

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірвальних технологій  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Вдосконалення метрологічного забезпечення  
локаційних методів вимірювання рівня  
(тема)

Виконав: студент II курсу, групи ЗЯм-22-2

Корецький В.Є.  
(прізвище, ініціали)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Забезпечення якості»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Дегтярьов О.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Захаров І.П.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Забезпечення якості»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» січня \_\_\_\_\_ 2024\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Корецькому Владіславу Євгенійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення метрологічного забезпечення  
локаційних методів вимірювання рівня

затверджена наказом по університету від 03 листопада 2023 р. № 1294 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт вимірювання: рівень рідких, сипучих і кускових речовин, метод вимірювання – імпульсна ультразвукова локація, температура досліджуваного середовища -30...+50 °С, акустичний перетворювач АП-6, АП-6В (f=20000-10<sup>6</sup> Гц, L<sub>p</sub>=100-150 дБ), діапазон вимірювання: 0 –6 м, процесор ADuC Analog Devices, основна похибка ≤ 1%, вивід інформації на цифровий дисплей й струмовий вихід 0-5 мА, 0-20 мА, двонаправлений зв'язок з комп'ютером із застосуванням інтерфейсу RS-232 або RS-485)

Апаратне забезпечення: персональний комп'ютер "Logic Power», 2.4 ГГц, ОЗУ 16 Гб, Програмне забезпечення: ОС Windows.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: 4.1 Аналіз методів та засобів вимірювання рівня речовини. 4.2 Розробка способу покращення метрологічних характеристик рівнеміра. 4.3 Розробка структурної схеми рівнеміра. 4.3 Дослідження похибок та техніко-метрологічних характеристик рівнеміра. 4.4 Розробка методики калібрування ультразвукового рівнеміра.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1 Назва кваліфікаційної роботи. 5.2 Мета та задачі роботи. 5.3 Обґрунтування вибору методу вимірювання. 5.4 Розробка шляхів покращення метрологічних характеристик. 5.5 Розробка структурної схеми приладу. 5.6 Дослідження похибок та техніко-метрологічних характеристик рівнеміра. 5.7 Розробка методики калібрування ультразвукового рівнеміра.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	03.11.2023 – 12.11.2023	
2	Розробка програми випробувань	13.11.2023 – 20.11.2023	
3	Розробка методики випробувань	21.11.2023 – 30.11.23	
4	Розробка протоколу випробувань	01.12.2023 – 10.12.2023	
5	Написання пояснювальної записки	11.12.2023 – 23.12.2023	
6	Виконання графічної частини	24.12.2023 – 09.01.2024	
7	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедрі	10.01.2024	

Дата видачі завдання 03 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Дегтярьов О.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить 63 сторінки, 9 рисунків, 9 таблиць, перелік посилань з 18 назв.

АКУСТИЧЕСКИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДАВАЧ, РІВНЕМІР, УЛЬТРАЗВУК, П'ЄЗОРЕЗОНАТОР, ЗОНДУЮЧИЙ ІМПУЛЬС, КОНТРОЛЕР

*Об'єкт дослідження* – методи й засоби вимірювальної техніки, призначені для безконтактного дистанційного вимірювання рівня рідких речовин, у тому числі вибухонебезпечних, агресивних, неоднорідних, що випадають в осад, а також сипучих і кускових матеріалів.

*Мета роботи* – вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювань рівня речовин шляхом створення імпульсного ультразвукового рівнеміра з покращеними метрологічними й експлуатаційними характеристиками.

Розроблено спосіб розширення діапазону вимірювань і зниження похибки вимірювання рівня імпульсних ультразвукових рівнемірів. Розроблено алгоритми й схеми для реалізації пропонованих способів підвищення метрологічних характеристик.

Обґрунтовано вибір структури й параметрів засобу вимірювання рівня на основі точносних показників. Рівнемір забезпечує вимірювання поточних значень рівня з виходом: візуальним, з відображенням значень рівня на цифровому індикаторі; аналоговим, у вигляді сигналу постійного струму. Оцінено метрологічні характеристики розробленого рівнеміра з урахуванням впливу неінформативних параметрів аналізованого середовища. Отримані теоретичні й експериментальні результати дозволяють істотно розширити сферу застосування ультразвукових рівнемірів.

## ABSTRACT

The explanatory note to degree work contains 63 pages, 9 figures, 9 tables, reference list for 18 items.

ACOUSTIC TRANSDUCER, TRANSDUCER, LEVEL METER, ULTRASOUND, PIEZORESONATOR, PROBING PULSE, CONTROLLER

The object of the study is the methods and means of measuring technology, intended for non-contact remote measurement of the level of liquid substances, including explosive, aggressive, non-homogeneous, settling, as well as loose and lumpy materials.

The purpose of the work is to improve the metrological support for measuring the level of substances by creating a pulsed ultrasonic level meter with improved metrological and operational characteristics.

A method of expanding the measurement range and reducing the level measurement error of pulsed ultrasonic level meters has been developed. Algorithms and schemes have been developed to implement the proposed methods of improving metrological characteristics.

The choice of the structure and parameters of the level measuring device based on accuracy indicators is substantiated. The level meter provides measurement of current level values with output: visual, with display of level values on a digital indicator; analog, in the form of a direct current signal. The metrological characteristics of the developed level device were evaluated, taking into account the influence of non-informative parameters of the analyzed environment. The obtained theoretical and experimental results make it possible to significantly expand the scope of application of ultrasonic level meters.

## ЗМІСТ

С.

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів .....	7
Вступ.....	8
1.1 Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів рівнемірів.....	9
1.2 Види сигналів в ультразвукових рівнемірах.....	23
1.3 Аналіз структурних схем ультразвукових рівнемірів.....	27
2 Розробка способів покращення метрологічних характеристик ультразвукових рівнемірів.....	33
2.1 Розширення діапазону показань імпульсних ультразвукових рівнемірів з низькочастотними акустичними перетворювачами.....	34
3 Розробка структурної схеми .....	43
4 Аналіз похибок та невизначеностей.....	46
4.1. Аналіз додаткових похибок імпульсних ультразвукових рівнемірів.....	46
4.2 Похибка від швидкої зміни рівня рідини.....	50
4.3 Похибки, пов'язані з апаратною частиною рівня.....	51
4.4 Дослідження похибки непрямого виміру об'єму рідини.....	51
4.5 Оцінка невизначеностей при калібруванні.....	54
Висновки .....	55
Перелік посилань.....	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,  
ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АП – акустичний перетворювач

ВАСД (АСД) - вузол автоматичного стеження по дальності

ТАРП (ВАРУ) – тимчасовий автоматичний регулятор посилення

ВФ - видільник фронту

ГЗІ - генератор зондувальних імпульсів

ГРІ (ГСІ) - генератор рахункових імпульсів

ГТІ – генератор тактових імпульсів

ЛЗР – легкозаймисті рідини

П – перемикач

ПВ (ПУ) – перемножуючий вузол

УС (СС) - узгоджувальна схема

ПВ (СУ) - підсумовуючий вузол

П (У) – підсилювач

УЗ – ультразвук, ультразвуковий

ВОС (УО) - вузол обробки сигналу

## ВСТУП

Засоби вимірювання рівня застосовуються у всіх галузях промисловості та сільського господарства для вимірювання, контролю та регулювання параметрів технологічних процесів, випробуваннях 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 економічності 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.

## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РЕЧОВИНИ

### 1.1 Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів рівнемірів

Датчики рівня рідини можна розділити на два великі класи:

- з проміжним перетворенням рівня на механічні величини (переміщення, кут повороту, тиск);
- з безпосереднім перетворенням рівня електричні величини. Важливою особливістю останніх є безконтактного вимірювання рівня. Класифікація датчиків за принципом дії подано на рис. 1.1.

Датчики з проміжним перетворенням рівня рідини на механічні величини (клас 0) мають невисоку вартість і простоту пристрою і набули широкого поширення. Ці датчики мають відносно невисоку точність через проміжні перетворення. Підклас 00 – гідростатичні датчики рівня [4, 5]. В основі їх побудови лежить співвідношення (1.1):

$$P = \rho \int_0^H S(h) dh, \quad (1.1)$$

де  $P$  – вага речовини;

$\rho$  – питома вага рідини;

$S(h)$  – переріз резервуара на рівні  $h$  [6].

Для побудови гідростатичних датчиків рівня може бути використане й інше співвідношення (1.2):

$$p = \rho g H. \quad (1.2)$$

Метод зважування, заснований на співвідношенні (1.1), використовується для побудови датчиків з проміжним перетворенням рівня рідини на зусилля (підклас 000).

