

**Й.І. СТЕНЦЕЛЬ**, д-р. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Луганськ;  
**О.І. ШАПОВАЛОВ**, аспірант, СНУ ім. В.Даля, Луганськ;  
**К.А. ЛІТВІНОВ**, студент, СНУ ім. В.Даля, Луганськ;  
**В.В. ЄВСЮКОВ**, аспірант, СНУ ім. В.Даля, Луганськ

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИНИХ СЕРЕДОВИЩ З НЕРІВНОМІРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

У роботі наведено результати теоретичних досліджень ультразвукового пристрою контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірною поверхнею. Показано, що такі пристрої мають похибки вимірювального контролю, обумовленими розсіюванням ультразвукового сигналу від нерівномірної поверхні. Похибки можуть бути зменшені за рахунок використання вторинних ультразвукових ефектів.

**Ключові слова:** ультразвук, випромінювач, поверхня, рідина середовище, похибка, сигнал, вимірювання.

**Вступ.** Технологічні процеси хімічних виробництв характеризуються наявністю рідинних середовищ (РС), які накопичуються в апаратах відповідного оформлення (ємкості, кип'ятильники, випарні установки, ректифікаційні колони, сепаратори та багато інших). Однією з основних задач роботи таких апаратів є забезпечення загального матеріального балансу, який характеризується кількістю рідини в апараті, а фактично її об'ємом пропорційним рівню рідини. Так як у таких апаратах РС завжди знаходиться в русі, то їх поверхня не є рівномірною, що призводить до відповідних проблем при вимірювальному контролі їх рівня.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** У хімічній технології де є необхідність контролювати рівень при наявності нерівномірної поверхні рідинних середовищ (НПРС), наприклад, рідинного кип'ячого шару, в абсорберах з барботуванням газу через рідину, при механічному чи газовому перемішуванні реагуючих РС тощо, у більшості випадках використовують буйкові або гідростатичні засоби контролю, котрі мають певні недоліки, до яких відноситься достатньо низька точність та вірогідність, залежність від параметрів РС, складність конструкції та багато інших. Для таких технологічних процесів контроль рівня РС є актуальною задачею. Експериментально встановлено, що при вимірюванні рівня РС ультразвуковим методом приймачем сприймається не один відбитий від поверхні ультразвуковий сигнал (УЗС), а ряд сигналів, розділених в часі. Відомо [1], що вторинні УЗС виникають внаслідок розсіювання відбитого УЗС від поверхні рідинного середовища (ПРС). Вторинні УЗС досягають внутрішніх частин резервуару чи ємкості, відбиваються від них, повертаються до ПРС, відбиваються від неї і попадають на приймач, створюючи сигнал з

амплітудою  $E_2$  [2]. Амплітуда  $E_2$  цього сигналу може складати 10-50% від амплітуди основного випроміненого сигналу  $E_1$ . Амплітуда вторинних УЗС залежить від характеру НПРС і є функцією контролюючого рівня.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою дослідження є математичне описання процесів, які мають місце при подвійному відбитті ультразвукового сигналу від НПРС. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при наявності НПРС, обумовленої механічними чи іншими діями, амплітуда основного сприймаючого сигналу  $U_1$  зменшується при одному й тому ж значенні електричного збуджуючого імпульсу (ЕЗІ) та рівні РС, а амплітуда наступного сприймаючого сигналу  $U_2$  - збільшується [3]. Такий ефект двох послідовно сприймаючих сигналів використаний для підвищення точності роботи ультразвукових пристроїв вимірювального контролю (УЗПК) рівня РС з нерівномірними поверхнями [4]. Задача полягає у теоретичному та практичному вивченні такого способу зменшення похибки вимірювального контролю рівня НПРС.

**Матеріали досліджень.** Зі збільшенням висоти нерівномірності ПРС амплітуда вторинного УЗС зростає незалежно від контрольованого рівня. Як показано в [2, 3], випромінений УЗС  $y_E(t)$ , який створюється ультразвуковим випромінювачем (УЗВ), при певних припущеннях описується наступним рівнянням

$$y_E(t) = k_{E0} y_M(t) \{1 - \exp(-\alpha_1 t) [\cos(\omega_0 t)]\}, \quad (1)$$

де  $k_{E0}$  - коефіцієнт передачі УЗВ;  $y_M(t)$  - переміщення мембрани УЗВ за час  $t$ ;  $\alpha_1$  - ступінь загасання випроміненого УЗС;  $\omega_0$  - частота власних коливань.

