

К. А. ЛІТВИНОВ, аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

РЕПЕРНИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РІВНЕМІРА З КІЛЬЦЕВИМ РУХОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО СИГНАЛУ

Досліджується принцип формування реперного сигналу в ультразвукових рівнемірах з кільцевим рухом електричного сигналу. Показано, що відношення тривалості руху УЗС в прямому та зворотному напрямку не залежить від рівня рідини в ємності та може бути використано як реперний сигнал. Так як зворотний УЗС проходить подвійну відстань в газовому середовищі, то його зміна за рахунок відхилення впливових факторів є більшою, ніж для УЗК прямого руху, що можна використати для уведення поправки в результат вимірювального контролю рівнеміра.

Ключові слова: рівень, рідина, вимірювання, перетворення, ультразвук, реперний сигнал, імпульс, випромінювач, середовище.

Вступ. Сучасні ультразвукові рівнеміри (УЗР) рідинних середовищ (РС), як правило, засновані на вимірюванні часу проходження ультразвукового сигналу (УЗС) від випромінювача (УЗВ) до приймача (УЗП). При цьому УЗС проходить подвійну відстань в газовому середовищі (ГС) – від випромінювача ультразвукового імпульсу (УЗІ) до поверхні РС і в зворотному напрямку [1-3]. Так як в ГС може змінюватися температура, тиск, а також його склад, наприклад, за рахунок випаровування рідини, то змінюватиметься й швидкість розповсюдження УЗС, котра визначається за формулою:

$$v_c = \sqrt{k_a P / \rho_c}, \quad (1)$$

де k_a – адіабатичний коефіцієнт для газів, P – тиск ГС, ρ_c – густина ГС.

Так як згідно зі законом Менделєєва-Клапейрона [4, 5] густина газу $\rho_c = M_c P / R_c T$, де M_c – молекулярна вага газової суміші; R_c – універсальна газова стала, T – температура, то швидкість розповсюдження УЗС у ГС дорівнюватиме:

$$v_c = \sqrt{k_a R_c T / M_c}. \quad (2)$$

Аналізуючи рівняння (1) і (2), приходимо до такого висновку: рівняння (1) є найбільш ефективним для використання в УЗР, так як існують засоби для достатньо точного вимірювання абсолютного тиску та густини газових сумішей, що дозволяє вводити відповідні поправки до результату вимірювального контролю рівня РС [6, 7]. Рівняння (2) є більш зручним при вимірюванні рівня рідин з постійним складом ГС в резервуарах і достатньо високою температурою їх пароутворення. У сучасних УЗР, як правило, вводится поправка на зміну температури ГС, що звичайно є недостатнім для забезпечення високої точності вимірювального контролю. Окрім того в багатьох УЗР з метою зменшення похибок вимірювального контролю використовуються реперні пристрої (репери), котрі розташовуються в ГС на деякій відстані від УЗВ. Так як у цьому випадку відстань від репера до УЗВ є сталою, то час проходження УЗІ визначатиметься тільки зміною тиску та густини ГС (рівнозначно зміною температури та складу газу). Як правило, в УЗР з реперним пристроєм використовується один і той же УЗІ, котрий спочатку відбивається від репера, а потім від поверхні РС. До основних недоліків таких УЗР є достатньо велика зона нечутливості, яка досягає до 0,6 метри, що призводить до неефективного використання ємкості та складнощів при вимірюванні рівня рідин в технологічних апаратах з малою висотою. Враховуючи, що ультразвуковий метод вимірювального контролю рівня відноситься до одних з найбільш простих і точних, то дослідження способів підвищення їх точності та розширення діапазону вимірювального контролю є важливою науково-технічною задачею.

Мета статті і постановка досліджень. Метою статті є теоретичне обґрунтування методу реперного сигналу для підвищення точності вимірювального контролю рівня РС, побудованого на сталості відношення товщини газового середовища при прямому та зворотному русі УЗІ. До основних задач роботи відноситься: фізичне та математичне обґрунтування принципу формування реперного сигналу, а також описання алгоритму його використання для підвищення точності вимірювального контролю.