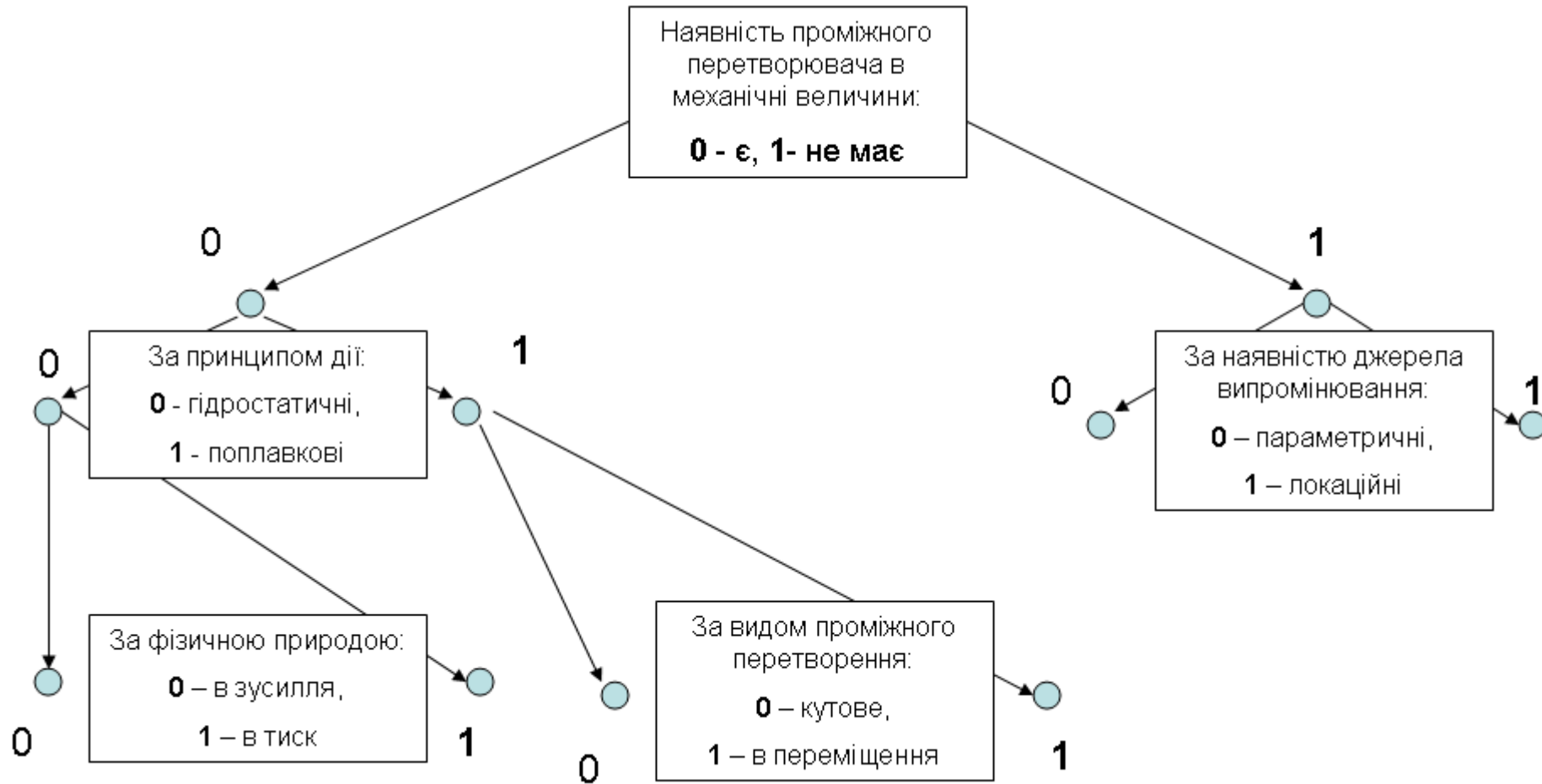
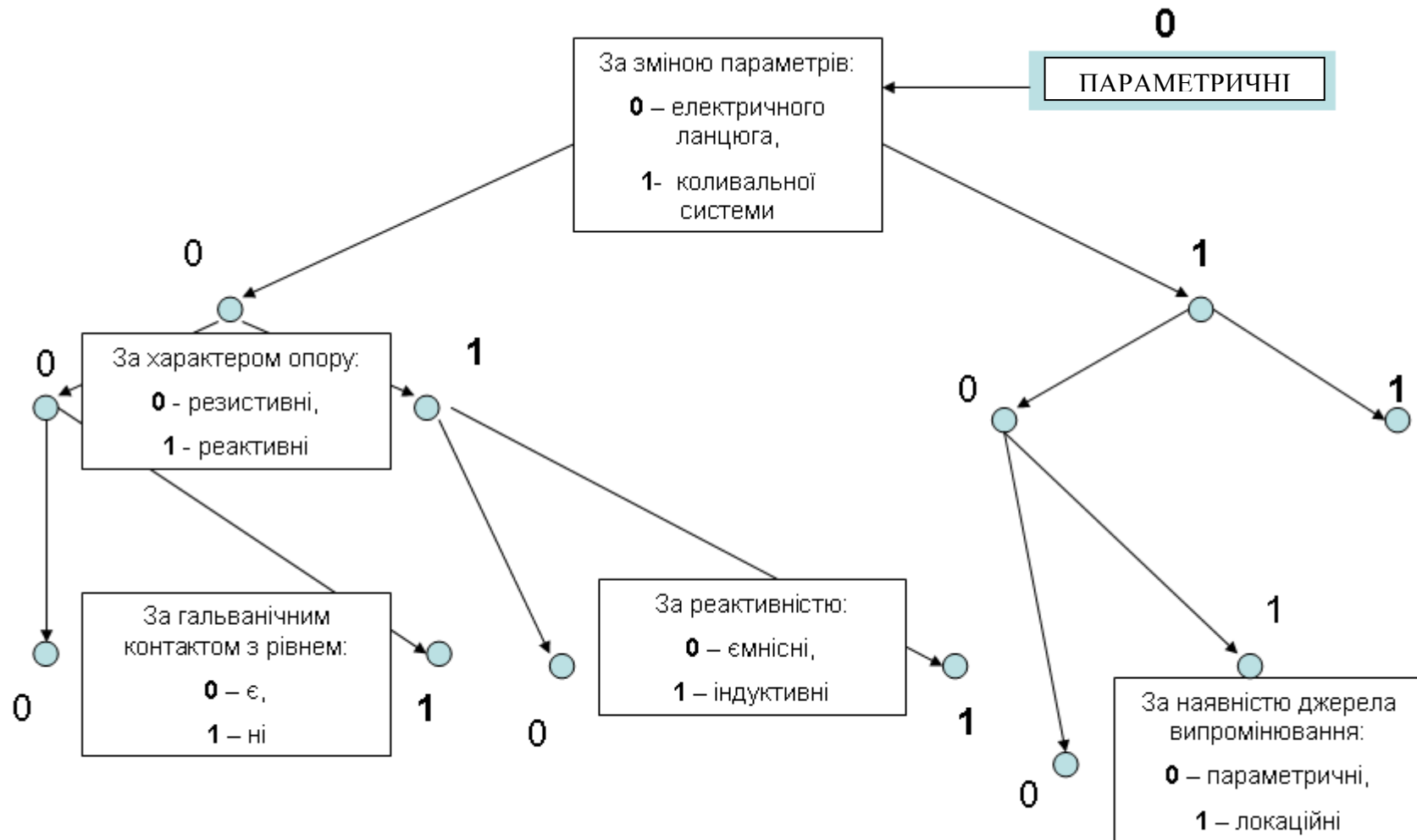
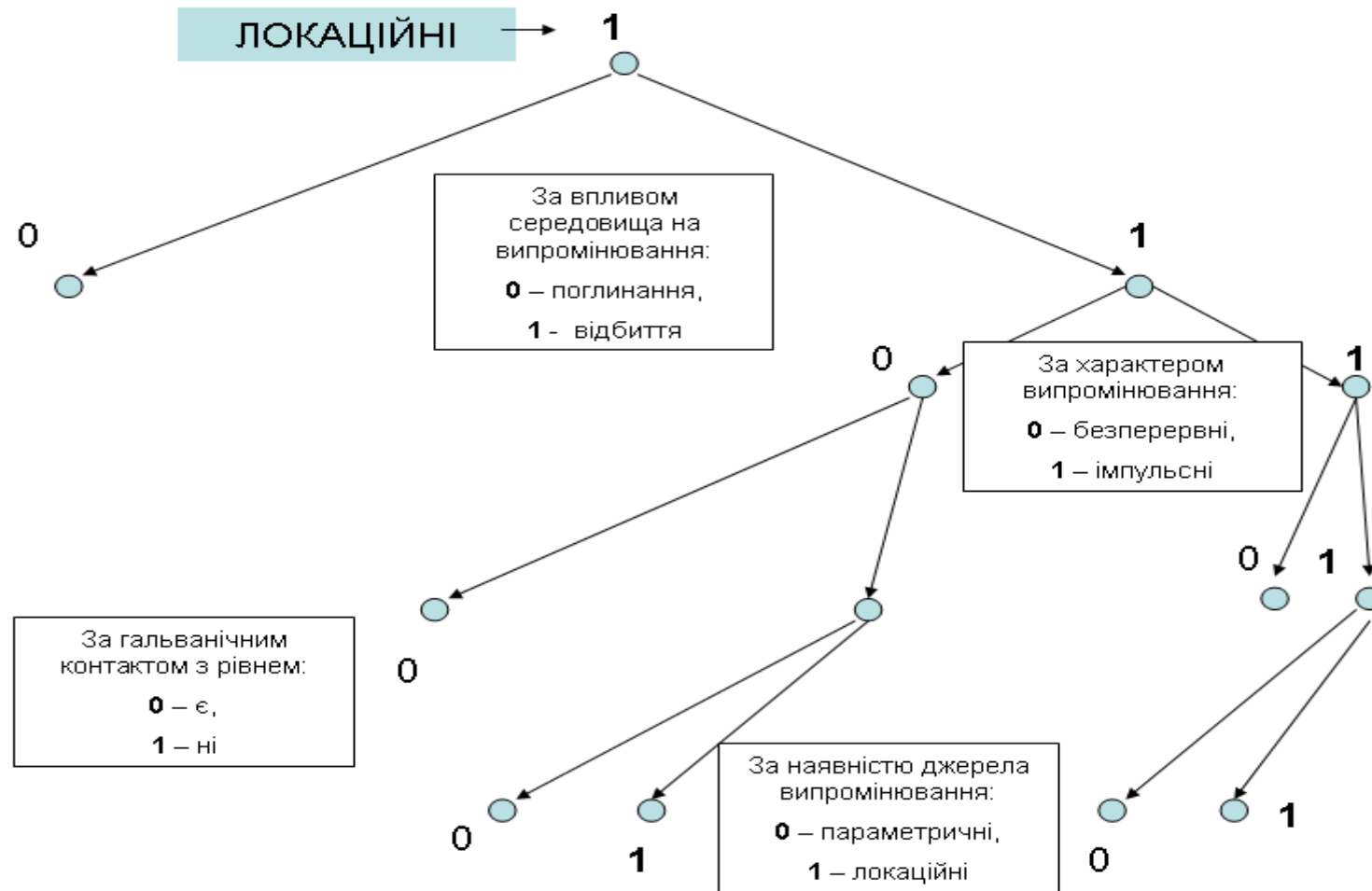


Рисунок 1.1 – Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів рівня речовини



Продовження рисунку 1.1 – Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів рівня речовини



Закінчення рисунку 1.1 – Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів рівня речовини

Співвідношення (1.2) дає можливість створення датчиків з перетворенням рівня тиску (підклас 001), які застосовуються для відкритих резервуарів.

У гідростатичних датчиках вимірюється вага рідини, а значення рівня виходить непрямим шляхом. У зв'язку з цим на результат вимірювання впливають багато факторів: зміна складу рідини (наявність домішок), зміна температури, що призводить до зміни густини. Тому неможливе створення високоточних рівнемірів на основі гідростатичних датчиків.

У поплавкових датчиках (підклас 01) елементом, що сприймає положення рівня рідини, є поплавець. Підйомна сила поплавця дорівнює

$$F(x) = V_{II} \rho_0 + (\rho - \rho_0) \int_0^{x_0} S_{II}(x) dx, \quad (1.3)$$

де  $F(x)$  – підйомна сила;

$V_{II}$  – об'єм поплавка;

$S_{II}(x)$  – площа перерізу поплавця на рівні  $x$ ;

$\rho$  – питома вага рідини, в яку занурена нижня частина поплавця;

$\rho_0$  – питома вага середовища над поверхнею рідини;

$x_0$  – висота поплавка.

Для перетворення рівня в кут повороту (підклас 010) і переміщення (підклас 011), можуть бути використані поплавець постійного занурення і поплавки змінного занурення. Подібні пристрої набули широкого поширення (вимір рівня палива в паливних баках автомобілів). Як перетворювач кута повороту електричну величину використовується поворотний резистор. Важлива перевага поплавкових датчиків полягає у простоті їх побудови та у простоті перетворення на код.

Загальним недоліком всіх датчиків поплавця є наявність елементів, безпосередньо контактують з вимірюваною рідиною, одним з джерел похибки є корозія поплавця або його обростання. Значний вплив на результат вимірювання надає зміна щільності рідини, що характерно для всіх датчиків групи 0. Датчики з

проміжним перетворенням рівня в механічні величини мають низьку надійність у зв'язку з наявністю рухомих частин, а також зміною параметрів часу через старіння пружних елементів. У зв'язку з вищевикладеним можна зробити висновок про недоцільність застосування датчиків групи 0 для побудови високоточних рівнемірів. У той же час, датчики групи 0 дозволяють будувати дуже прості пристрої рівнеміри, що застосовуються там, де не потрібна значна точність. Принципова відмінність датчиків класу 1 полягає у відсутності складових похибки, обумовлених проміжним перетворенням на механічні величини, тому їх застосовують при високих вимогах до точності рівнемірів. У основу розподілу їх у підкласи покладено наявність випромінювання. Датчики підкласу 10 – параметричні, зміна рівня призводить до зміни електричного опору чи резонансної частоти введеного резервуар чутливого елемента.

Електричні датчики (підклас 100) засновані на використанні таких фізичних властивостей рідини, як електропровідність та діелектрична проникність. Загалом вплив рідини на чутливий елемент можна виразити наступним чином:

$$\square Z = (R_0 + \Delta R) + j(X_0 + \Delta X), \quad (1.4)$$

де  $R_0, X_0$  – активна та реактивна складові комплексного опору  $Z$  чутливого елемента;

$\Delta R, \Delta X$  – складові, зумовлені впливом електропровідності та діелектричної проникності рідини.

