{H}{L} - 1 \right) \left[1 + nL \left(\frac{H}{L} - 1 \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\text{де } K_{L0} = \frac{K_L}{1 + D_2 \left(1 - \left(\left(53,38\pi \frac{T_C}{rm} \sqrt{\frac{\gamma_C}{P_C}} \right)^3 D_1 \right) \right)}; \quad K_L = H / J_p;$$

$$n = \frac{1}{2\varepsilon} \left(1 - \left(\left(53,38\pi \frac{T_C}{rm} \sqrt{\frac{\gamma_C}{P_C}} \right)^3 D_1 \right) \right); \quad e_p - \text{сприймаючий сигнал за реперним}$$

каналом; H - відстань від УЗВ до дна апарата; T_C, P_C, γ_C - температура, тиск і густина газового середовища відповідно; r, m - радіус і маса мембрани УЗВ; ε_λ - молярний коефіцієнт поглинання УЗК газовим середовищем; D_1, D_2 - коефіцієнти перенесення кількості руху та ультразвукової енергії відповідно.

Критеріальне рівняння (1) для статичної характеристики запишемо таким чином

$$\int_0^{L_2} e(L, n_0) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, n_0)}{\partial n} (\delta n) dL - (0,5 \pm k\delta_n) e_2 L_2 = 0, \quad (10)$$

де $n = e_c / e_p$ - коефіцієнт відношення сприймаючого сигналу робочого каналу до сприймаючого сигналу реперного каналу; n_0 - градувальне значення цих сигналів.

Нехай найбільш сильними впливаючими (варюючими) параметрами є k і n . Діапазон зміни рівня L змінюється від репера (максимальний рівень рідини) до дозволеного за технологічним регламентом рівня L_2 (мінімальний рівень рідини). Залежність $S = f(J)$ приведена на рис. 3, з якого видно, що критеріальні точки (a_1, a_2, a_3, a_4) для пропорційних відстаней відповідно: $J = 6 \text{ м}$, $J = 4,5 \text{ м}$, $J = 3 \text{ м}$, $J = 1,5 \text{ м}$, де J - відстань від реперного пристрою до поверхні рідинного середовища, розподілені за шкалою нерівномірно. Таке розподілення критеріальних точок свідчить про те, що формально статична характеристика є нелінійною, яка збільшується зі збільшенням рівня J . Залежності $\Delta S_n = f(J)$, які обумовлені зміною параметра n , для таких же відстаней (критеріальні точки b_1, b_2, b_3, b_4) показані на рис. 4. Залежність $\Delta S_n = f(J)$ є нелінійною і для

статичної характеристики має мінімум при відстані $J = 2450$ мм. Експериментальні дослідження статичної характеристики показують, що біля цієї точки статична характеристика максимально близька до прямої лінії.

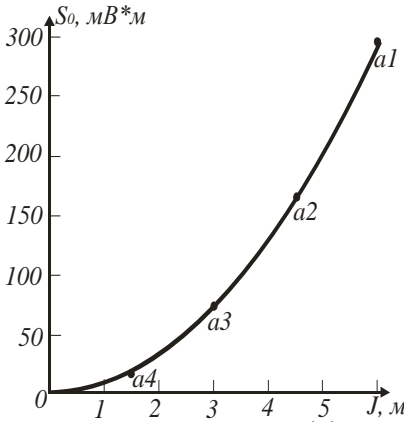


Рис. 3. Залежність $S_n = f(J)$

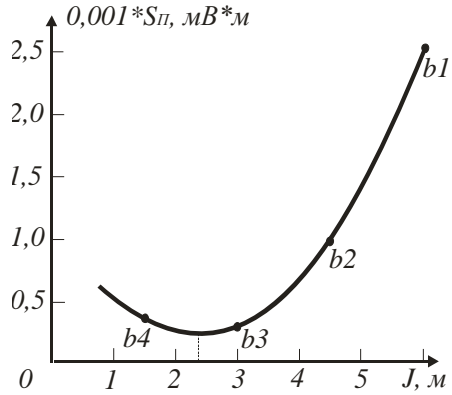


Рис. 4. Залежність $\Delta S_n = f(J)$

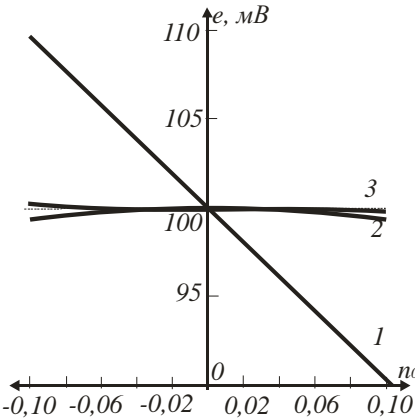


Рис. 5. Графіки складових похибок для відстані $J = 6$ м, обумовлених зміною впливаючого параметра n

