

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-01>
УДК 681.121:006.91

Денисюк В. Ю.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0001-9268-5489
Лапченко Ю. С.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0001-7374-4770

Луцький національний
технічний університет / Україна

МЕТОДИКА ПОВІРКИ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНИХ ДАТЧИКІВ РІВНЯ

Анотація: у статті описано вимірювання рівня рідини при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях промисловості. Ці вимірювання особливо важливі в таких випадках, коли підтримання заданого рівня рідин, пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. На сьогодні існує велике число методів вимірювання рівня рідин та сипучих речовин. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих резервуарах, так і в ємностях, що знаходяться під тиском. Принцип дії акустичних та ультразвукових рівнемірів базується на вимірі часу проходження імпульсу ультразвуку від випромінювача до поверхні рідини та назад. Розроблено та описано методику покращення метрологічних характеристик акустичного датчика рівня ЕХО шляхом підвищення роздільної здатності датчика рівня.

Ключові слова: ультразвукове випромінювання, датчик рівня, випробування, акустичний перетворювач, автоматизована система керування, перетворення Фур'є, систематична похибка, повірка.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ультразвукове випромінювання знайшло широке використання у різних областях науки і техніки, у тому числі для контролю різноманітних технологічних параметрів, у дефектоскопії, для побудови неінвазивних засобів лікування тощо. Ультразвуковий сигнал (УЗС) випромінюється відповідним ультразвуковим випромінювачем (УЗВ) і направляється на досліджуваний об'єкт. Після перетворення УЗС повертається в ультразвуковий приймач (УЗП). На шляху свого проходження УЗС може декілька разів перетворюватися в різну форму. Кожний такий перехід є реологічним. В ультразвукових засобах контролю рідин використовуються, як правило, п'єзоелектричні (в основному п'єзокерамічні) елементи, які призначені для створення ультразвукових коливань (УЗК) при дії на них електричного збуджуючого імпульсу. Під дією електродинамічного зусилля п'єзоелектричний елемент, який має форму пластини круглої форми, деформується подібно металевій мембрані, яка жорстко закріплена за периметром. Після припинення дії електродинамічного зусилля УЗВ здійснює вільні механічні коливання, частота яких знаходиться в ультразвуковому

діапазоні. З іншої сторони, механічні коливання наводять в УЗВ електрорушійну силу з частотою тих же коливань, яка створює електродинамічне зусилля, котре направлено протилежно до напрямку руху УЗВ, створюючи гальмуючу дію. За рахунок цього загасання коливань УЗВ здійснюється швидше, що приводить до формування короткого ультразвукового імпульсу у формі інтегральної δ -функції Дірака. Виходячи зі сказаного в УЗВ протікають електромагнітні процеси, які супроводжуються перетвореннями електричної енергії в механічну та навпаки.

Вимірювання рівня рідини відіграє важливу роль при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях промисловості. Ці виміри особливо важливі в таких випадках, коли підтримання заданого рівня рідин, пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. На сьогодні існує велике число методів вимірювання рівня рідин та сипучих речовин. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих резервуарах, так і в ємностях, що знаходяться під тиском. Принцип дії акустичних та ультразвукових рівнемірів базується на вимірі часу проходження імпульсу ультразвука від випромінювача до поверхні рідини та назад. При прийомі відбитого імпульсу випромінювач стає датчиком. Якщо випромінювач розташований над рідиною, рівнемір називається акустичним; якщо усередині рідини – ультразвуковим. У першому випадку час, який вимірюється, буде тим більше, чим нижче рівень рідини H , у другому – навпаки. Електронний блок призначений для формування ультразвукових імпульсів, посилення відбитих імпульсів, вимірювання часу проходження імпульсом подвійного шляху (у повітрі або рідині) і перетворення цього часу в уніфікований електричний сигнал. Наприклад, акустичний рівнемір ЭХО-1 використовується для виміру рівня неоднорідних рідин (із перемінною за висотою щільністю), які кристалізуються і випадають в осад, у баках висотою до 3 м і має вихідний сигнал у виді постійного струму. До безперечних переваг використання акустичних показників рівня рідини відносяться: безконтактна можливість використання в забрудненому середовищі, а також у різного виду рідинах, відсутність високих вимог до зносостійкості і міцності обладнання, незалежність від щільності рідини. Але є й недоліки, на які варто звернути увагу: велика розбіжність конуса випромінювання, можливість виникнення помилок вимірювання при відбитті від нестаціонарних перешкод, може використовуватися тільки в резервуарах з нормальним атмосферним тиском.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Засоби вимірювання рівня застосовуються у всіх галузях промисловості та сільського господарства для вимірювання, контролю та регулювання параметрів технологічних процесів, випробування машин, обладнання та різної апаратури при кількісному обліку. Частка вимірювань рівня рідини від загального обсягу вимірів у промисловості становить близько 10 % [1]. Незважаючи на велику кількість методів вимірювання цих параметрів, потреба у високоточних датчиках надзвичайно велика і, очевидно, зростатиме у міру розвитку виробництва. Підвищення точності і забезпечення єдності вимірів належить до актуальних завдань метрології. Одночасно, високоточне