Вимірювання складових  $\Delta R, \Delta X$ , що залежать від ступеня занурення чутливого елемента або від наближення поверхні рідини, дає необхідну інформацію про рівень рідини в резервуарі.

В основу поділу на підкласи покладено характер опору - активний (підклас 1000) та реактивний (підклас 1001). До переваг електричних датчиків рівня відносяться такі: відсутність рухомих частин, зручна форма подання вихідного сигнала.

лу, головний недолік - наявність струмопровідних частин у резервуарі, що ускладнює їх використання для вимірювання рівня ЛЗР.

Для рідин, що мають високу електропровідність, застосовуються резистивні датчики підкласу 10000 – кондуктометричні. У найпростішому випадку датчик складається із двох паралельних вертикально опущених у рідину електродів. Опір рідини між електродами залежить від розмірів зануреної частини електродів. Застосування резистивних датчиків цього типу має такі особливості. По-перше, для зменшення впливу електролізу [7], живити електроди необхідно струмом, що не містить постійної складової. По-друге, необхідно використовувати досить високу напругу, щоб вона значно перевищувала електрохімічний потенціал електродів, що пов'язано зі збільшенням струму, газовиділення та розкладання рідини.

Основним недоліком резистивних датчиків підкласу 10000 є значна похибка, що виникає через зміну питомого опору рідини від наявності домішок та високого температурного коефіцієнта опору рідин, особливо водних розчинів солей.

Для рідин, що мають низьку електропровідність, застосовуються резистивні датчики підкласу 10001. Резистивний елемент виконаний у вигляді ізольованого від рідини провідника з великим температурним опором. По провіднику пропускається струм такої величини, щоб температура неповантаженої частини була помітно вищою за температуру рідини. Занурена в рідину частина провідника охолоджується рідиною, причому зменшення опору резистивного елемента пропорційно до ступеня занурення його в рідину. Головний недолік - значна інерційність, що сягає десятків секунд, а також вплив температури рідини на результат вимірювання. Область застосування - контроль рівня палива в автомобілях, де інерційність дозволяє унеможливити вплив хвилювання поверхні рідини. Одне із важливих застосувань – вимірювання рівня рідкого гелію. У цьому випадку пропускання значного струму через датчик не потрібно, тому що занурена частина провідника має надпровідність.

Датчики з реактивним характером опору чутливого елемента (підклас 1001) використовуються у найрізноманітніших умовах. Широке застосування знаходять

ємнісні датчики (підклас 1001). Це пояснюється порівняно високою точністю, ізоляцією електродів від рідини та відсутністю явища електролізу. Практично ємнісні датчики можна виконати у двох варіантах: з вимірюванням ємності між двома напівзануреними електродами та з вимірюванням ємності між плоским горизонтальним електродом та поверхнею рідини [8].

Місткі датчики з вимірюванням ємності між електродом і поверхнею рідини можуть використовуватися тільки для електропровідних рідин.

До переваг ємнісних датчиків рівня відносять простота пристрою чутливого елемента, відсутність гальванічного зв'язку з рідиною, можливість безконтактного вимірювання рівня та висока точність.

Загальним недоліком всіх ємнісних датчиків рівня є залежність показань від зміни відносної діелектричної проникності рідини або пари (для другого варіанту). Діелектрична проникність помітно змінюється за наявності домішок.

Індуктивні датчики (підклас 10011) не набули широкого поширення через низьку чутливість, однак, в окремих випадках їх застосування цілком виправдане. Як правило, це вихрострумові датчики,

Загальний недолік датчиків підкласу 100 - сильна залежність показань від властивостей рідини, головним чином, питомого опору та діелектричної проникності. За винятком ємнісних датчики цього підкласу мають обмежене застосування.

14

Генераторні датчики (підклас 101) відрізняються від електричних тим, що як параметр, який залежить від рівня рідини, використовується резонансна частота незаповненої частини резервуара (підклас 1010) або напівзануреного резонансного елемента (підклас 1011). У літературі [9, 10, 11] генераторні датчики зазвичай називають резонансними, найчастіше відносячи це визначення лише до підкласу 1010. До цього ж підкласу належать і варіанти конструкції з використанням відкритих з одного кінця хвилеводів, частково занурених у рідину. Розрізняють два різновиди датчиків підкласу 1010: акустичні (підклас 10100) та електромагнітні або радіохвильові (підклас 10101).

Генераторні акустичні датчики рівня засновані на явищі виникнення резонансу в обсязі резервуара, не заповненому рідиною або напівзануреному хвилеводі. У літературі їх іноді відносять до ультразвукових, проте насправді резонансні частоти резервуарів великих розмірів лежать в інфразвуковому та частково звуковому діапазоні. Сигнал з АП, включеного в частотозадаючі ланцюги автогенератора, залежить від резонансної частоти незаповненої рідиною частини резервуара. Таким чином, за рахунок акустичного зв'язку частота автогенератора приблизно дорівнює частоті власних коливань незаповненого обсягу резервуара. Можлива неоднозначність результату виміру через порушення різних типів коливань. Деякі з них можна використовувати для вимірювання об'єму, причому неоднозначність усувається послідовним збудженням різних типів коливань та обчисленням результату резонансних частот [12, 13].

Умова резонансу виглядає так:

$$l = \frac{kc}{2f_k}, \quad (1.5)$$

де  $l_g$  – довжина незаповненої рідиною частини хвилеводу;

$k$  – порядок збуджуваних власних коливань;

$c$  – швидкість звуку в газі;

$f$  – частота власних коливань.

Важливою перевагою<sup>15</sup> генераторних акустичних датчиків перед імпульсними є можливість безперервного знімання інформації про рівень. Крім того, системи з резонансними УЗ-датчиками здатні прямо вимірювати обсяг. Однак, вони не набули широкого поширення через неоднозначність відліку, а також у зв'язку з низькою точністю, т.к. частота автогенератора залежить від власної резонансної частоти резервуара, а й від фазової характеристики АП.

Генераторні радіохвильові датчики засновані на використанні залежності своєї резонансної частоти вільної частини резервуара або порожнистого резонатора від властивостей та кількості рідини, що його заповнює. Застосування хвилеводів спричинене можливістю появи неоднозначності через порушення різних типів

коливань. У хвилеводі ймовірність порушення небажаних типів коливань значно нижча, ніж у резервуарі складної форми. Як порожнистий резонатор використовується або сам резервуар з рідиною, або металева труба - хвилевід, опущена в рідину. За допомогою фідера порожнистий резонатор з'єднується з генератором високої частоти та визначає частоту цього генератора. Частота є функцією висоти рівня. З'єднання обсягу резервуара з генератором здійснюється за допомогою мініатюрної антени у вигляді щтиря або витка.

Істотною відмінністю радіохвильових датчиків від ультразвукових є мала інерційність [14], що дуже важливо при швидких змінах рівня, а також можливість вимірювання рівня киплячих рідин. Недоліки у радіохвильових датчиків ті самі, що й у всіх інших, які використовують будь-які види випромінювання (УЗ, оптичних). Це неоднозначність відліку та сильний вплив температури, що призводить до зміни швидкості поширення хвиль у середовищі. На похибку вимірювання сильно впливає стан поверхні рідини, крім того, радіохвильові датчики реагують на зміну провідності рідини, яка може змінюватись у досить широких межах.

У датчиках підкласу 1011 частота генератора визначається резонансною частотою спеціально введеного резервуар елемента. Насамперед до них належить широкий клас струнних перетворювачів. Струна закріплюється кінцями на кришці та дні резервуара та пов'язана з генератором через електромеханічний перетворювач. Резонансна частота та згасання залежать від ступеня занурення у рідину. Область застосування таких датчиків - вимірювання рівня киплячих і пінистих рідин, т.к. стан поверхні мало впливає на резонанс. Датчик з резонансним елементом, що не вимагає закріплення на дні резервуара для вимірювання рівня електроліту в акумуляторах, показано на рис. 1.2.

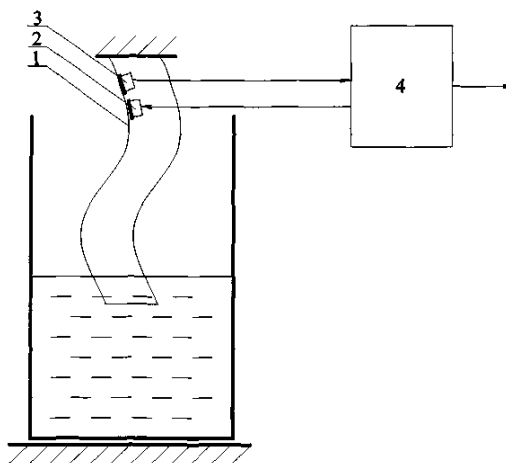


Рисунок 1.2 – Датчик із резонансним елементом

Датчик [10] містить елемент у вигляді порожнистої трубки 1, що є згинальним хвилеводом, до внутрішньої поверхні якої приклеєні два п'єзокерамічні елементи 2 і 3. Вони включені в ланцюг зворотного зв'язку підсилювача 4, причому елемент 2 підключений до виходу, а елемент 3 - до входу підсилювача. Самовзбудження відбувається на частоті власних згинальних коливань трубки, які залежать від рівня рідини. Перевагою датчика є можливість вимірювання малих рівнів та простота установки, недолік – невисока точність.

Датчики підкласу 11 ґрунтуються на використанні випромінювання хвиль різної фізичної природи. Головною їхньою відмінністю від датчиків підкласу 10 та класу 0 є можливість безконтактного знімання інформації. Для визначення положення межі поділу середовищ газ – рідину можна використовувати як явище поглинання хвилі в обсязі (підклас 110), так і відображення поверхні рідини (підклас 111). Явище поглинання використовується, головним чином, радіоізотопних датчиках. Поглинання радіоактивного випромінювання у повітрі зневажливо мало порівняно з поглинанням у рідинах. Це використовується визначення положення межі розділу середовищ рідина - газ.

Використання жорстких ( $\beta$ ,  $\gamma$ , рідше рентгенівського) випромінювань дозволяє здійснити вимірювання рівня рідин без безпосереднього контакту з ними. Широке застосування, як найточніші, знаходять датчики з механічною системою,

що стежить. У слідкуючих рівнях відносна похибка вимірювання рівня може бути доведена до 0,1% [18].

Для резервуарів малих розмірів з тонкими стінками застосовуються  $\beta$ -джерела, для товстостінних сталевих резервуарів - джерела  $\gamma$ - випромінювання. Їх інтенсивність вибирається залежно від сумарної товщини сталевих стінок та відстані між джерелом та детектором випромінювання.

До недоліків радіоізотопних датчиків відносяться такі: висока точність може бути досягнута тільки в стежать рівнемірах, які містять багато рухомих частин; поводження з джерелами випромінювання є певними труднощами з точки зору безпеки для здоров'я. Радіоізотопні датчики добре зарекомендували себе під час роботи у складних умовах, наприклад, для вимірювання рівня розплавленого металу.

Підклас 111 поєднує датчики, що використовують явище відбиття хвилі від поверхні рідини. Зазвичай їх поєднують терміном "локаційні", т.к. їх побудови використовуються самі методи, як у радіолокації [11]. Відповідно, їх можна розділити на датчики з безперервним випромінюванням (підклас 1110) та з імпульсним випромінюванням (підклас 1111).

Локаційні датчики безперервним випромінюванням будуються з використанням методу фазової локації [11]. У фазовому датчику вимірюється зсув фаз між падаючою хвилею та <sup>18</sup>хвилею, відбитою від поверхні рідини.

Локаційні датчики з імпульсним випромінюванням (підклас 1111) поширені, т.к. мають високу точність і відсутність низки недоліків, властивих іншим типам датчиків. Розрізняють акустичні – ультразвукові (підклас 11110) та електромагнітні (підклас 11111).