Для УЗПК рівня РС з нерівномірною поверхнею сприймаючий сигнал вимірювального контролю описується наступною формулою

$$U_1(t_1) = K_p E_0 \{1 - \exp(-\alpha_1 t_1) \cos(\omega_0 t_1)\}^2 * [\exp(-t_1 / \tau_x)]^2 * \\ * \left\{ 1 - \exp\left(-\left[\frac{(\omega_0^3 t_1)^{x_0}}{g} + \varepsilon(2J - \Delta J)\right]\right) \cos(\omega_0 t_1) \right\} * \\ * \{1 - \exp(-\beta^3 x_0 t_1 / m^3 g) [\cos(\beta t_1 / m)]\}, \quad (2)$$

де  $K_p$  - коефіцієнт передачі УЗПК рівня;  $E_0$  - амплітуда ЕЗІ;  $\tau_x$  - стала часу мембрани;  $x_0$  - максимальне відхилення мембрани;  $\varepsilon$  - ступінь поглинання УЗС в ГС;  $J$  - товщина ГС;  $\Delta J$  - зменшення висоти ГС за рахунок середньої висоти нерівномірності ПРС;  $\beta$  - коефіцієнт тертя мембрани в ГС;  $m$  -

маса мембрани;  $g$  - прискорення земного тяжіння;  $t_1$  - вимірний час, за котрим розраховується значення рівня РС.

Час, котрий вимірюється в УЗПК рівня РС визначається від моменту подачі на УЗВ УЗІ до моменту, коли сприймаючий сигнал  $U_1(t)$  досягає заданого значення  $U_0$  (лічильник тактових імпульсів (ЛТІ) включається при появі вхідного сигналу  $E_0$  і відключається, коли  $U_1(t_1) = U_0$ ; за кількістю відрахованих тактових імпульсів розраховується час  $t_1$ ).

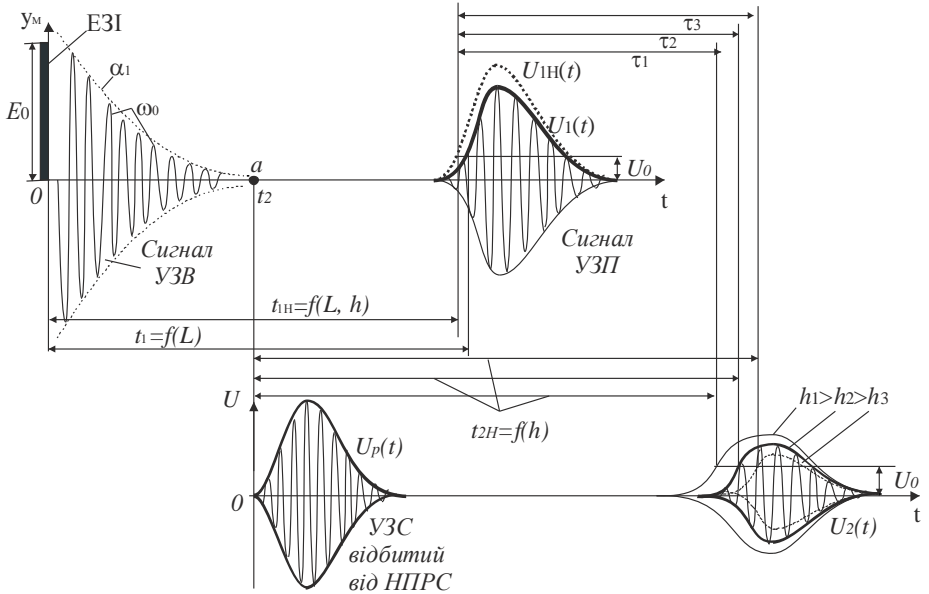


Рис. – Принцип вимірювання часу проходження УЗС відстані в газовому середовищі

Якщо на РСПС з'являються нерівномірності, то це приводить до зменшення товщини ГС  $J$  на деяку величину  $\Delta J$ , яка викликає зменшення часу  $t_1$  до значення  $t_{1H}$  як показано на рисунку. У цьому випадку сприймаючий сигнал збільшується до  $U_{1H}(t)$ , а контрольований час  $t_1$  зменшується до  $t_{1H}$ . Якщо прийняти, що розраховане значення рівня  $L_1 = kt_1$ , то при наявності НПРС значення рівня буде розраховане за формулою:  $L_{1H} = kt_{1H}$ . Звідси випливає, що абсолютна похибка вимірювального контролю дорівнюватиме  $\Delta L_{1H} = L_1 - L_{1H} = k(t_1 - t_{1H}) = k\Delta t_1$ .