Фізичне обґрунтування принципу формування реперного сигналу. Принцип роботи УЗР з реперним сигналом пояснюється схемою, приведеною на рис 1, де позначено: 1 – блок формування УЗІ; 2 – кабель; 3 – захисна металева мембрана; 4 – проміжний блок передачі УЗІ; 5 – поверхня РС; 6 – поплавок; 7 – електрод; 8 – основний приймач УЗС; 9 – УЗС прямого напрямку руху; 10 – УЗС зворотного напрямку руху; 11 – блок управління та обробки вимірювальної інфор-

мації. Блок 1 одночасно працює як випромінювач УЗК E_I , так і їх приймачем після повернення цього сигналу E_P від блоку 2. Принцип роботи рівнеміра полягає в наступному. Блок управління (БУ) 11 формує електричний збуджуючий імпульс (ЕЗІ), котрий поступає у блок 1, де він перетворюється в УЗІ. Останній по ізолюваному кабелю 2 передається до проміжного передаючого блоку 4 і далі через захисну мембрану 3 до ГС товщиною R . Пройшовши це середовище, УЗІ сприймається блоком 8, перетворюється в електричний сигнал і поступає в БУ 11 для обробки. Від приймаючої мембрани блоку 8 УЗІ відбивається, знову направляється в ГС, досягає блоку 4 і по кабелю поступає до блоку 1, у котрому перетворюється в електричний сигнал. Останній поступає в блок 11 для подальшої обробки. Таким чином, УЗР має два напрямки проходження УЗІ. Один (прямий) від блоку 1 до блоку 8 через ГС і другий (зворотний) – від блоку 8 до блоку 1. Різниця між основним і зворотним сигналами полягає в тому, що прямий УЗІ проходить ГС товщиною R один раз (від блоку 4 до приймача 8), а зворотний - два рази. Ці сигнали є послідовними, формуються одним і тим же ЕЗІ і не накладаються один на інший, як це має місце у відомих рівнемірах з реперними пристроями.

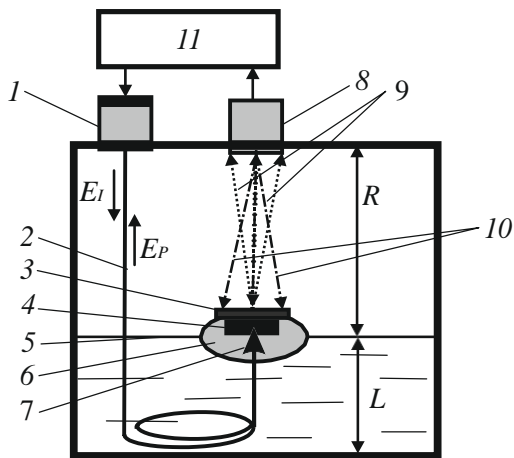


Рис. 1 - Схема ультразвукового УЗР зі зворотним напрямком руху УЗІ

Час проходження УЗІ вимірюється як для прямого (t_1), так і для зворотного (t_2) напрямку, починаючи з моменту подачі ЕЗІ в блок 1 до моменту появи відповідних напруг на вході в БУ 11. Тривалості часу t_1 і t_2 запам'ятовуються у відповідному пристрої і використовуються для розрахунку рівня L РС та уведення поправки у результат вимірального контролю.

Математичні моделі УЗР. Як показано в [8] час проходження УЗІ у ГС при деякому спрощенні описується наступним рівнянням

$$t_1 = R_L \left\{ \frac{u_0}{U_E} \sqrt[3]{ \frac{2k_\varepsilon m_c (v_\Pi \rho_\Pi)^2 D_M D_i^3 \sqrt{D_i \rho_\Pi} \omega - 1}{2K_0 v_c (1 + k_\varepsilon v_M) k_1 S_\Pi D_\Pi \sqrt{D_\Pi} [\sin(\omega t_k)]^2} } \right\}, \quad (3)$$

де R_L - відстань від поверхні РС до приймача УЗІ; U_E - напруга електричного збуджуючого сигналу; u_0 - опорна напруга; K_0 - коефіцієнт передачі виміральної схеми; k_ε - стала; m_c - маса коливальної системи приймача УЗІ; v_Π - лінійна швидкість руху пластини п'єзокерамічного елемента (ПКЕ); D_Π - жорсткість пластини; k_1 - коефіцієнт демпфірування її руху (приймається, що пластини ПКЕ жорстко кріпиться до металевої захисної мембрани і створює коливальну систему); S_Π - активна площа пластини ПКЕ; ρ_Π - щільність керамічного матеріалу ПКЕ; D_i - коефіцієнт перетворення i -го реологічного переходу; D_M - ефективний коефіцієнт перетворення коливальної системи; ω - частота вільних коливань системи; v_c - швидкість руху коливальної системи; v_M - швидкість перенесення електромагнітної енергії; t_k - час вільних коливань.