Підклас 111110 складають датчики з імпульсним випромінюванням в діапазоні НВЧ або радіохвильові. При вимірі рівня сипких середовищ похибка виміру може перевищувати 10%, що пов'язано з низьким коефіцієнтом відбиття та значною інтерференцією при відбитку від окремих гранул [12]. Радіохвильові датчики дозволяють здійснити компенсацію впливу цих факторів без використання додат-

кових каналів вимірювання, для чого використовуються багаточастотні методи за наявності одного випромінювача [12], що сприяє значному підвищенню точності вимірювання. Проте, радіохвильові датчики непридатні вимірювання рівня ЛЗР, т.к. вимагають введення в резервуар елементів випромінювача, що під напругою.

Датчики підкласу 111111 – оптичні. Теоретично оптичні датчики дозволяють здійснити вимірювання рівня на 1 – 2 порядки точніше за інші датчики. Однак, застосування їх наштовхується на значні труднощі: для отримання спрямованого випромінювання потрібна оптична система, яка піддається впливу пилу та інших забруднювачів; наявність градієнта швидкості поширення електромагнітного випромінювання, що залежить від температури та складу газоподібного середовища над поверхнею рідини, обмежує точність вимірювання на рівні аналогічних радіохвильових датчиків; рівнеміри на основі оптичних датчиків відрізняються високою вартістю.

У основі імпульсних УЗ - датчиків рівня (підклас 11110) лежить властивість УЗ хвиль поширюватися з кінцевої та постійної швидкістю, тобто. використовується тимчасовий метод локації. Відстань, що проходить хвилею за час  $t$

$$l = ct, \quad (1.8)$$

де  $c$  – швидкість ультразвука в середовищі.

Імпульсні рівнеміри розрізняються за розташуванням АП і їх числом. Можливі два варіанти: рознесені передавальний та приймальний АП та один АП для випромінювання та прийому УЗ-імпульсів. Перевагою датчика з використанням одного АП є збіг резонансних частот АП при передачі та прийомі. Але, у разі використання одного АП необхідний швидкодіючий перемикач з прийому на передачу, який підключає АП по черзі до виходу генератора імпульсів зондуючих (ГЗІ) і до входу попереднього підсилювача. Мінімальна вимірювана відстань залежить від часу перемикачання, так і від часу виходу попереднього підсилювача з насичення.

Якщо використовуються рознесені АП, мінімальна вимірювана відстань скорочується, проте необхідне підстроювання АП на одну частоту. Крім того, АП часто є досить дорогим пристроєм та застосування двох АП небажано.

За розташуванням випромінюючого та приймального АП розрізняють три варіанти схематичне зображення яких наведено на рис. 1.3. На рис. 1.3,а показаний датчик рівня з розташуванням АП знизу резервуара. Вимірюється відстань від дна поверхні рідини. Перевагою цього варіанта є можливість зондування через дно резервуара за умови узгодження акустичних опорів рідини, матеріалу дна та випромінювача, АП закріплюється зовні. Це найзручніший датчик рівня для зріджених газів під великим тиском, т.к. не потрібно вводити елементи датчика в резервуар. Крім того, УЗ хвилі в рідинах поширюються значно краще, ніж у газах і сигнал з АП має більшу потужність. Недоліками є: неможливість встановлення на вкопаних у землю резервуарах; вплив осаду на дні результат вимірювання.

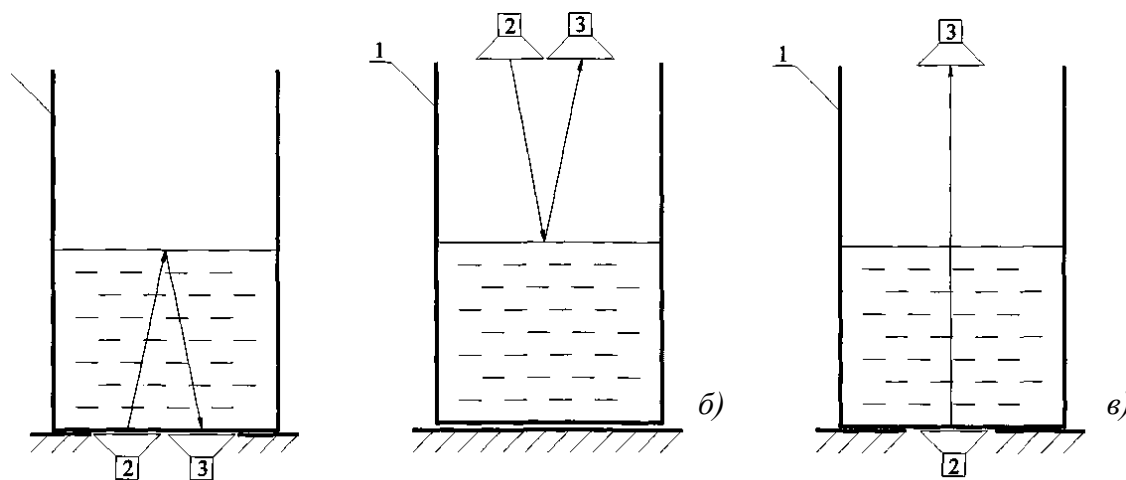


Рисунок 1.3 – Схема розташування випромінюючих та приймальних УЗ – датчиків

На рис. 1.3,б показано пристрій датчика з верхнім розташуванням АП. Його перевагою є можливість вимірювання рівня не тільки рідин, а й сипких тіл. Основною складністю створення таких датчиків є складність АП, т.к. акустичне опір п'єзореzonатора АП та акустичне опір газу можуть відрізнятись на 3-4 порядку, що змушує застосовувати складні рупорні системи. Потужність сигналу тут не-

лика, т.к. УЗ коливання в газах поширюються значно гірше, ніж у рідинах, відчуваючи сильне згасання. Низьке відношення сигнал/шум призводить до збільшення похибки виміру. Незважаючи на недоліки, датчики з верхнім розташуванням АП знайшли надзвичайно широке застосування, особливо для вкопаних у землю резервуарів та для вимірювання рівня сипких тіл.

Перераховані вище варіанти імпульсних УЗ - датчиків рівня допускають застосування суміщеного АП. Це призводить до здешевлення рівнеміру, але з'являється "мертва зона" - область простору, де вимір неможливий. Для її скорочення запропоновано електричний та акустичний способи.

Датчик з рис. 1.3, відрізняється тим, що тут використовується не відображення УЗ - хвилі від поверхні, а пряме проходження. Такі пристрої отримали поширення, т.к. по-перше, необхідні два АП; по-друге, через межу поділу середовищ рідина – газ проходить незначна частина потужності УЗ хвилі через різні акустичні опори рідини та газу. Даний тип сигналізаторів відрізняється високою чутливістю – менше 1 мм [17].

Характерною рисою імпульсних УЗ – датчиків рівня і те, що час циклу виміру обмежується часом реверберації резервуара. Черговий зондуєчий імпульс можна послати тільки тоді, коли рівень багаторазово відображеного попереднього імпульсу буде нижчим за певний поріг, найчастіше, порівнянний з рівнем перешкод.

21

Імпульсні УЗ – датчики рівня рідини поширені у техніці. Основна їхня гідність полягає у можливості безконтактного вимірювання рівня. Хоча абсолютна похибка вимірювання рівня у більшості акустичних датчиків становить одиниці міліметрів, з'явилися повідомлення про створення пристроїв з абсолютно похибною вимірювання рівня 10 мкм [11]. УЗ - пристрої можна пристосувати для вимірювання рівня сипких середовищ і пінистих рідин. На відміну від імпульсних радіохвильових датчиків не потрібно введення в резервуар елементів випромінювача, що знаходяться під напругою, що має вирішальне значення при створенні систем контролю параметрів ЛЗР. Постійному розширенню областей застосування

сприяє створення п'єзокераміки для АП з унікальними властивостями [2, 8]. П'єзокераміка ПКР – 50 має температуру Кюрі + 650 °С, а ПКР – 61 +1200 °С. Для отримання високого коефіцієнта перетворення використовується п'єзокераміка на основі цирконату-титанату свинцю складу Т1 та Т2 [4]. Істотний недолік всіх ультразвукових датчиків – значний вплив температури середовища на результат вимірювання. Додаткова похибка, викликана температурною залежністю швидкості звуку, становить 1 – 2 % на кожні відхилення від нормальної температури. Похибка є систематичною і піддається корекції у різний спосіб – введенням опорного каналу для вимірювання швидкості ультразвуку [2, 12], використанням статистичної інформації про розподіл температур [7] та вимірюванням температури додатковим датчиком. Важливим завданням є вимірювання рівня ЛЗР в резервуарах великих розмірів. Найчастіше це заглиблені в ґрунт резервуари, у зв'язку з чим виключається застосування датчиків на основі методу зважування. Застосування електричних та теплових датчиків виключено з міркувань вибухо- та пожежної безпеки. Збільшення частки датчиків рівня рідини, заснованих на безконтактному вимірі (УЗ, радіохвильових, оптичних) є однією з основних тенденцій в сучасній вимірювальній техніці. Серед безконтактних методів ультразвукові займають особливе положення. По-перше, потенційні можливості їх повністю не реалізовані, незважаючи на те, що УЗ-датчики застосовуються для вимірювання рівня протягом тривалого періоду. По-друге, УЗ - випромінювач може бути встановлений як зверху, так і знизу резервуара, а також зовні (зондування через дно або кришку), що спрощує виконання вимог щодо вибухобезпеки. По-третє, за певних умов можливий вимір рівня рідин з налипанням та випаданням осаду [8]. У зв'язку з цим, розробка принципів побудови високоточних УЗ – датчиків рівня становить великий інтерес.

## 1.2 Види сигналів в ультразвукових рівнемірах

Сигнали, що застосовуються в локаційних УЗ - рівнемірах, аналогічні застосовуваним в радіолокації. Незважаючи на різну фізичну природу застосовуваного випромінювання, підхід до синтезу зондуючих та обробки відбитих сигналів в обох випадках має багато спільного. У той же час, просте запозичення радіолокаційних методів обробки для побудови УЗ-рівнемірів неможливе через істотні відмінності, зумовлені діапазоном частот, властивостями поверхні, що відбиває, і характеристиками перешкод. Особливістю ультразвукового сигналу є його сильне згасання в газоподібному середовищі, на відміну від рідини. Згасання збільшується із збільшенням частоти коливань [3]. У зв'язку з цим для побудови імпульсних ультразвукових рівнів з верхнім розташуванням акустичного перетворювача використовується діапазон частот 20 - 100 кГц, причому більшому діапазону вимірювання відповідають нижчі частоти. Так, рівнеміри з діапазоном виміру до 30 м працюють у діапазоні частот 20 - 40 кГц [2]. Процес проходження зондуючого сигналу через тракти рівнеміра і середовище поширення представимо у вигляді структурної схеми на рис. 1.4. ГЗІ є джерелом порушення акустичного перетворювача. Передавальний АП підключається до виходу ГЗІ через схему, що узгоджує СС. У разі акустичного перетворювача на основі п'єзореzonатора як СС зазвичай використовується резонансний трансформатор. Як приймальний і передавальний АП зазвичай використовують один і той же акустичний перетворювач. Приймальний тракт містить підсилювач і видільник фронту ВФ, з виходу якого сигнал надходить на вузол вторинної обробки, не показаний на схемі. Фіксується або тимчасове положення фронту огинаючої, або окремого напівперіоду. Перемножуючий вузол ПУ і підсумовуючий вузол СУ введені для зручності аналізу впливу мультиплікативних  $N_g$  та адитивних  $N_\Sigma$  завад.