вимірювання цих параметрів необхідне економічної звітності та економії всіх видів ресурсів.

Найбільш перспективні ультразвукові рівнеміри, придатні для вимірювання рівня рідких та сипких матеріалів, желеподібних та двофазних продуктів та зріджених газів. Вони працюють в агресивних, вибухо- та пожежонебезпечних умовах, у широкому діапазоні температур та тисків [2, 3]. Незважаючи на широке поширення ультразвукових рівнемірів, їх потенційні можливості до кінця не реалізовані. Основні напрями вдосконалення – схемотехніка апаратної частини, нові алгоритми обробки сигналу та розширення функціональних можливостей рівнемірів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Методика покращення метрологічних характеристик датчика полягає в підвищенні роздільної здатності датчика, що забезпечується тим, що чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $n/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 < \alpha < \pi/2$.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Датчики рівня акустичні типу ЕХО призначені для безперервного дистанційного вимірювання рівня:

- рідких середовищ, в тому числі в'язких, неоднорідних, що випадають в осад, вибухонебезпечних, високоагресивних тощо, при температурі вимірюваного середовища від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску до 4,0 МПа;

- сипучих і шматкових матеріалів з розмірами гранул до 300 мм при температурі вимірюваного середовища від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведенні перевірки повинні бути виконані наступні операції:

- зовнішній огляд датчика;
- випробування датчика;
- визначення основної приведенної похибки;
- визначення варіації вихідного сигналу датчика.

При проведенні перевірки повинні бути застосовані такі засоби:

- установка повірочна рівнемірна імітаційна типу УПУ-35І ТУ25-02.020258-83;

- термометр ртутний з межами вимірювання від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- психрометр аспіраційний з межами вимірювання відносної вологості від 10 до 100%;

- барометр з межами вимірювання тиску від 610 до 900 мм. рт. ст. за ТУ 912-500-ТУ1.

Всі засоби перевірки повинні бути повірені (атестовані) органами метрологічної служби і мати чинні свідоцтва про перевірку або відбитки повірочного тавра.

Перевірка повинна проводитися в заводських, випробувальних та інших лабораторіях (приміщеннях), де повинні бути дотримані наступні умови:

- температура навколишнього повітря – $20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- атмосферний тиск – 84-106,4 кПа;
- відносна вологість – 30-80 %;
- зміна температури протягом повірки – не більше 0,5 °С;
- живлення здійснюється від мережі змінного струму напругою – $220 \pm 4,4$ В і частотою – 50 Гц;
- опір зовнішнього навантаження в ланцюзі вихідного сигналу – не більше 200 Ом;
- відсутність вібрації, джерел електричних і магнітних (крім зеленого) полів.

При заміні термоопору в акустичному перетворювачі датчика, що повіряється на еталоний опір, номінальне значення якого дорівнює значенню термоопору при 20 °С, допускається проводити повірку при температурі навколишнього повітря (20 ± 5) °С.

Перед проведенням повірки повинні бути виконані наступні підготовчі роботи:

- необхідно ознайомитися з правилами техніки безпеки і роботи з електроустановками;
- підключити датчик і установку згідно з рисунком 1, заземлити їх корпус і витримати у включеному стані не менше 30 хв. Випромінюючу поверхню акустичного перетворювача повіреного датчика заглушити паролоном.

При проведенні зовнішнього огляду повинно бути встановлено відповідність датчика, що повіряється вимогам технічної документації в частині комплектності, маркування та зовнішнього вигляду. Випробуванням повинно бути встановлено загальне функціонування датчика (надходження сигналів від будь-якої відбиваючої поверхні) і його роботоздатністю згідно з відповідним розділом технічного опису або паспорта на датчик.