У рівнянні (3) позначимо коефіцієнт перетворення

$$N_1 = \frac{u_0}{U_E} \sqrt[3]{ \frac{2k_\varepsilon m_c (v_\Pi \rho_\Pi)^2 D_M D_i^3 \sqrt{D_i \rho_\Pi} \omega - 1}{2K_0 v_c (1 + k_\varepsilon v_M) k_1 S_\Pi D_\Pi \sqrt{D_\Pi} [\sin(\omega t_k)]^2} } \cdot \quad (4)$$

Тоді, приймаючи до уваги, що залежність $t_1 = f(R)$ є лінійною, з (3) отримуємо:

- для прямого ходу УЗІ поточне значення часу:

$$t_1 = N_1 R_1; \quad (5)$$

- для зворотного ходу УЗІ поточне значення часу:

$$t_2 = N_1 R_1 + N_2 R_2 = t_1 (1 + N_2 R_2 / N_1 R_1). \quad (6)$$

Так як вимірювальна відстань при прямому та зворотному ході УЗІ є сталою, то $R_1 = R_2$. Тоді рівняння (6) набуває такої форми:

$$t_2 = N_1 R_1 + N_2 R_2 = t_1 (1 + N_2 / N_1), \quad (7)$$

або

$$t_2 / t_1 = (1 + N_2 / N_1). \quad (8)$$

Так як параметр N_1 визначається тільки прямим ходом УЗІ, а N_2 - прямим і зворотним його ходом, то рівняння (8) можна записати таким чином:

$$\frac{t_2}{t_1} = 1 + \left(\frac{N_1 \pm \Delta N}{N_1} \right) = 2 \pm \frac{\Delta N}{N_1}, \quad (9)$$

де $\Delta N = N_2 - N_1$.

Якщо зміна параметрів перетворення УЗР є відсутньою, то для лінійної статичної характеристики за зворотним напрямом руху УЗІ $\Delta N = 0$ і $t_2 = 2t_1 = const$. Якщо є зміна параметрів перетворення, наприклад, за рахунок відхилення температури ГС, тиску чи складу газу від їх номінальних значень, то це приводить до відповідної зміни відношення $t_2 / t_1 = 2 \pm \Delta t / t_1$, де Δt - абсолютна похибка вимірювального контролю. Враховуючи сказане, рівняння (9) приводиться до такого вигляду:

$$\pm \Delta N = N \left(\frac{t_2}{t_1} - 2 \right), \quad (10)$$

де N_{10} - номінальне значення параметра.

З рівняння (10) видно, що абсолютна похибка вимірювального контролю рівня запропонованого рівнеміра повністю визначається відношенням часу зворотного та прямого ходу УЗІ. Якщо номінальне (реперне) значення співвідношення часу $k_{r0} = 2$, а поточне $k_r = t_2 / t_1$, то рівняння (10) приводиться до такої форми:

$$\Delta N = N_{10} (k_r - k_{r0}). \quad (11)$$

Так як $N_1 = t_1 / R_1$, то розклавши цю рівність у ряд Тейлора та обмежившись його лінійною складовою, отримуємо: $\Delta N = t_1 \Delta R_1$. Підставивши цей вираз у (11) маємо:

$$\delta_L = \Delta k_t / (1 \pm \delta_{t_1}), \quad (12)$$

де $\delta_L = \Delta L / L$ - відносна похибка вимірювального контролю рівня РС; $\Delta k_t = k_t - k_{t_0} = k_t - 2$ - абсолютна зміна коефіцієнта співвідношення часу зворотного та прямого ходу УЗІ; $\delta_{t_1} = \Delta t_1 / t_1$ - відносна похибка вимірювального контролю часу прямого ходу УЗІ.