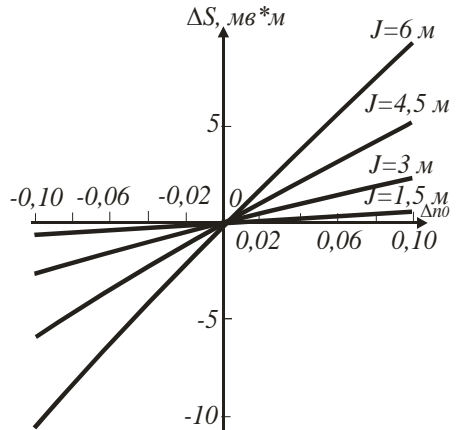


Рис. 6. Залежність загальних похибок для різних точок статичної характеристики

На рис. 5 показані криві складових похибок вимірювального контролю для відстані $J = 6$ м: 1 – мультиплікативна; 2 – нелінійна квадратична і 3 – нелінійна кубічна складові відповідно. З рис. 5 видно, що при зміні впливаючого параметра n на $\pm 10\%$ від градуювального значення нелінійні

складові похибки незначні, якими при практичних дослідженнях можна знехтувати. Залежності сумарної похибки від зміни впливаючого параметра показані на рис. 6, з якого видно, що для всіх критичних точок статичної характеристики залежності $\delta_\Sigma = f(J)$ є нелінійними. Це свідчить про те, що зміна впливаючого параметра n приводить до появи нелінійності статичної характеристики, яка збільшується по мірі збільшення відстані до поверхні рідинного середовища. Одночасно збільшується й похибка вимірювального контролю.

Для дослідження температурної похибки УЗКР рівняння (9) приведемо до наступної форми

$$e(L, T_C) = K_L \left\{ - \left(1 - \frac{L}{H} \right) \left[\frac{1 + (0,5\varepsilon(H-L)) \left(1 + \left(\frac{B_1 T_C^3}{P} \right) \right)}{1 + D_2 \left(1 + \left(\frac{B_1 T_C^3}{P} \right) \right)} \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\text{де: } B_1 = D_1 \left(\frac{53,38\pi}{rm} \sqrt{\frac{\gamma C}{P}} \right)^3.$$

Критеріальне рівняння (1) для температурної залежності запишемо наступним чином

$$\int_0^{L_2} e(L, T_C) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, T_C)}{\partial T_C} (\delta T_C) dL - (0,5 \pm k_{T_C} \delta T_C) e_2 L_2 = 0. \quad (12)$$

Впливаючим фактором є температура газового середовища T_C . Графіки складових температурної похибки вимірювального контролю приведені на рис. 7, які отримані при таких параметрах: $e = 64,78 \text{ mV}$, $J = 6 \text{ м}$, $K_{\mu T} = 0,25$, $K_{H2T} = 0,15$, $K_{H3T} = 0,50$ та зміні температури на $\pm 50^0 \text{ C}$ від номінальної $T_C = 293 \text{ K}$: 1 – мультиплікативна; 2 – нелінійна квадратична; 3 – нелінійна кубічна складові відповідно. З рисунка видно, що при відносному збільшенні температури T_C мультиплікативна та нелінійні складові є односторонніми, що призводить до великої сумарної температурної похибки. Якщо T_C зменшується, то нелінійна квадратична складова температурної похибки є протилежною до мультиплікативної та нелінійної кубічної складової, що призводить до зменшення загальної температурної похибки. Ці теоретичні висновки підтверджуються експериментальними дослідженнями, які показують, що при збільшенні температури від нормальної $T_C = 293 \text{ K}$ температурна похибка приблизно в 1,25 рази більша, ніж при її зменшенні на таку ж величину. Залежності $\Delta S_T = f(J)$ (див. рис. 8), які обумовлені зміною температури T_C , для

відстаней $J = 6 \text{ м}$, $J = 4,5 \text{ м}$, $J = 3 \text{ м}$, $J = 1,5 \text{ м}$, (критеріальні точки b_1, b_2, b_3, b_4). Це свідчить про те, що температурні похибки розподіляються практично рівномірно вздовж діапазону вимірювального контролю (рис. 9). Експериментальні дослідження підтверджуються теоретичними.