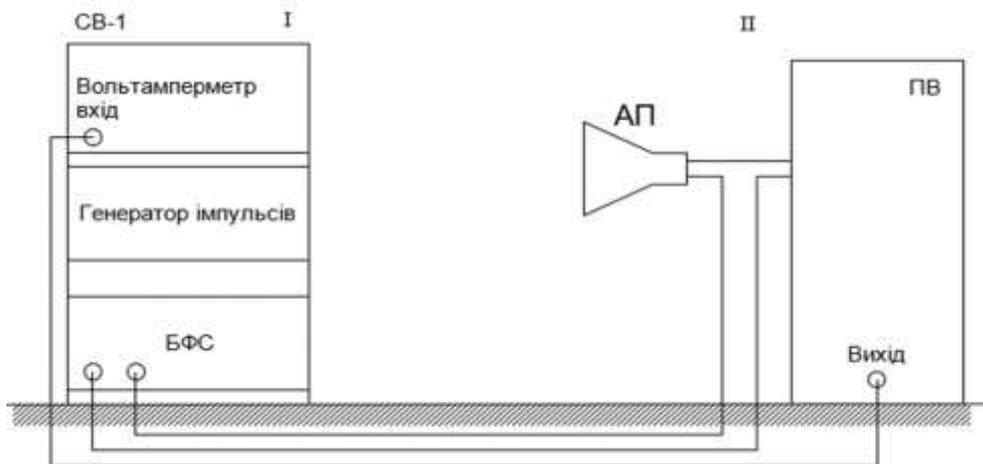


Рисунок 1 – Структурна схема з'єднань засобів повірки датчиків рівня акустичних типу ЕХО: I – установка повірочна рівнемірна імітаційна типу УПУ-35I; СВ-I – стійка вимірювання, що включає в себе вольтамперметр, генератор імпульсів, блок формування сигналів БФС; II – датчик рівня акустичний типу ЕХО, що повіряється; АП – акустичний перетворювач; ПВ – перетворювач вимірювальний

Визначення основної приведенної похибки датчика виконується на установці УПУ-35І. Імітація вимірюваного рівня датчика виконується за допомогою електронного блоку фіксованим значенням тимчасової затримки зондуєчого сигналу в вимірювальному тракті установки.

Перевірити правильність розташування ручок генератора Г5-60 установки УПУ-35І. Положення ручок має бути наступним: запуск – П, період Т-000000; часове зрушення – Д2-000000; тривалість – 0; режим роботи – 2, П, амплітуда 10 В.

Вибрати градуювальну таблицю, що відповідає типу датчика, що повіряється з певним діапазоном вимірюваного рівня. За обраною градуювальною таблицею на генераторі Г5-60 виставити одне з контрольних значень величини тимчасової затримки $t_{зад}$. відповідне значення 0, 30, 50, 75 і 100 % від верхньої межі діапазону вимірюваного рівня датчика, що повіряється і зробити відлік показів вихідного сигналу вольтамперметри установки УПУ-35І.

Основна приведена похибка датчика визначається як різниця між фактичним значенням вихідного сигналу J_i і розрахунковим значенням цього сигналу J_p , віднесена до діапазону зміни вихідного сигналу $J_{max}-J_0$ і визначається в %.

Для діапазонів 0-5,0 і 0-20,0 мА похибка обчислюється за формулою (1):

$$J_i = \frac{J_i - J_p}{J_{max}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Для діапазонів 4,0-20,0 мА похибка обчислюється за формулою (2):

$$J_i = \frac{J_i - J_p}{J_{max} - 4} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де J_i (мА) – значення вихідного сигналу датчика, виміряного вольт-амперметра;

J_p (мА) – розрахункове значення вихідного сигналу, що відповідає $t_{зад}$ з градуювальної таблиці;

J_{max} (мА) – максимальне значення вихідного сигналу, що відповідає верхній межі діапазону вимірюваного рівня датчика, що повіряється;

i – число вимірювань.

Кількість вимірювань в кожній з п'яти зазначених вище контрольних точок повинно бути не менше трьох.

Максимальне значення величини J_i приймається за основну приведену похибку вимірювання рівня і не повинно перевищувати 0,75 абсолютного значення нормованої похибки датчика, що повіряється.

Визначення основної похибки датчика допускається проводити за допомогою щита-відбивача (рис. 2), що імітує положення контрольованого рівня.