Так як реальний коефіцієнт співвідношення часу k_t визначається при кожному вимірюванні, то він є відомим і запам'ятовується вимірювальною схемою рівнеміра. Враховуючи, що номінальне значення цього коефіцієнта теж є відомим і рівним 2, то розраховується приріст коефіцієнта співвідношення, який обумовлений відхиленням впливових факторів від їх номінальних значень. Рівняння для зміни коефіцієнта співвідношення Δk_t запишемо таким чином:

$$\Delta k_t = k_t - 2 = (\Delta t_2 - 2\Delta t_1) / t_1 = \Delta t / t_1. \quad (13)$$

З (13) можна визначити час Δt , який потрібно додати до вимірюваного часу t_1 (або відняти від нього), щоби зменшити вплив зміни зовнішнього чи внутрішнього фактора:

$$\Delta t = \Delta k_t t_1 = t_2 - 2t_1. \quad (14)$$

Блок-схема роботи вимірювальної схеми рівнеміра приведена на рис. 2, на якому позначено: 1 - блок формування ЕЗІ; 2 - приймач УЗІ зворотного ходу; 3 - захисна металева мембрана; 4 - перетворювач; 5 - рівень РС; 6 - поплавок; 7 - електрод; 8 - приймач УЗІ прямого ходу; 9 - УЗІ прямого ходу; 10 - УЗІ зворотного ходу; 11 - підсилювач електро-рушійної сили (ЕРС) прямого ходу УЗІ; 12 - підсилювач ЕРС зворотного ходу УЗІ; 13 - блок живлення; 14 - блок визначення амплітуди сигналу; 15 - мікропроцесорний контролер блоку управління (БУ); 16 - компаратор; 17 - блок нормалізації; 18 - мікропроцесорний контролер блоку обробки інформації (БОІ); 19 - блок пам'яті; 20 - блок індикації.

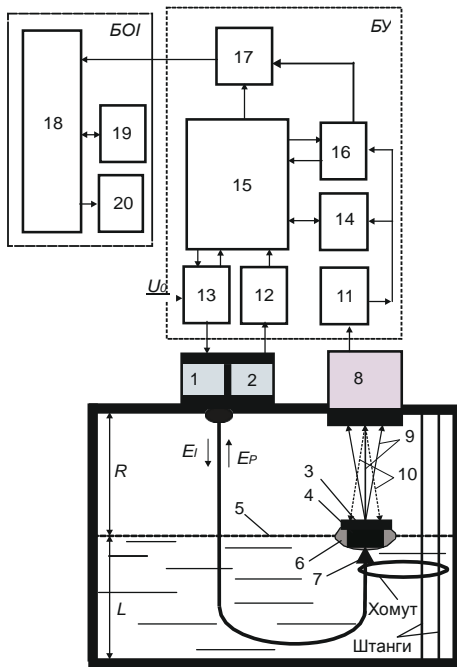


Рис. 2 - Блок-схема процесу вимірювання рівня

Принцип роботи вимірювальної схеми УЗР. Блок 13, який призначений для живлення електричної вимірювальної схеми рівнеміра, формує ЕЗІ заданою амплітудою E_I і подає його по кабелю до перетворювача 1, який перетворює цей електричний сигнал в УЗІ за допомогою ПКЕ 4. Так як ПКЕ жорстко зв'язаний з металевою мембраною 3, то УЗІ випромінюються в ГС товщиною R . Після проходження цього середовища УЗІ сприймаються приймачем 8, у котрому перетворюються в ЕРС за частотою УЗІ, формуючи таким чином електричний сигнал прямого ходу. Далі цей сигнал поступає на підсилювач 11, блок 14 визначення амплітуди та компаратор 16. Одночасно ці УЗІ відбиваються від поверхні приймача 8 і повертаються до перетворювача 4 і далі по кабелю до приймача 2, формуючи таким чином сигнал зворотного ходу E_P . Останній поступає в підсилювач 12 і далі направляє в контролер БУ 15. В останній поступає також сигнал прямого ходу. У БУ запам'ятовуються сигнали прямого та зворотного ходу УЗІ, визначається час прямого t_1 та зворотного t_2 ходу, розраховується коефіцієнт їх

співвідношення, порівнюється цей коефіцієнт з опорним і визначається різниця $\Delta t = t_2 - 2t_1$. Якщо $\Delta t \neq 0$, то включається генератор тактових імпульсів, який послідовно генерує імпульси відповідної тривалості і подає їх на компаратор 16. Одночасно з генератором тактових імпульсів включається лічильник, котрий відраховує їх кількість до тих пір, поки не виконуватиметься наступна рівність: $t_i N = \Delta t$, де t_i - тривалість тактового імпульсу, N - їх кількість, відрахованих лічильником. У блоці 16 уводиться відповідна поправка і корегований сигнал поступає в підсилювач 17, а далі подається в контролер 18 БОІ.