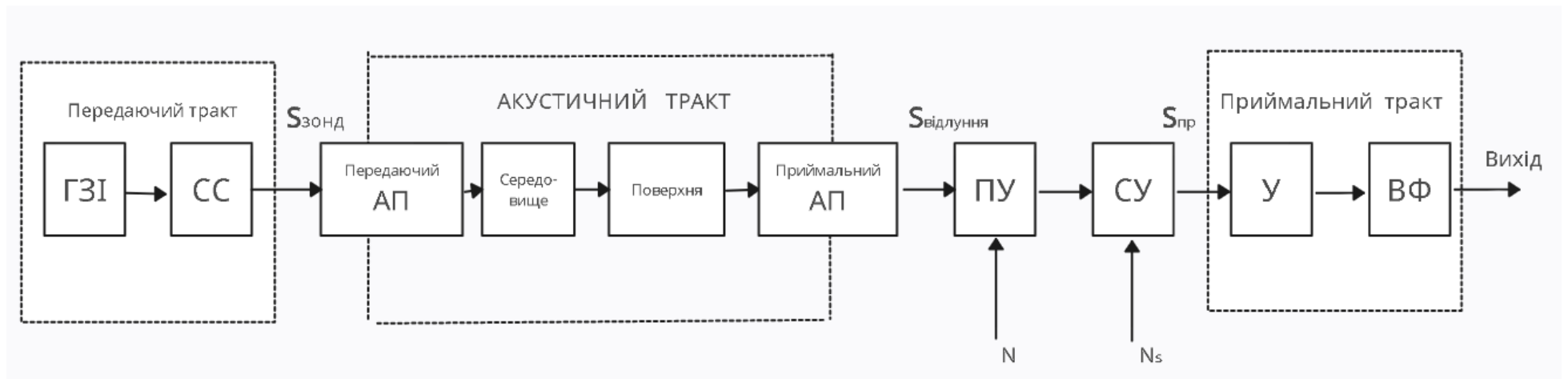


Рисунок 1.4 – Схема проходження зондувального сигналу

В імпульсних УЗ-рівнемірах використовується зондуєчий сигнал виду

$$S_{\text{зонд}}(t) = A(t) \sin(\omega_0 t), \quad (1.10)$$

де  $A(t)$  – огібаюча послідовності радіоімпульсів.

У фазових локаційних рівнемірах - сигнал виду

$$S_{\text{зонд}}(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.11)$$

де  $A_0$  – фіксована амплітуда зондувального сигналу..

В імпульсних УЗ-рівнемірах застосовуються ГЗІ трьох типів (рис. 1.5):

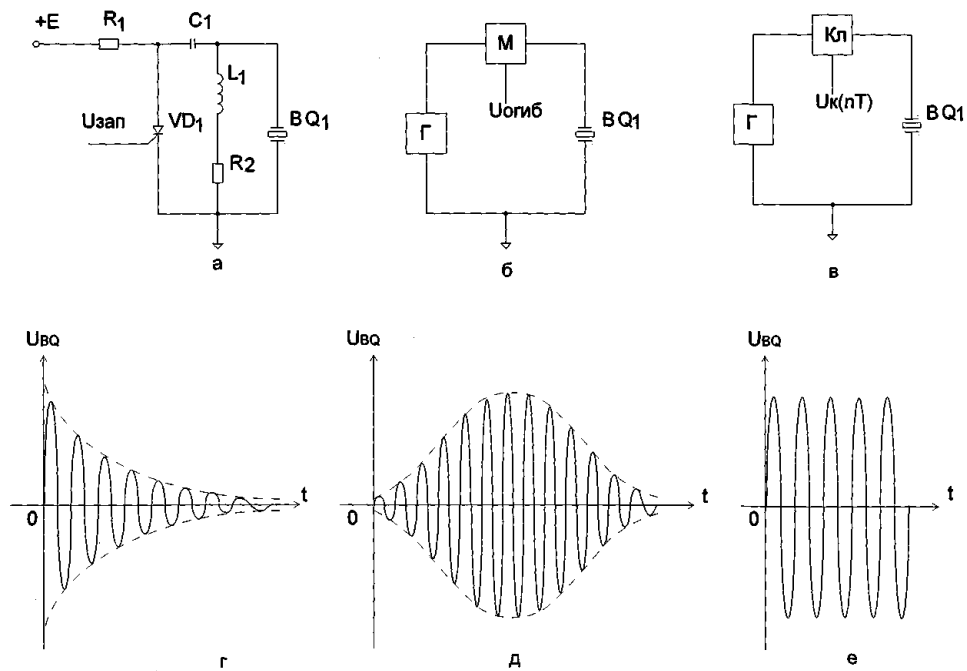


Рисунок 1.5 – Спрощені схеми генераторів та форми їх вихідної напруги

генератори ударного збудження (рис. 1.5,а), генератори імпульсів з огінаючої дзвоноподібної форми (рис. 1.5,б) і генератори імпульсів з прямокутною огінаючою і заданим заповнення (рис. 1.5, в). Більшість застосовуваних практично ГЗІ містять коливальний контур, через який здійснюється зв'язок вихідного каскаду з пьезорезонатором, зниження напруги харчування застосовується трансформаторна зв'язок.

Найбільшого поширення набув ГЗІ з урахуванням контуру з ударним збудженням (рис. 1.5,а) [9]. Він містить контур утворений ємністю та індуктивністю струмообмежуючий резистор і ключ на основі тиристора. Резонансна частота контуру повинна дорівнювати частоті послідовного резонансу п'єзрезонатора. Опір  $R_2$  визначає добротність контуру. Зонduючий імпульс формується при подачі на керуючий електрод тиристора короткого імпульсу, що запускає. Форма зонduючого імпульсу, що збуджується таким способом, показана на рис. 1.5,б. Фронт ударного імпульсу визначається швидким процесом розряду ємності. Амплітуда першого напівперіоду коливальних може становити 300 - 500 В, проте ефективно амплітуда, що діє, спектральної складової на робочій частоті значно менше (в 5 - 10 разів) через невідповідність спектру імпульсу і смуги пропускання п'єзрезонатора. ГЗІ описаного типу відрізняється простотою та надійністю. Головною перевагою його є те, що випромінювання акустичних коливальних відбувається на резонансній частоті п'єзрезонатора, що покращує умови прийому відбитого сигналу, недолік – низька енергетична ефективність.

З виходу ГЗІ через СС зонduючий сигнал надходить на вхід акустичного тракту, який складається з АП, середовища поширення і поверхні, що відбиває - межі розділу середовищ. Вплив акустичного тракту на зонduючий сигнал виявляється у згасанні УЗ – хвилі залежно від відстані, зміною швидкості поширення та зміною фази сигналу при відбитті від межі розділу середовищ.

Відбитий сигнал  $S_{omp}(t)$  може бути аналітично представлений у вигляді деякої відомої функції часу та випадкових параметрів:

$$S_{omp} = S(t, \mathcal{G}), \quad (1.12)$$

де  $\mathcal{G}$  – вектор параметрів відбитого сигналу.

За відсутності завад

$$S_{omp}(t, \mathcal{G}) = S_{зонд}(t - t_{np})k_{ам}(\mathcal{G}), \quad (1-13)$$

де  $t_{np}$  – час пробігу УЗ-хвилі,

$k_{ам}(\mathcal{G})$  – коефіцієнт передачі акустичного тракту (рис. 1.4):

$$k_{am}(\mathcal{G}) = k_{an}^2 k_{cp}^2 k_{omp}, \quad (1-14)$$

де  $k_{an}$  – коефіцієнт перетворення АП,

$k_{cp}$  – коефіцієнт, що характеризує вередовище розповсюдження - величина, зворотня затухенню,

$k_{omp}$  – коефіцієнт відображення межі розділу середовищ газ-рідина..

Випадкові зміни коефіцієнта передачі акустичного тракту виражаються у появі мультиплікативних перешкод  $N_g$ .

Приймаємий сигнал  $S_{np}(t)$  на вході приймального тракту є сумішшю відбитого сигналу  $S_{omp}(t)$  і зовнішніх адитивних перешкод  $N_\Sigma(t)$ . Перешкоди мають різну природу: переображення попереднього зондувального імпульсу, зовнішні акустичні перешкоди  $N_a(t)$ , власні шуми підсилювача вхідного приймача  $N_y(t)$ .

Наведена на рис. 1.4 узагальнена схема дозволяє провести аналіз проходження сигналу в тракці УЗ - рівнеміра і виділити джерела виникнення похибки вимірювання, пов'язані з трактом проходження сигналу. При цьому джерела похибки вимірювання рівня рідини доцільно розділити на джерела, пов'язані з самим вимірювальним перетворювачем та джерела, пов'язані з середовищем поширення, що відображає поверхнею, резервуаром. Якщо для усунення впливу перших застосовується досконаліші схемотехнічні рішення та алгоритми, то для других необхідно застосування додаткових каналів вимірювання таких параметрів газоподібного середовища поширення, як температури та тиску.

### 1.3 Аналіз структурних схем ультразвукових рівнемірів

У промисловості використовується величезна кількість УЗ - рівнемірів різного призначення. У той же час їх структурні схеми мають загальну основу і можуть бути зведені до невеликої кількості типів. Класифікаційною ознакою є зворотний зв'язок. Застосовуються рівнеміри розімкнутого типу та з автоматичним стеженням за

тимчасовим положенням відбитого сигналу. Рівнеміри обох типів мають у своєму складі низку аналогічних вузлів. У більшості рівнів застосовується суміщений АП, призначений для роботи як на прийом, так і на передачу, що знижує вартість обладнання. Спрощена структурна схема рівнеміру з суміщеним АП показано на рис. 1.6.