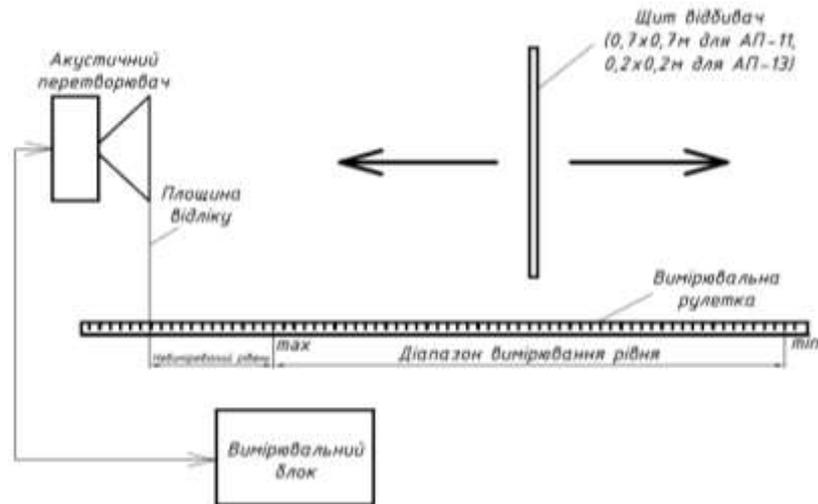


Рисунок 2 – Ескіз установки випробування датчика рівня

При цьому необхідні:

– атестована рулетка або лінійка не менше величини відстані, що дорівнює сумі невимірюваного рівня і діапазону вимірювання рівня датчика, який починається від площини відліку АП. Похибка рулетки повинна бути не більше 0,002 м;

– щит з відбиває звук матеріалу розміром не менше 0,5×0,5 м.

За градуювальною таблицею встановити щит на відстань від АП, відповідному 0, 30, 50, 75 і 100 % від верхньої межі діапазону вимірювання рівня. Щит повинен бути встановлений так, щоб його площина і геометрична вісь АП були взаємно перпендикулярні. Точність установки щита контролюється рулеткою.

Визначення варіації вихідного сигналу проводиться при зміні величини тимчасової затримки в бік її збільшення або зменшення в межах контрольної точки діапазону вимірюваного рівня датчика, що перевіряється.

Датчик вважається таким, що витримав випробування і не перевищує 0,75 абсолютного значення межі основної приведенної похибки вивіреного датчика, якщо варіація В вихідного сигналу, що визначається виразом (3):

$$B = \frac{J_1 - J_2}{J_{\max}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де J_1 і J_2 – значення вихідних сигналів відповідно при збільшенні і зменшенні тривалості тимчасової затримки.

Кількість вимірювань в кожній точці має бути не менше трьох.

Градуювальні таблиці акустичних перетворювачів представлено на рисунку 3.

Діапазон вимірювання, м 0..40
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-11
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	41836	0	0	4
12	30	31341	1.5	6	8.8
20	50	24344	2.5	10	12
30	75	15597	3.75	15	16
40	100	6851	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..0.6
Невимірюваний рівень, м 0.25
Акустичний перетворювач АП-13
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	2027	0	0	4
0.18	30	1582	1.5	6	8.8
0.3	50	1735	2.5	10	12
0.45	75	1589	3.75	15	16
0.6	100	1444	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-31
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	9121	0	0	4
6	30	8422	1.5	6	8.8
10	50	7955	2.5	10	12
15	75	7372	3.75	15	16
20	100	6789	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-8
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	12620	0	0	4
6	30	10871	1.5	6	8.8
10	50	9704	2.5	10	12
15	75	8247	3.75	15	16
20	100	6789	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-61
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	5471	0	0	4
6	30	8422	1.5	6	8.8
10	50	7722	2.5	10	12
15	75	6847	3.75	15	16
20	100	5973	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..40
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-11
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	8305	0	0	4
6	30	7606	1.5	6	8.8
10	50	7139	2.5	10	12
15	75	6556	3.75	15	16
20	100	5973	5	20	20

Рисунок 3 – Градувальні таблиці акустичних перетворювачів

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою.

Методика покращення метрологічних характеристик датчика.

Технічний результат полягає в підвищенні роздільної здатності датчика, що забезпечується тим, що чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 < \alpha < \pi/2$.

Досягнення технічного результату, що полягає в підвищенні роздільної здатності, забезпечується тим, що датчик має дві опорні точки чутливого елемента. Такими точками є відрізки довжиною l , розташовані під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння. Завдяки проходженню акустичного сигналу від цих відрізків до приймача вдається чітко зафіксувати моменти взаємодії середовища з чутливим елементом, причому в межах між відрізками вдається побудувати залежність амплітуди сигналу від густини середовища (рівня) i , відповідно, визначити рівень у межах між відрізками чутливого елемента. Довжини відрізків не повинні перевищувати довжини чутливого елемента i , як правило, вибираються з конструктивно розміщених під кутом α до напрямку сили тяжіння, що переслідує ту ж мету – підвищення роздільної здатності. При $\alpha=0$ маємо максимальну роздільну здатність, у разі $\alpha=\pi/2$ роздільна здатність мінімальна – рівень фіксується в точці (площині) [5].