Висновки. Дослідження УЗР рідинних середовищ з кільцевим рухом електричного сигналу показали, що для підвищення точності вимірювального контролю можна використати принцип зворотного напрямку руху УЗІ в ГС. Так як зворотний УЗІ проходить подвійну відстань в ГС, то при нормованих його параметрах відношення часу, за який УЗІ проходить цю відстань, до часу проходження УЗІ прямого напрямку руху є сталою величиною і не залежить від вимірювального рівня. У цьому випадку коефіцієнт співвідношення часу зворотного та прямого напрямку руху УЗІ дорівнює відношенню відповідної товщини ГС і дорівнює двом. Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що коефіцієнт співвідношення часу змінюється тільки в разі відхилення впливових зовнішніх чи внутрішніх факторів від їх номінальних значень. Таким чином відхилення коефіцієнта співвідношення від його нормованого значення можна використати для формування поправки до результату вимірювального контролю. Реалізація такого принципу формування реперного сигналу є достатньо простою і не вимагає наявності механічних реперних пристроїв. Особливо ефективними є такі рівнеміри при вимірювальному контролі рівня в трубопроводах та ємностях малої висоти.

Список літератури: 1. *Бабилов О. И.* Контроль уровня с помощью ультразвука / *О. И. Бабилов.* – Л. : Энергия, 1971. – 98 с. 2. *ФрайденДж.* Современные датчики. Справочник / *Дж. Фрайден.* – М. : Техносфера, 2006. – 592 с. 3. *Жданкин В. К.* Приборы для измерения уровня / *В. К. Жданкин* // Современные технологии автоматизации. – М. : СТА-ПРЕСС, 2002. - № 2. – С. 6 – 19. 4. *Кузьмичев В. Е.* Законы и формулы физики / *В. Е. Кузьмичев.* – К. : Наук. думка, 1989. – 864 с. 5. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / *Х. Кухлинг.* – М. : Мир, 1982. – 520 с. 6. *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. 7. *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. 8. *Літвінов К. А.* Математичні моделі випромінювача ультразвукових рівнемірів / *К. А. Літвінов* //

Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2014.
– № 9(216). – С. 108-113.

Bibliography (transliterated): 1. Babikov, O. I. *Kontrol' urovnja s pomoshh'ju ul'trazvuka*. Leningrad: Jenergija, 1971. Print. 2. Frajden, Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik*. Moscow: Tehnosfera, 2006. Print. 3. Zhdankin, V. K. "Pribory dlja izmerenija urovnja." *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*. No.2. Moscow: STA-PRESS, 2002. 6-19. Print. 4. Kuz'michev, V. E. *Zakony i formuly fiziki*. Kyiv: Nauk. dumka, 1989. Print. 5. Kuhling, H. *Spravochnik po fizike*. Moscow: Mir, 1982. Print. 6. Stencel', J. I., A. V. Tomson and A. V. Rjabichenko "Matematichni modeli ul'trazvukovih rivnemiriv ridin." *MNTZh "Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah"*. No. 2. Hmel'nic'kij, 2006. 55-58. Print. 7. Stencel', J. I., A. V. Tomson and A. V. Rjabichenko. "Analiz pohibok vimirjuvannja ul'trazvukovih rivnemiriv." *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu "KhPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Priladi ta metodi nerujnivnogo kontrolju*. No. 48. Harkiv: NTU "HP", 2008. 55-60. Print. 8. Litvinov, K. A. "Matematichni modeli viprominjuvacha ul'trazvukovih rivnemiriv." *Visnik Shidnoukrains'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja*. No. 9(216). 2014. 108-113. Print.

Надійшла (received) 29.04.2015