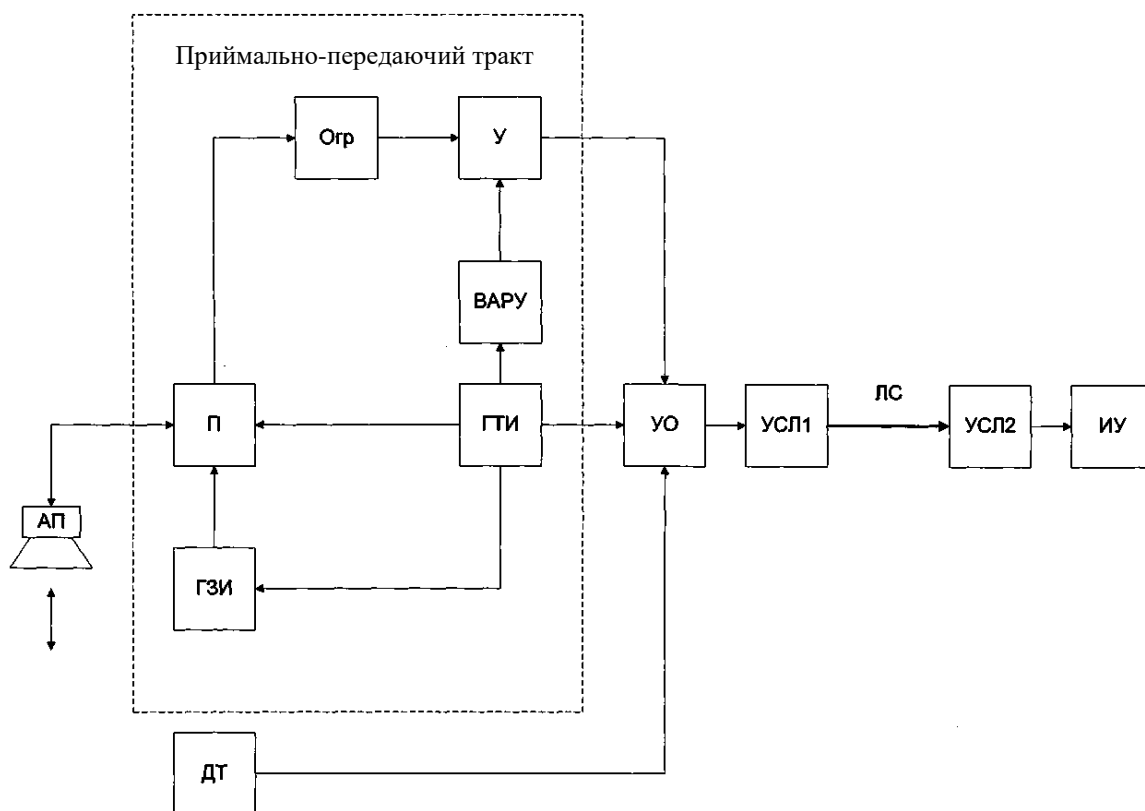


Рисунок 1.6 - Структурна схема рівнеміру з суміщеним АП

АП через перемикач (П) комутується по черзі до виходу генератора зондувальних імпульсів ГЗІ і на вхід обмежувача Огр, призначеного для захисту вхідних ланцюгів приймального підсилювача від перевантаження сигналом, проникаючим в приймальний тракт через П під час дії зондувального імпульсу. Тимчасові співвідношення забезпечуються генератором тактових імпульсів (ГТІ). Обмежувач зазвичай виконується за найпростішою схемою діодах. При використанні ГЗІ на основі контуру з ударним збудженням (рис. 1.5,а) перемикач П може бути відсутнім, тоді на час дії зондувального імпульсу по сигналу з ГТІ замикається вхідний каскад підсилювача У. Таке рішення характерне для рівнемірів з невеликим діапазоном вимірювання. Схема тимчасового автоматичного регулювання підсилення ВАРУ призначена для компенсації ослаблення інтенсивності акустичного імпульсу при збіль-

шенні відстані до межі розділу середовищ і застосовується зазвичай у рівнемірах з діапазоном виміру понад 5 м. До складу первинного перетворювача зазвичай включається датчик температури ДП, інформація з якого використовується для корекції показань рівня .

З виходу вузла обробки (ВО) сигнал надходить через лінію зв'язку ЛЗ на індикаторний пристрій ВП. Для узгодження з ЛЗ застосовуються вузли сполучення з лінією УСЛ1 та УСЛ2. Вони містять елементи вибухозахисту, розділовий фільтр при живленні рівнеміра по інформаційних ланцюгах. УСЛ1 містить перетворювач вихідного сигналу вузла обробки в уніфікований сигнал, придатний передачі на значну відстань. Замість ІУ рівнемір може бути підключений до системи збору даних. АП виступає як первинний перетворювач, а прийомопередавальний тракт, ВО і УСЛ1 утворюють проміжний перетворювач [6].

Рівнеміри розімкнутого типу і з автоматичним стеженням за рівнем можуть бути побудовані на основі одного і того ж приймально-передавального тракту і відрізняються побудовою ВО приймаємого сигналу. Спрощена структурна схема ВО рівнеміра розімкнутого типу показана на рис. 1.7.

Вимірювання часу пробігу УЗ-хвилі здійснюється шляхом підрахунку числа лічильних імпульсів за інтервал часу від посліжки зондувального імпульсу до моменту прийому відбитого. Одночасно з посліжкою зондувального імпульсу з вузла управління пристрій обробки надходить сигнал запуску, встановлює RS-тригер Т в одиничний стан, що дозволяє проходження сигналу генератора рахункових імпульсів (ГРІ) через схему збігу «&» на лічильник ЛЧ. Приймається сигнал з виходу приймального тракту надходить на амплітудний детектор АД. Компаратор К служить для виділення переднього фронту огибаючої приймаємого сигналу, яким тригер Т скидається і припиняється рахунок.

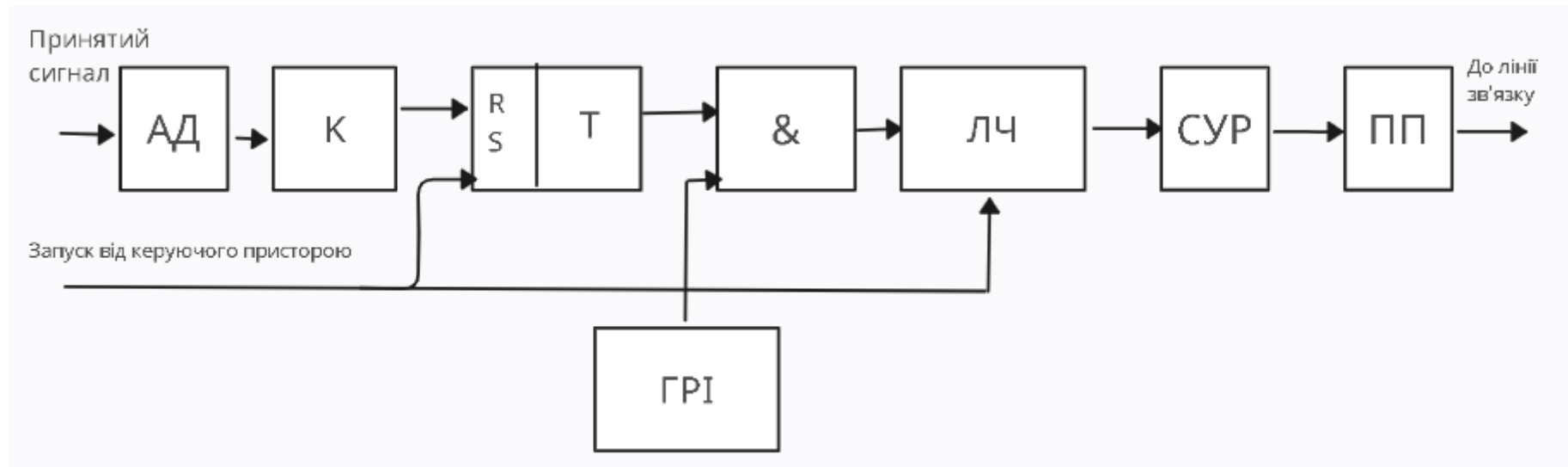


Рисунок 1.7 – Структурна схема УО рівнеміра розімкнутого типу

Число імпульсів ДСІ прямо пропорційно часу пробігу УЗ-хвилі. Передавальний перетворювач ПП служить для формування уніфікованого вихідного сигналу та узгодження з лінією зв'язку. Схема усереднення результату СУР здійснює запам'ятовування та підсумовування відліків за кілька циклів виміру. Зазвичай число відліків для усереднення вибирається рівним 16, що зручно з погляду апаратної та програмної реалізації.

ВО УЗ-рівнемера із замкненим зворотним зв'язком найчастіше є вузол автоматичного стеження по дальності (АСД). Значення вимірюваного рівня закодовано у часовій затримці селектуючих імпульсів. Структурна схема ВО рівнемера на основі АСД наведена на рис. 1.8.

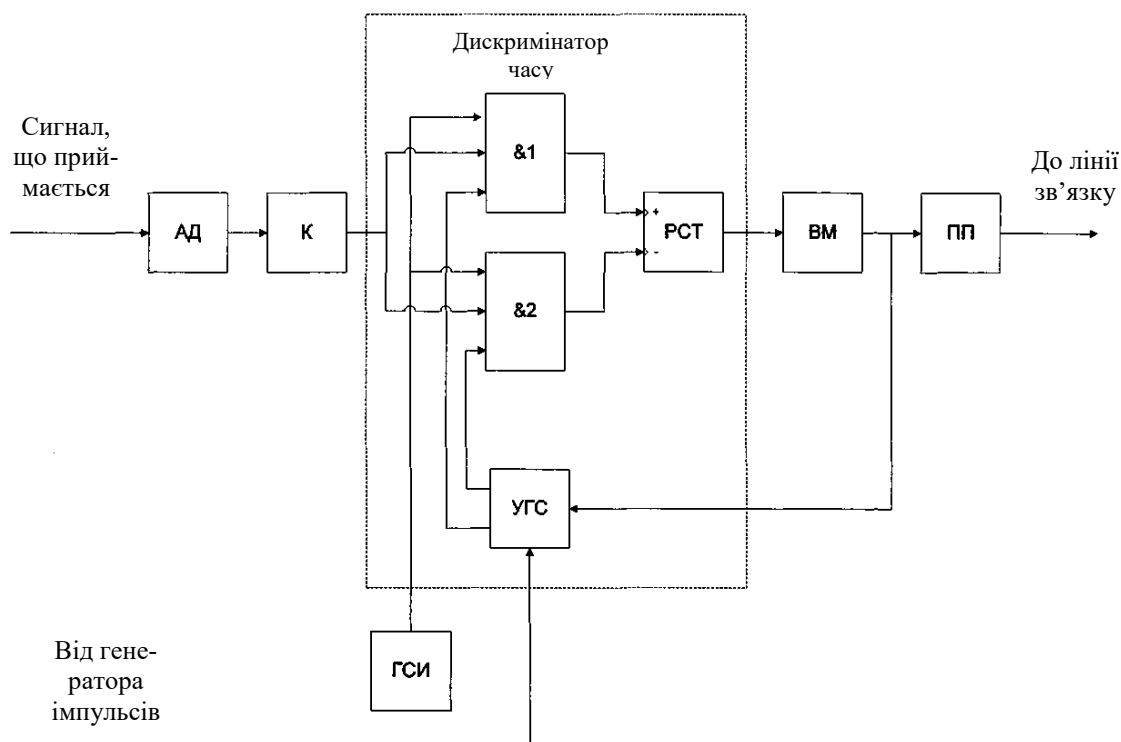


Рисунок 1.8 – Структурна схема УО

УЗ – рівнеміра із замкнутим зворотним зв'язком

У пристрої обробки за схемою рис. 1.8 здійснюється стеження за тимчасовим положенням огинаючої сигналу, що приймається. З виходу приймального тракту сигнал, що приймається потрапляє на амплітудний детектор АД і компаратор К,

що перетворює цей сигнал в імпульс логічного рівня. Вузол стеження містить тимчасовий дискримінатор, ГСІ та тимчасовий модулятор ВМ. Тимчасовий дискримінатор складається з двох схем збігу &1 і &2, керованого генератора стробів (наслідків імпульсів) УГС та реверсивного лічильника РСТ. Одночасно з посилюючою зондуючого імпульсу запускається керований генератор стробів, який формує два наступних один за одним стежать імпульсу. Затримка цих імпульсів щодо початку зондуючого визначається сигналом, що виробляється тимчасовим модулятором залежно від сигналу неузгодженості. Тимчасовий дискримінатор виробляє сигнал, пропорційний неузгодженості тимчасового положення відображеного імпульсу щодо осі симетрії імпульсів, що стежать. Реверсивний лічильник виконує функції цифрового інтегратора та екстраполятора та скидається перед початком чергового циклу вимірювання [16].

Рівнеміри описаного типу відрізняються високою стійкістю до перешкод щодо імпульсних перешкод, обумовлену наявністю інтегратора. Однак, інерційність обумовлює головний недолік - вихід з режиму стеження при швидкій зміні рівня рідини, на відміну від рівнемірів з накопиченням, у яких швидка зміна рівня призводить до збільшення динамічної похибки вимірювання. У зв'язку з цим у технічному описі на рівні міри слідкуючого типу наводиться максимальне значення швидкості зміни рівня, при якому забезпечується стійка робота системи. Зазвичай воно не перевищує  $1 \text{ см/с}$ , що є прийнятним під час роботи з резервуарами з великим поперечним перерізом.