На рисунку 4 показаний один елемент акустичного датчика рівня. Датчик складається з генератора 1, що подає радіоімпульси на п'єзоелемент 3, який випромінює акустичну енергію. Хвилевід 4, передає акустичний сигнал на чутливий елемент 5. Вторинна апаратура 2 включає перетворювач акустичних сигналів, АЦП (аналого-цифровий перетворювач), персональний комп'ютер ПК тощо.

Датчик працює наступним чином. При подачі на п'єзоелемент електричного радіоімпульсу акустичний сигнал по хвилеводу досягає чутливого елемента роздвоюється, проходить через плечі чутливого елемента, відбивається від місця приєднання хвилеводу до чутливого елемента від його вільних кінців – відрізків довжиною l (можливе виконання чутливого елемента у вигляді замкнутого контуру). Далі сигнал надходить на приймальну апаратуру і відповідним чином обробляється.

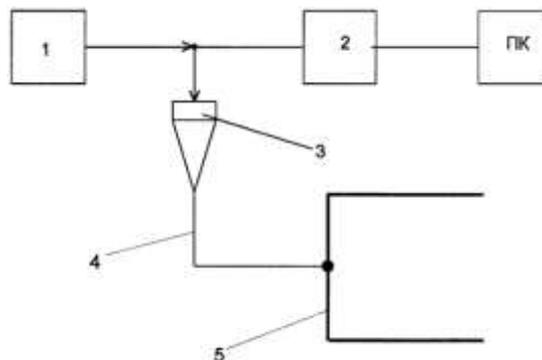


Рисунок 4 – Елемент акустичного датчика рівня: 1 – генератор; 2 – вторинна апаратура; 3 – п'єзоелемент; 4 – хвилевід; 5 – чутливий елемент

На рисунку 5 показана якісна залежність амплітуд з рідиною. Далі показано зміну амплітуди сигналу при подальшому підйомі рідини аж до повного затоплення другого плеча датчика рідиною (1/2).

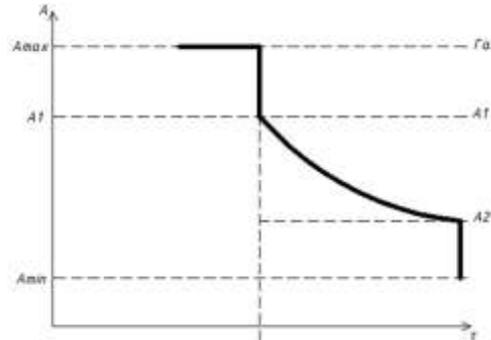


Рисунок 5 – Залежність амплітуд з рідиною

Як видно з рисунка 5, амплітуда змінюється від максимального значення A_{max} , відповідного знаходженню чутливого елемента в газі, до значення A_1 і A_2 , коли одне плече датчика стикається з газом A_1 і, відповідно, друге плече стикається з рідиною A_2 . Як видно, датчик дозволяє не тільки точно зафіксувати дискретні значення рівня (при значеннях амплітуд A_1 і A_2 але і визначити його проміжні значення, коли значення амплітуд лежать в інтервалі A_1 і A_2 .

В якості прикладу розглянуто роботу рівнеміра в умовах: високих температур і тисків. Рівнемір (рис. 6), встановлюється в стендовий компенсатор об'єму. Рівнемір містить кілька (n_1, n_2, n_3, n_4) елементів, що включають хвилевід, чутливий елемент і випромінювач. Відстань між відрізками l становить 0,5 м, що дозволяє контролювати дискретно рівень у 8-ми точках і мати практично лінійний розподіл сигналу в проміжних точках (між відрізками 1).

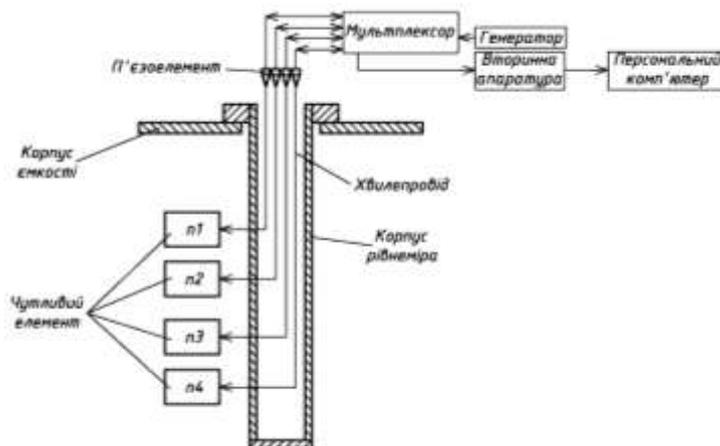


Рисунок 6 – Рівнемір в умовах високих температур і тисків

На рисунку 7 показано зміну рівня при дискретних точках, так і отримання значення рівня в проміжних точках.