При вимірюванні рівня РС з нерівномірною поверхнею розсіювання УЗС  $U_p(t)$  від цієї поверхні в ГС значно збільшується. Це приводить до того, що розсіяні «промені» досягають стінок резервуару, відбиваються від них, повертаються до нерівномірної поверхні, а частина відбитих від НПРС досягає УЗП, де створює новий сигнал  $U_2(t)$ . Як показали експериментальні дослідження, час  $t_1 = f(J)$ , а  $t_2 = f(h)$ , де  $h$  - висота нерівномірності ПРС.

Для розсіяної частини УЗС можна записати наступне рівняння

$$\begin{aligned}
 U_p(t) = & K_p k_p E_0 \{1 - \exp(-\alpha_1 t) \cos(\omega_0 t)\}^2 * [\exp(-t/\tau_x)]^2 * \\
 & * \left\{ 1 - \exp\left(-\left[\frac{(\omega_0^3 t) x_0}{g} + \varepsilon(J-h)\right] \cos(\omega_0 t)\right) \right\} * \\
 & * \left\{ 1 - \exp\left(-\beta^3 x_0 t / m^3 g\right) [\cos(\beta t / m)] \right\},
 \end{aligned} \quad (3)$$

де  $k_p$  - коефіцієнт розсіювання;  $h$  - середня висота нерівномірності ПРС.

Розсіяний сигнал проходить потрібну відстань: ПРС  $\Rightarrow$  стінка резервуару  $\Rightarrow$  ПРС  $\Rightarrow$  УЗП. У цьому випадку УЗС двічі відбивається від ПРС, перш ніж сприймається УЗП. Електричний сигнал, який при цьому створюється УЗП, враховуючи (3), у першому наближенні можна описати таким рівнянням

$$\begin{aligned}
 U_2[f(J, h)] = & K_p k_p E_0 \{1 - \exp(-\alpha_1 f(J, h)) \cos(\omega_0 f(J, h))\}^2 * \\
 & \left\{ \exp(-f(J, h)/\tau_x) \right\}^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\left[\frac{(\omega_0^3 f(J, h)) x_0}{g} + \varepsilon(3J-2h)\right] \right) \right\} * \\
 & * \left\{ \cos(\omega_0 f(J, h)) \right\} \\
 & * \left\{ 1 - \exp\left(-\beta^3 x_0 f(J, h) / m^3 g\right) [\cos(\beta f(J, h) / m)] \right\},
 \end{aligned} \quad (4)$$

де  $f(J, h) \equiv t$  - функція зміни вимірювального часу від зміни товщини ГС та висоти нерівномірності ПРС.

Рівняння (4) фактично є математичною моделлю УЗПК рівня з нерівномірною ПРС. Для визначення часу  $t_{2H}$  лічильник імпульсів включається в момент часу, який дорівнює половині визначеного на попередньому циклі часу, тобто  $t_{20} = t_{1H} / 2$ . Лічильник часу виключається, коли  $U_2(t) \geq U_0$ . Якщо сигнал  $U_2[f(J, h)] = 0$ , то нерівномірність ПРС відсутня. При наявності нерівномірності на виході УЗП появляється сигнал, котрий далі може підсилюватися до напруги, яка перевищує задане значення  $U_0$ . Визначений таким чином час  $t_{2H}$ , який є функцією висоти  $h$  НПРС, використовується для уведення поправки в результат вимірювання часу  $t_{1H}$  за відповідним алгоритмом.