## 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВИХ РІВНЕМІРІВ

При розробці імпульсних УЗ - рівнемірів з верхнім розташуванням суміщеного АП необхідно враховувати взаємозалежність метрологічних характеристик. Так, збільшення максимальної вимірюваної відстані до межі розділу середовищ (верхня межа вимірювання) неминуче накладає обмеження на мінімальну вимірювану відстань (нижню межу вимірювання) і здатність рівнямера, що дозволяє. Причина полягає в тому, що для збільшення верхньої межі вимірювання необхідно використовувати УЗ - сигнал з меншою частотою, тому що згасання УЗ - хвилі в газоподібному середовищі пропорційно квадрату частоти коливань [13]. У свою чергу, низькочастотні п'єзореzonатори, що застосовуються в рівнях з великим верхнім діапазоном вимірювання, мають велику постійну часу, порівнянну з тривалістю зондувального імпульсу. Це призводить до таких негативних наслідків. По-перше, значно збільшується тривалість перехідного процесу після закінчення зондувального імпульсу. Протягом часу перехідного процесу амплітуда власних коливань резонансної системи АП перевищує амплітуду відбитого сигналу і вимір неможливо. Це обмежує нижній діапазон вимірювання, причому інтервал часу, протягом якого вимір<sup>33</sup>неможливий, відповідає мінімальній відстані, що вимірюється, в одиниці метрів. По-друге, велика постійна часу АП зумовлює низьку швидкість наростання сигналу приймальному тракту. У сукупності з низькою частотою сигналу це ускладнює побудову високоточних рівнемірів. Таким чином, при розширенні верхньої межі вимірювання необхідно використовувати рішення, що дозволяють зберегти високу роздільну здатність і, одночасно, мала нижня межа вимірювання - параметри, характерні для високочастотних рівнемірів (з частотою сигналу понад 100 кГц).

## 2.1 Розширення діапазону показань імпульсних ультразвукових рівнемірів з низькочастотними акустичними перетворювачами

Мінімальний вимірюваний рівень УЗ-рівнемірів обмежується двома факторами: тривалістю зондувального імпульсу і перехідним процесом в АП після закінчення зондувального імпульсу, зумовленим порівняно високою добротністю коливальної системи АП. Найбільше ці фактори виявляються у низькочастотних АП. Тривалість зондувального імпульсу  $t_{зонд}$ , що серійно випускаються УЗ-рівнемірах становить величину близько 1 мс. Зменшення небажано, т.к. зменшується енергія імпульсу.

При швидкості звуку  $c=340$  м/с мінімально вимірюваний рівень  $h_{min} = (ct_{зонд}) / 2$  обумовлений кінцевою тривалістю зондувального імпульсу при  $t_{зонд}=1$  мс становить 0,17 м, що цілком прийнятно, т.к. наповнення резервуарів "під шийку" не допускається за вимогами техніки безпеки. Однак зазначене значення мінімально вимірюваного рівня недосяжно через наявність тривалого перехідного процесу в п'єзрезонаторі АП після закінчення зондувального імпульсу. Дане явище найбільш сильно проявляється у низькочастотних п'єзрезонаторів з великою постійною добою. У цьому амплітуда власних коливань може перевищувати амплітуду відбитого сигналу інтервалі до 5-10 мс. Такі значення притаманні АП з верхнім розташуванням (рис. 1.3,б), т.к. через значну різницю хвильових опорів газу і матеріалу п'єзрезонатора (на 2-3 порядку) хорошого акустичного узгодження досягти важко і добротність навантаженого п'єзрезонатора становить  $Q=20-50$ .

Наявність перехідного процесу в АП після закінчення зондувального імпульсу суттєво погіршує експлуатаційні характеристики УЗ-рівнемірів. Так, тривалість перехідного процесу  $t_{перех}=5$  мс при тривалості зондувального імпульсу  $t_{зонд} = 1$  мс відповідає мінімально вимірюваному рівню:

$$h_{\min} = \frac{c(t_{\text{зонд}} + t_{\text{перех}})}{2} = 1,02 \text{ м.} \quad (2.1)$$

Для скорочення тривалості перехідного процесу в п'єзрезонаторі після закінчення зондувального імпульсу запропоновано спосіб, заснований на компенсації перехідного процесу. Спосіб полягає в подачі на АП імпульсу, протифазного по відношенню до зондуючого. Енергія компенсуючого сигналу повинна дорівнювати енергії, накопиченої в резонансній системі АП до моменту закінчення зондувального імпульсу. Для цього проводиться вимірювання параметрів перехідного процесу, розрахунок параметрів компенсуючого сигналу та формування компенсуючого сигналу по закінченні зондувального імпульсу. Ступінь компенсації залежатиме лише від точності встановлення амплітуди та тривалості компенсуючого сигналу. При цьому необхідно розв'язати дві задачі: здійснення правильного фазування; дозування енергії шляхом управління амплітудою та тривалістю компенсуючого сигналу.

Особливістю застосування методу компенсації стосовно п'єзрезонаторів рівнемірів, на відміну від коливальних контурів, є необхідність більш точної установки параметрів компенсуючого сигналу для отримання вищого ступеня пригнічення перехідного процесу. З урахуванням значної температурної нестабільності п'єзрезонаторів та умов застосування (необслуговуване обладнання на віддалених об'єктах) це виключає можливість застосування одноразового ручного налаштування тракту формування компенсуючого сигналу. Найбільш перспективним є рішення з використанням мікроконтролерного управління, що дозволяє скоротити апаратні витрати і здешевити рівнемір. Структурну схему пристрою, що реалізує метод компенсації, наведено на рис. 2.1. Сигнали управління формує пристрій управління УУ на основі мікроконтролера, що має у своєму складі вбудований АЦП.

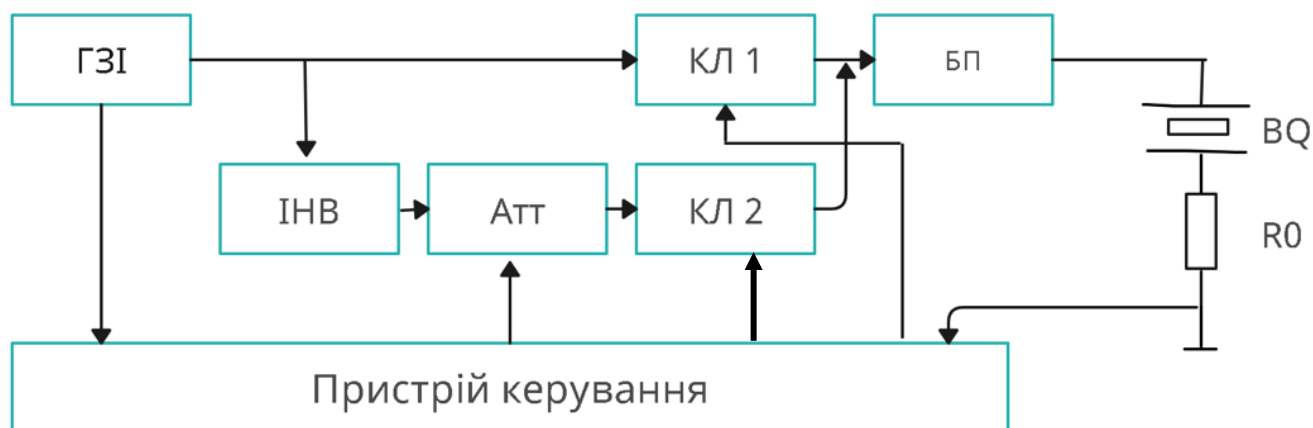


Рисунок 4.2 – Структурна схема пристрою компенсації

До складу пристрою входять керований кодом генератор зондувальних імпульсів ГЗІ, інвертор ІНВ, дискретний атенюатор АТТ, ключі КЛ1 і КЛ2, буферний підсилювач БП, п'єзорезонатор ВQ та резистор  $R_0$ . Для здійснення автопідстроювання та встановлення рівня компенсуючого сигналу використовується інформація з  $R_0$ . Як БП використовується високовольтний операційний підсилювач, що має мале вихідний опір. Найбільші труднощі при побудові розглянутого пристрою обумовлені, як зазначалося, необхідністю завдання суворо певних значень амплітуди і фази компенсуючого сигналу. Проведені дослідження дозволили вирішити зазначені проблеми.

Еквівалентна схема ланцюга підключення п'єзорезонатора в режимі випромінювання зондувального<sup>36</sup> імпульсу показана на рис. 2.2,а, по закінченні зондуючого імпульсу відсутність компенсації (тобто в режимі вільних коливань) - на рис. 2.2,б.

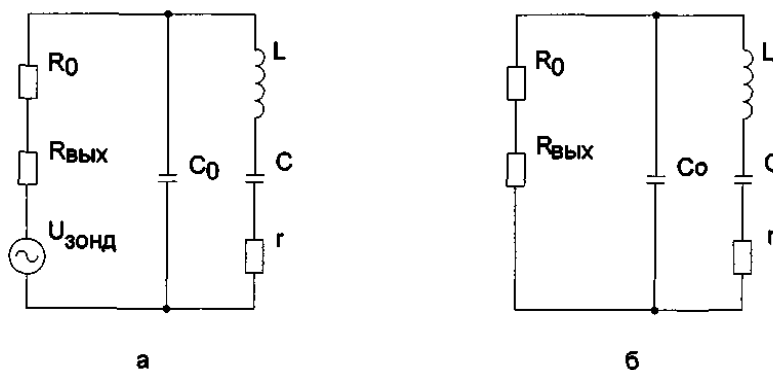


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема підключення п'єзорезонатора

Тут  $U_{зонд}$  - ЕРС, створювана буферним підсилювачем,  $R_0$  - опорний резистор,  $R_{вих}$  - вихідний опір кінцевого каскаду передавальної частини,  $L$ ,  $C$ ,  $r$ ,  $C_0$  - еквівалентні параметри п'єзореzonатора. Використовувана тут еквівалентна схема п'єзореzonатора досить добре описує двоелектродні п'єзореzonатори. Важливе значення має співвідношення між  $R_0 + R_{вих}$  реактивним і опором ємності на частоті послідовного резонансу п'єзореzonатора, рівним

$$X_{c_0} = 1 / (\omega_0 C_0).$$

При  $R_0 + R_{вих} \ll X_{c_0}$  режимі вільних коливань ємність  $C_0$  зашунтована малим опором  $R_0 + R_{вих}$ , а значить зсув фаз  $\varphi$  між напругою на  $R_0$  і струмом  $I_{Lcr}$  в послідовному контурі прагне нуля, а напруга на  $R_0$  прямо пропорційно струму в послідовному коливальному контурі. Таким чином, використовуючи опорний резистор з опором, значно меншим, ніж  $X_{c_0}$ , можна отримати інформацію про частоту послідовного резонансу  $\omega_0$  та амплітуду вільних коливань.

Проблема налаштування ГЗІ на частоту послідовного резонансу п'єзореzonатора вирішується за допомогою швидкодіючої цифрової системи фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Налаштування здійснюється за сигналом з опорного резистора  $R_0$  під час перехідного процесу. Стабільність частоти ГЗІ визначається, в основному, температурною стабільністю його елементів і короткочасна стабільність п'єзореzonатора значно вища за довготривалу. Тому налаштування ГЗІ, здійснена протягом перехідного процесу в одному циклі, може бути використана для інтервалу часу, відповідного кільком циклам вимірювання рівня - на інтервалі часу, протягом якого догляд частоти знаходиться в допустимих межах. Підстроювання частоти ГЗІ періодично повторюється. Таким способом усувається розбіжність частот ГЗІ та АП, обумовлена зовнішніми факторами, головним чином, зміною температури навколишнього середовища. У процесі автопідстроювання УУ одночасно вимірює та запам'ятовує тривалість періоду  $T$  власних коливань для подальших обчислень.