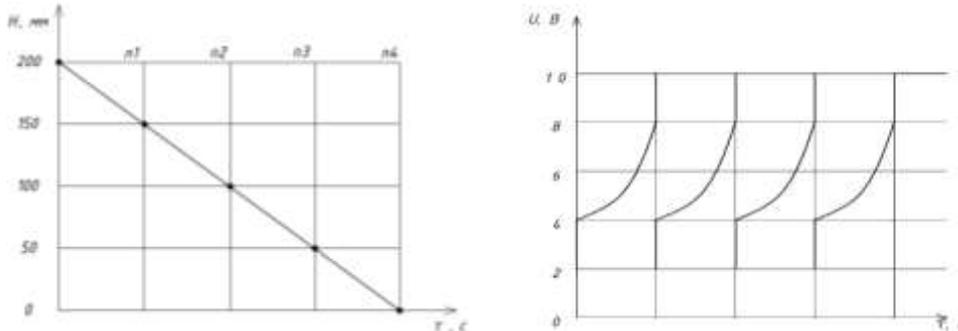


Рисунок 7 – Зміна рівня при дискретних точках: H – рівень рідини в компенсаторі об'єму; U – вихідний сигнал; t – час

Таким чином, пропонуване технічне рішення дозволяє збільшити роздільну здатність вимірювання рівня, в тому числі і в динамічних режимах.

Акустичний датчик рівня, що містить генератор імпульсів, підключений до випромінюючого п'єзоелементу, хвилевід, чутливий елемент і вторинну апаратуру, відрізняється тим, що вторинна апаратура включає перетворювач акустичних сигналів, аналого-цифровий перетворювач, персональний комп'ютер, а чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 \leq \alpha \leq \pi/2$.

Технічним результатом є підвищення точності вимірювання рівня рідини у резервуарах з просторово неоднорідним розподілом температури і/або газового складу, вільної від рідини порожнини, спрощення конструкції.

Технічний результат досягається тим, що резонансний акустичний рівнемір, що містить вимірювальну трубу, електроакустичний перетворювач і мікрофон, встановлені у верхній частині труби, до виходу мікрофона послідовно підключений попередній підсилювач, вихід попереднього підсилювача з'єднаний з процесором, у якому послідовно з'єднані аналого-цифровий перетворювач, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, процесор забезпечений послідовно з'єднаними блоком обчислення рівня рідини і індикатором, рівнемір виконаний однорезонаторним, блок виділення максимумів спектра і блок селекції для фіксації не більше трьох виділених спектральних максимумів з найбільшими часом, причому вихід генератора фазоманіпуляційного сигналу з'єднаний зі входом електроакустичного перетворювача, а послідовно з'єднані блок виділення максимумів спектра і блок селекції підключені між блоком другого перетворення Фур'є і блоком обчислення рівня рідини. Процесор виконаний у вигляді мікропроцесорного блоку зі світлодіодним або рідкокристалічним індикатором. Генератор

фазоманіпуляційного сигналу виконаний у вигляді генератора лінійно-частотно-модульованого сигналу.

Структурна схема резонансного акустичного рівнеміра представлена на рисунку 8, де блок виділення максимумів підключений до виходу генератора. Вихід мікрофона підключений до входу попереднього підсилювача, до виходу якого приєднаний вхід аналого-цифрового перетворювача. До виходу аналого-цифрового перетворювача послідовно підключені блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня, індикатор.