Для дослідження похибки УЗКР, обумовленої зміною тиску газу рівняння (9) приведемо до наступної форми

$$e(L, P) = K_L \left\{ 1 - \left(1 - \frac{L}{H} \right) \frac{\left[1 + \left(\frac{1}{2\varepsilon} (H - L) \right) \left(1 + \left(\frac{B_1}{P_C} \sqrt{P_C} \right) \right) \right]}{\left[1 + D_2 \left(1 + \left(\frac{B_1}{P_C} \sqrt{P_C} \right) \right) \right]} \right\}. \quad (13)$$

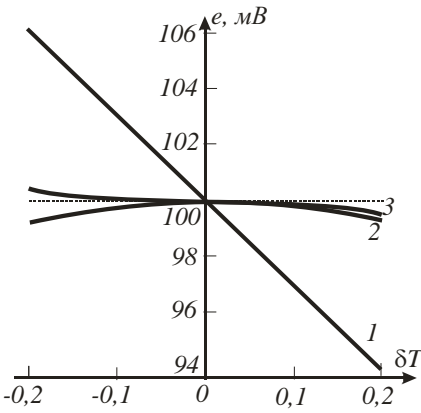


Рис. 7. Графіки складових температурних похибок для $J = 6 \text{ м}$

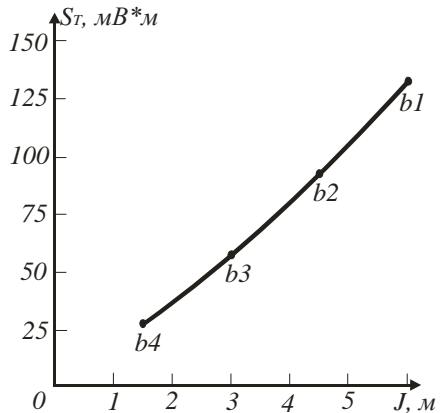


Рис. 8. Залежність $\Delta S_T = f(J)$

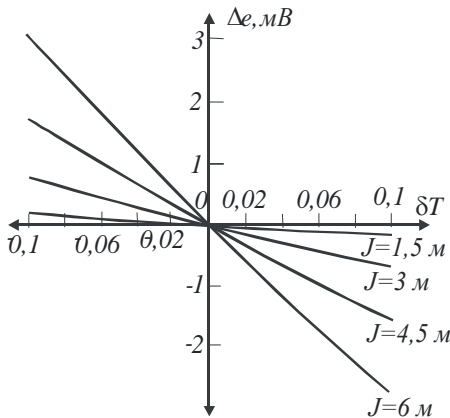


Рис. 9. Залежність загальних температурних похибок для різних точок статичної характеристики

Критеріальне рівняння (1) при зміні тиску газового середовища запишемо наступним чином

$$\int_0^{J_{\Pi}} e(J, P) dJ \pm \int_0^{J_{\Pi}} \frac{\partial e(J, P)}{\partial P} (\delta P) dJ - (0,5 \pm k_p \delta_p) e_{\Pi} J_{\Pi} = 0. \quad (14)$$

Впливаючим фактором є тиск газу P . Графіки складових похибки вимірювального контролю, обумовлених зміною тиску газу, приведені на рис. 10 (1 – мультиплікативна складова; 2 – нелінійна квадратична складова; 3 – нелінійна кубічна складова), які отримані при таких параметрах: $n = 64,78$, $J = 6$, $K_{\mu T} = 0,0015$, $K_{H2T} = 0,00025$, $K_{H3T} = 0,00150$ та зміні тиску від 70 до 130 $\kappa\Pi a$ відносно номінального $P_C = 103 \kappa\Pi a$. Залежність $S_p = f(J)$ практично ідентична до аналогічної кривої нормальної статичної характеристики. Графік приросту цієї залежності, обумовленої зміною тиску газового середовища (рис. 11) показує, що площа під статичною характеристикою є значною, що свідчить про великий вплив зміни тиску на похибку вимірювального контролю. Залежність $\Delta S_p = f(J)$ має значну нелінійність, що говорить про суттєве зростання похибки, обумовленої зміною тиску газового середовища при збільшенні відстані до рідинного середовища. Залежності загальної похибки, обумовленої зміною тиску газу, вздовж діапазону вимірювального контролю, показані на рис. 12. Залежності нелінійні та мають явно виражену S -подібну форму.

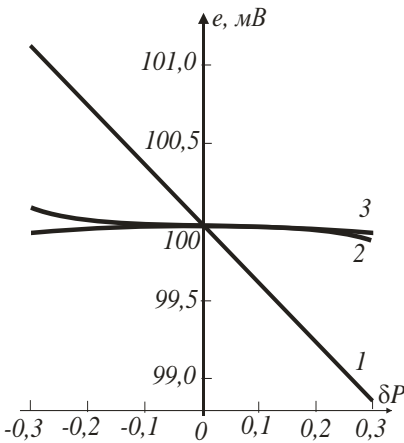


Рис. 10. Графіки складових похибки ЗКР, обумовлених зміною тиску газового середовища