**Результати досліджень.** Абсолютну похибку вимірювального контролю формально можна визначити за різницею

$$\Delta t(L, h) = t_1(L) - t_{1H}(L, h). \quad (5)$$

У рівнянні (5) відомим є тільки час  $t_{1H}(L, h)$ , так як він визначається лічильником імпульсів при порівнянні сигналу  $U_1(t)$  з деяким опорною напругою  $U_0$ . Для визначення «дійсного» значення часу  $t_1(L)$  потрібно знати похибку  $\Delta t(L, h)$ . Згідно з вищенаведеними дослідженнями цю похибку можна визначити за вторинним сприйнятим сигналом  $U_2(t)$ , який є функцією як вимірювального рівня  $L$  РС, так і висоти  $h$  нерівномірності ПРС. Для цього достатньо визначити час  $t_{2H}$  додатковим ЛПІ. Останній включається в роботу в момент часу  $t_2$  (точка «а» рисунку), який визначається за часом  $t_{1H}$  попереднього циклу роботи УЗПК рівня за рівнянням:  $t_2 = t_{1H} / 2$ . Характерним є те, що точка «а» змінює своє положення на часовій осі в залежності від товщини ГС  $J$  і висоти  $h$  нерівномірності ПРС, що дає можливість визначити похибку вимірювального контролю з достатньо високою точністю. Цей додатковий ЛПІ працює до тих пір, поки підсилена напруга  $U_2(t)$  на виході УЗП не стане рівною опорній напрузі  $U_0$ . Визначений при цьому час  $t_{2H}$  є функцією висоти  $h$  НПРС. Похибку вимірювального контролю  $\Delta t(L, h)$  практично можна визначити двома шляхами. Перший полягає в тому, що похибка розраховується за формулою

$$\Delta t(L, h) = t_{1H}(L, h) - (2/3)t_{2H}(L, h). \quad (6)$$

Відношення (2/3) у рівнянні (6) визначає вплив шляху проходження відповідної відстані в ГС: основний сигнал – подвійної відстані, а вторинний – потрійної. Як показали теоретичні дослідження визначення похибки вимірювального контролю можна здійснювати, використовуючи ефект незмінності часу  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$  (див. рисунок). Попередні експериментальні дослідження показали, що цей час практично є незмінним, тобто  $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \tau_3 = const$ . Час можна також виміряти ЛПІ, якщо останній включити в роботу в момент закінчення часу  $t_{1H}$  і виключити в момент часу  $t_{2H}$ . Вибір методу визначення похибки вимірювального контролю рівня з НПРС потребує подальших досліджень.

**Висновки.** Теоретично обґрунтована можливість використання ультразвукових пристроїв для вимірювального контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірними поверхнями. Показано, що при цьому можуть виникати похибки, які є залежними не тільки від вимірювального рівня РС, але й від висоти нерівномірності поверхні. Для зменшення цієї похибки можна використати

вторинний ефект ультразвукових сигналів. При цьому для уведення поправки в результат вимірювального контролю, достатньо до схеми обробки інформації ввести додаткові лічильники тактових імпульсів.

**Список літератури:** 1. *Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В.* Аналіз похибок вимірювання ультразвукових рівнемірів //Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» - № 48. – 2008. – с. 55-60. 2.Євсюков В.В. Математичні моделі ультразвукового засобу контролю рівня рідин з нерівномірною поверхнею.//Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. №18 (189). – 2012. – с.62-71. 3. .Стенцель Й.І., Євсюков В.В. Експериментальні дослідження ультразвукового методу контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірними поверхнями. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». Збірник наукових праць. «Енергоенергетика и преобразовательная техника». –Харків: НТУ «ХПІ» - №12. -2010. –с. 9-15. 4. Патент 74227 Україна, МПК G01F23/28. Ультразвуковий пристрій для вимірювання рівня середовищ з нерівномірною поверхнею. //Стенцель Й.І., Томсон А.В., Шапвалов О.І., Літвінов К.А. – № у 2012 03182; заявл. 19.03 2012; опубл. 25.10.2012: Бюл. №20.

*Надійшла до редколегії 19.04.2013*

УДК 681.586.773

**Теоретичні дослідження ультразвукового пристрою контролю рівня з нерівномірною поверхнею / Й. І. Стенцель, О. І. Шапвалов, К. А. Літвінов, В. В. Євсюков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 18 – 23. Бібліогр.: 4 назв.

В работе приведены результаты теоретических исследований ультразвукового устройства контроля уровня жидкостных сред с неравномерной поверхностью. Показано, что такие устройства имеют погрешности измерительного контроля, которые обусловлены рассеиванием ультразвукового сигнала от неравномерной поверхности. Погрешности могут быть уменьшены за счет использования вторичных ультразвуковых эффектов.

**Ключевые слова:** ультразвук, излучатель, поверхность, жидкость, среда, погрешность, сигнал, измерение.

The paper presents the results of theoretical investigations of the level control ultrasonic liquid media with non-uniform surface. It is shown that these devices have measuring accuracy control which are caused by scattering of the ultrasonic signal from an uneven surface. The errors can be reduced through the use of secondary effects of ultrasound.

**Keywords:** ultrasound transducer, the surface of the liquid, the environment, the error signal measurement.