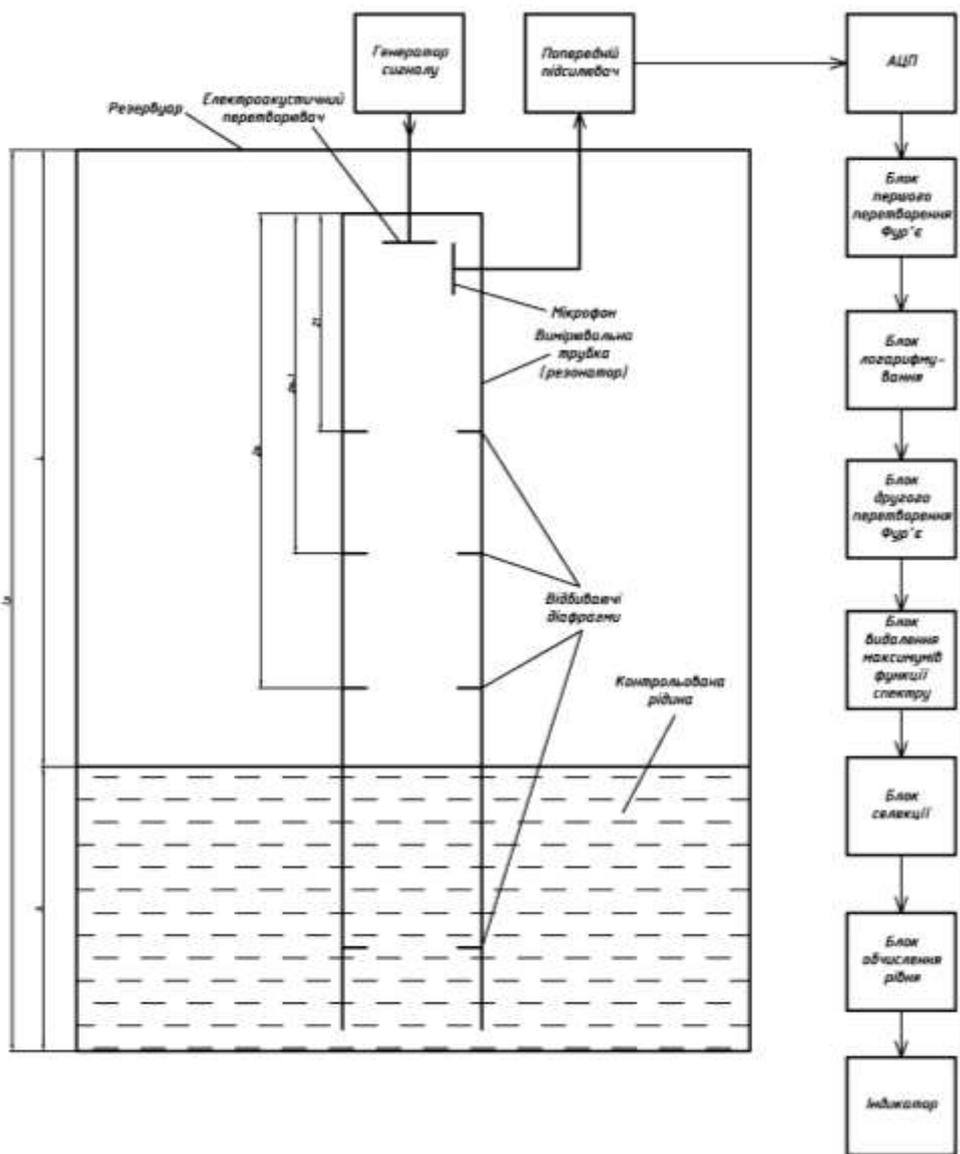


Рисунок 8 – Структурна схема резонансного акустичного рівнеміра

Резонансний акустичний рівнемір працює наступним чином.

Широкопasmовий фазоманіпульований сигнал постійної амплітуди, випромінюваний електроакустичним перетворювачем, збуджує стоячі акустичні хвилі (резонанси) на власних частотах вимірювальної труби (резонатора) (4):

$$f_L = c_L/2L \text{ та } f_m = c_m/2z_m, \quad (4)$$

де m – номер діафрагми;

L – відстань від перетворювача до поверхні рідини;

z_m – відстань від перетворювача до відбиваючої діафрагми з номером m ;

c_L, c_m – середні значення швидкості звуку на відрізках L і z_m відповідно.

Стоячі хвилі збуджують тільки ті відображають діафрагми, які знаходяться вище рівня рідини. На виході блоку другого перетворення Фур'є формується функція кепстру (5) з максимумами на значеннях кепстрального часу:

$$f_L = 1/t_L, \quad f_m = 1/t_m. \quad (5)$$

Ці значення з виходу блоку селекції надходять в блок обчислення. Якщо над поверхнею рідини знаходиться тільки одна відбиваюча діафрагма, то рівень рідини обчислюється обчислювальним блоком згідно з формулою (6):

$$h = L_p - z_1 t_1 / t_1, \quad (6)$$

де L_p – відстань від перетворювача до дна резервуара або позначки, прийнятої за нульовий рівень.