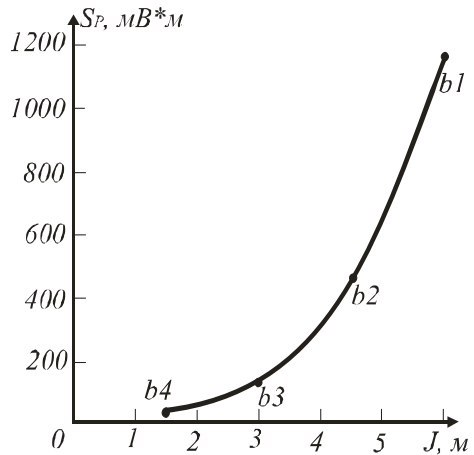


Рис. 11. Залежність $\Delta S_p = f(J)$

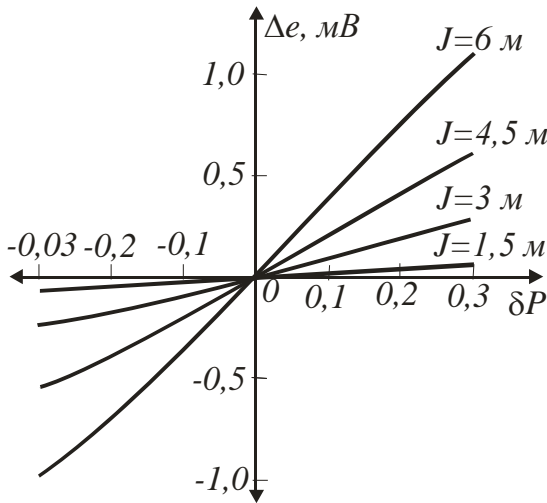


Рис. 12. Залежність загальних похибок, обумовлених з міною тиску газу для різних точок статичної характеристики

Висновок. У результаті досліджень встановлено, що засоби вимірювального контролю, які мають номінальну статичну характеристику та робочу, яка характеризується наявністю мультиплікативної та нелінійних складових, обумовлених відхиленням впливових факторів від їх номінальних значень, а також реперний пристрій, сигнал якого призначений для уведення поправки до початку або кінця діапазону вимірювального контролю, можна розглядати як оптимізаційну задачу з одним закріпленим кінцем. Рішення оптимізаційної задачі дозволяє визначити вплив того чи іншого збурюючого фактора (температури, тиску тощо) на похибки вимірювального контролю та відповідним чином їх оптимізувати не тільки у вимірювальній точці але й за шкалою. Метод дозволяє оптимізувати статичну характеристику закону вимірювального контролю за рахунок вибору таких конструктивних параметрів, при котрих різниця між приростами нелінійності діапазону вимірювання були б мінімальними. Метод дозволяє за відповідним алгоритмом розраховувати вплив збурюючого параметра на положення статичної характеристики і вводити відповідні поправки для підвищення точності вимірювального контролю.

Список літератури: 1. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств / *П.В. Новицкий.* - Л.: Энергия, 1968. - 246 с. 2. *Дунаев Б.Б.* Точность измерений при

контроле качества / *Б.Б. Дунаев*. – К.: Техника, 1981. – 152 с.: ил. **3.** *Бабигов О.И.* Контроль уровня с помощью ультразвука / *О.И. Бабигов*. – Л.: Энергия, 1971. – 98 с. **4.** *Азидов А.М.* Точность измерительных преобразователей / *А.М. Азидов, А.Н. Гордов*. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с. **5.** *Сурикова Е.И.* Погрешности приборов и измерений / *Е.И. Сурикова*. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. – 155с. **6.** Рівнеміри робочі. Методика повірки: МПУ 138/03-2003. – Київ: УкрЦСМ, 2003. – 9 с. – (Нормативний документ УкрЦСМ. Інструкція). **7.** Приборы для измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 28725-90 (СТ СЭВ 2419-89). – [Чинний від 1992-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 14 с. – (Государственный стандарт Союза ССР). **8.** *Стенцель Й.І.* Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній технології: Навч. посібник. Ч.1. / *Й.І. Стенцель, В.В. Тишук*. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2000. – 264 с. **9.** *Стенцель Й.І.* Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин / *Й.І. Стенцель, А.В. Томсон, А.В. Рябіченко* // МНТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький, 2006. №2 (28). – С. 55-58. **10.** *Стенцель Й.І.* Аналіз похибок вимірювання ультразвукових рівнемірів / *Й.І. Стенцель, А.В. Томсон, А.В. Рябіченко* // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» - № 48. – 2008. – С. 55-60. **11.** *Зайцев Г.Ф.* Основы автоматического управления и регулирования / *Г.Ф. Зайцев, В.И. Костюк, П.И. Чинаев*. - Киев: Техника, 1977. - 460 с. **12.** *Рабинович С.Г.* Погрешность измерений / *С.Г. Рабинович*. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с., ил. **13.** *Гельфонд И.М.* Вариационное исчисление / *И.М. Гельфонд, С.В. Фомин*. - М.: Физматгиз, 1961. - 385 с.

Надійшла до редакції 12.04.12