Невідома швидкість звуку в газовій порожнині труби в цей вираз не входить, і, відповідно, при її зміні точність вимірювання рівня рідини не знижується.

Якщо над поверхнею рідини виявляються дві або більше відображаючі діафрагми, то рівень рідини визначається обчислювальним блоком за значенням часу, що відповідає двом останнім незануреним в рідину діафрагмам, згідно з формулою (7):

$$h = L_p - z_m - \frac{t_L - t_m}{t_m - t_{m-1}} (z - z_{m-1}). \quad (7)$$

При оцінці рівня рідини за цією формулою знижується систематична похибка, що виникає при зміні швидкості звуку по довжині газової порожнини труби. Систематична похибка знижується завдяки як зменшенню інтервалу часу, що перераховується на відстань ($t_L = t_m$ замість t_L), так і підвищенню точності вимірювання швидкості звуку у вимірювальній трубі за рахунок

використання для цього сигналів від двох найближчих до рідини відбивних діафрагм.

Попередній підсилювач служить для підсилення сигналу, прийнятого мікрофоном, і придушення перешкод за межами робочого діапазону частот. Низький вихідний опір попереднього підсилювача дозволяє передавати сигнал по протяжній кабельній лінії і розміщувати блок аналого-цифрового перетворювача, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня та індикатор на значній відстані від контрольованого резервуара. Блоки електроакустичного перетворювача, генератора фазоманіпуляційного сигналу, мікрофона, попереднього підсилювача, розміщуються в оболонці (не показана), що кріпиться до верхньої частини вимірювальної труби.

Натурні випробування зразків однорезонаторного акустичного рівнеміра підтверджують високу точність вимірювань рівня рідини: при зміні рівня рідини до 10 м похибка його вимірювання не перевищує 1 мм.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою.

ВИСНОВКИ

Попередній підсилювач служить для підсилення сигналу, прийнятого мікрофоном, і придушення перешкод за межами робочого діапазону частот. Низький вихідний опір попереднього підсилювача дозволяє передавати сигнал по протяжній кабельній лінії і розміщувати блок аналого-цифрового перетворювача, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня та індикатор на значній відстані від контрольованого резервуара. Блоки електроакустичного перетворювача, генератора фазоманіпуляційного сигналу, мікрофона, попереднього підсилювача, розміщуються в оболонці (не показана), що кріпиться до верхньої частини вимірювальної труби.

Натурні випробування зразків однорезонаторного акустичного рівнеміра підтверджують високу точність вимірювань рівня рідини: при зміні рівня рідини до 10 м похибка його вимірювання не перевищує 1 мм.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Андросова В. Г., Броннікова Є. Г., Васильєв Є. Г. П'єзоелектричні резонатори : Довідник. Київ : Радіо і зв'язок, 2010. 392 с.

- [2] Бакаленко В. І., Оробей . О. І, Хроль В. Н. , Василенко А. А. Корекція температурної похибки акустичних рівнемірів. *Вимірювальна техніка*. 2015. №5. С. 32-36.
- [3] Бергман Л. Ультразвук та його застосування в науці та техніці. Переклад / М. В. Григор'єв, Л. Д. Розенберг. Київ : Вид-во іноземної літератури, 2013. 726 с.
- [4] Гриньова Л. Д., Слесарева Л. М., Молчанова Р. А. Матеріали та датчики для ультразвукових витратомірів. *Вимірювальна техніка*. 2007. № 7. С. 24-30.
- [5] Гусинський І. С. Малі АСУТП вимірювання рівня рідких та сипких матеріалів. *Прилади та системи управління*. 2008. № 8. С. 21-25.

METHOD OF VERIFICATION OF IMPROVEMENT THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC LEVEL SENSORS

Denysiuk V. PhD, Associate Professor
Lapchenko Y. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The article describes the measurement of liquid levels in the automation of technological processes in many industries. These measurements are especially important in cases where maintaining a given level of liquids is associated with the conditions of safe operation of the equipment. Today, there are a large number of methods for measuring the level of liquids and bulk solids. Level measurement occurs both in open tanks and in pressurized containers. The principle of operation of acoustic and ultrasonic level meters is based on measuring the time of passage of an ultrasound pulse from the emitter to the surface of the liquid and back. A method for improving the metrological characteristics of the acoustic level sensor ECHO by increasing the resolution of the level sensor has been developed and described.

Keywords: ultrasonic radiation, level sensor, testing, acoustic transducer, automated control system, Fourier transform, systematic error, verification.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
16.03.2025 р.	27.04.2025 р.	21.06.2025 р.