Друга проблема, яку необхідно вирішити при формуванні компенсуючого

сигналу - визначення необхідної амплітуди і тривалості радіоімпульсу в залежності від кількості енергії, накопиченої в п'єзорезонаторі до моменту закінчення зондуєчого імпульсу. Для цього після підстроювання ГЗІ на частоту послідовного резонансу АП проводиться посилка другого зондувального імпульсу і після закінчення двічі вимірюється амплітудне значення напруги на  $R_0$  в задані моменти часу. За отриманими значеннями обчислюються параметри еквівалентного послідовного контуру  $L_{Cr}$  (рис. 2.2) та енергія, що накопичена в контурі. При використанні мікроконтролерного пристрою керування найбільш зручно підраховувати число періодів сигналу, що пройшло від моменту закінчення зондувального імпульсу і вимірювати амплітуду напівперіодів із заздалегідь заданими номерами. Тривалості зондувального імпульсу і компенсуючого сигналу у разі повинні становити задане ціле число періодів. Зондуєчий імпульс має вигляд

$$U_{\text{бу}} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_0, \\ U_{m0} \sin \omega_0 t, & \\ 0 & \text{при } t > t_0 + t_{\text{зонд}}, \end{cases}$$

де  $U_{\text{бу}}$  – напруга на виході буферного підсилювача,

$U_{m0}$  – амплітуда зондуєчого сигналу,

$t_{\text{зонд}}$  – тривалість зондуєчого імпульсу.

Під час посилки зондувального імпульсу (рис. 2.3,а) амплітуда струму в еквівалентному послідовному контурі  $L_{Cr}$  наростає експоненційно і до моменту закінчення зондувального імпульсу досягає значення

$$I_{3И} = \frac{U_{m0}}{r} \left( 1 - e^{-\frac{nT}{\tau}} \right), \quad (2.9)$$

де  $n$  – число періодів несучої частоти зондируєчого імпульса;

$U_{m0}$  – амплітуда вихідної напруги БУ;

$r$  – еквівалентний опір втрат п'єзрезонатора (рис.2.2);

$\tau$  – постійна часу контура, рівна  $\tau = 2Q / \omega_0$  або  $\tau = Q T / \pi$ ;

$Q$  – добротність п'єзорезонатора.



$$U_{изм1} / U_{изм2} = e^{\frac{\pi[(m_1+1/4)-(m_2+1/4)]}{Q}} = U_{изм1} / U_{изм2} = e^{\frac{\pi(m_2-m_1)}{Q}}.$$

Перетворимо до  $\frac{\pi(m_2 - m_1)}{Q} = \ln \frac{U_{вим1}}{U_{вим2}}.$

Після перетворення отримаємо

$$Q = \frac{\pi(m_2 - m_1)}{\ln U_{вим1} - \ln U_{вим2}}.$$

Далі з першого рівняння системи системи (2.11) знаходимо  $r$ :

$$r = \frac{U_{m0}}{U_{вим}} R_0 (1 - e^{\frac{\pi n}{Q}}) e^{\frac{\pi(m_1+1/4)}{Q}}.$$

За отриманими значеннями  $Q$  и  $r$  можна визначити значення еквівалентної індуктивності  $L$ :  $2\pi L / T = Qr$ , звідки

$$L = \frac{QrT}{2\pi}. \quad (2.20)$$

Еквівалентну ємність визначимо з виразу  $C = \frac{T}{2\pi Qr}.$

Енергія, накопичена в п'єзрезонаторі до моменту закінчення зондуєчого імпульсу тривалістю, що дорівнює  $nT$ , зосереджена в ємності  $C$ , оскільки струм у контурі в момент часу  $nT$  дорівнює нулю. Енергія дорівнює

$$W_C = \frac{CU_C^2}{2}.$$

Напруга на ємності  $C$  в момент закінчення зондуєчого імпульсу

$$U_C = U_{зонд} Q (1 - e^{\frac{nT}{\tau}}). \quad (2.24)$$

Приймемо тривалість компенсуючого імпульсу  $t_{комп} = kT$ . У зв'язку з тим, що енергія компенсуючого імпульсу не може перевищувати енергії зондуєчого, а амплітуда компенсуючого сигналу не повинна перевищувати амплітуду імпульсу, що зондує, повинна виконуватися умова

$$U_{комп} \leq U_{зонд},$$

де  $U_{комп}$  - амплітуда компенсуючого сигналу.

Вочевидь, що з рівності  $U_{\text{комп}}$  і  $U_{\text{зонд}}$  має виконуватися умова  $t_{\text{комп}} \leq t_{\text{зонд}}$  чи  $k \leq n$ . Відповідно до (2.10) після закінчення зондуючого імпульсу за відсутності компенсації струм у контурі LCr змінюється згідно із законом

$$I_{LCr} = \frac{-U_c}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_0 t.$$

За наявності компенсуючого сигналу виду

$$U_{\text{комп}} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_0, \\ U_{m\text{комп}} \cdot \sin \omega_0 t & \text{при } t_0 + t_{\text{зонд}} \leq t \leq t_0 + t_{\text{зонд}} + t_{\text{комп}}, \\ 0 & \text{при } t > t_0 + t_{\text{зонд}} + t_{\text{комп}} \end{cases}$$

результуючий струм у контурі можна визначити із застосуванням принципу суперпозиції. Струм у контурі в цьому випадку описується виразом

$$I_{LCr} = \frac{QU_{\text{комп}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) - U_c e^{-\frac{t}{\tau}}}{r} \sin \omega_0 t.$$

Умова компенсації має такий вигляд:  $W_C = W_{\text{комп}}$  або з урахуванням (2.24)

$$U_{m\text{комп}} = \frac{U_c}{Q} e^{\frac{\pi k}{Q}} / \left( 1 - e^{-\frac{\pi k}{Q}} \right).$$

Ефективність застосування описаного алгоритму компенсації ілюструє рис. 2.4.

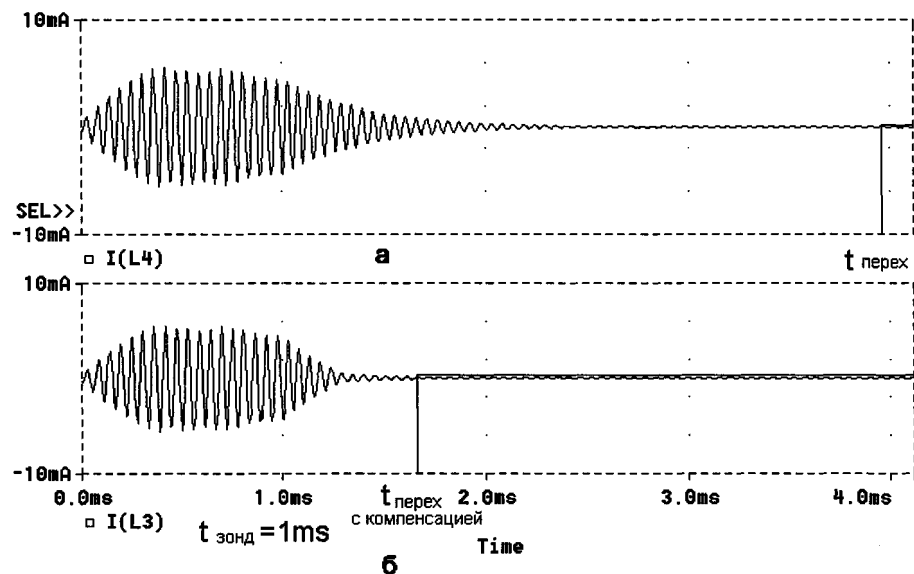


Рисунок 2.4 - Часова діаграма струму у контурі

На рис. 2.4,а показаний струм в еквівалентному послідовному контурі без компенсації, на рис. 2.4,б - за наявності компенсації для п'єзореzonатора з частотою послідовного резонансу 20 кГц і добротністю 40. Параметри компенсуючого сигналу були визначені згідно з описаним вище алгоритмом. По часовій діаграмі рис. 2.4 визначимо скорочення мінімальної вимірюваної відстані. При швидкості звуку 340 м/с мінімальна відстань, що вимірюється, в результаті застосування компенсації зменшується з 0.66 м до 0.27 м.

Як видно з наведеної діаграми, мінімальна вимірювана відстань за наявності компенсації значно скорочується і визначається лише тривалістю зондувального та компенсуючого сигналів. Для серійно випускаються рівнемірів типу Echo-5 з діапазоном вимірювання від 4 м до 30 м, в яких не застосовуються спеціальні заходи, мінімальна вимірювана відстань становить 2 м. При цьому вираш від застосування методу компенсації перехідного процесу виходить ще більш значним.

### 3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ УЗ – РІВНЕМІРА

Рівнемір, що реалізує запропонований спосіб зменшення мінімальної вимірюваної відстані, повинен забезпечувати автоматичне налаштування передаючого тракту. При цьому необхідно здійснити правильне фазування сигналу, що компенсує, і дозування енергії, що передається в коливальну систему акустичного перетворювача. Цикл вимірювання такого рівнеміра повинен включати чотири основні етапи:

1. Налаштування генератора зондувальних імпульсів частоту послідовного резонансу.
2. Визначення параметрів компенсуючого сигналу;
3. Формування зондувального імпульсу з компенсацією перехідного процесу.
4. Вимірювання часу пробігу.

Розраховані параметри компенсуючого сигналу придатні на інтервалі часу, протягом якого відхід частоти генератора зондувальних імпульсів не позначатиметься на ефективності компенсації.

Структурна схема рівнеміру, що реалізує перелічені вимоги, наведено на рис. 3.1.

Прийомний тракт<sup>42</sup>показаний спрощено. До складу пристрою входять: генератор з ФАПЧ, фільтр Ф, аналогові ключі Кл1...Кл5, високовольтний підсилювач УВ, інвертор Інв, аттенюатор Атт, підсилювач попередній У, екстрематор Е, видільник фронту ВФ, схеми логічного «І» та «АБО», цифроаналоговий перетворювач ЦАП, аналого-цифровий перетворювач АЦП, опорний резистор та вузол управління ВУ(УУ). До складу генератора з ФАПЧ входять генератор керований напругою ГКН(ГУН), компаратор і фазовий детектор ФД. Як високовольтний підсилювач використовується операційний підсилювач з вкрай низьким значенням вихідного опору. До виходу УВ підключено акустичний перетворювач АП. Сигнал, що приймається, через обмежувач Огр подається на приймач Пр.



Сигнали управління формує ВУ на основі MCS-52-сумісного мікроконтролера, що має у своєму складі вбудований ЦАП. У схемі використовують окремий АЦП. Таке рішення продиктоване необхідністю можливо більш точної прив'язки моменту фіксації амплітуди вимірюваного сигналу до фронту вихідного сигналу екстрематора, а при застосуванні вбудованого в мікроконтролер АЦП між цими моментами виникає затримка, що визначається часом реакції мікроконтролера на зовнішнє переривання, що має випадкове значення від 12 до 8 контролера плюс час виконання необхідних операцій. Крім формування керуючих сигналів мікроконтролер здійснює обчислення параметрів компенсуючого сигналу, а також попередню обробку результату вимірювання рівня.

## 4 АНАЛІЗ ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ

На процес вимірювання рівня рідини імпульсними УЗ-рівнемірами впливають численні фактори, що призводить до появи безлічі складових похибки вимірювання. При непрямому вимірі об'єму і маси рідини за відомим рівнем кількість факторів, що впливають, значно збільшується, тому що до факторів, пов'язаних безпосередньо з вимірюванням рівня, додаються фактори, зумовлені властивостями рідини і резервуара. При аналізі складових похибок доцільно розділити на дві групи:

- Похибки, пов'язані з процесом вимірювання рівня;
- похибки непрямого вимірювання обсягу та маси.

### 4.1 Аналіз додаткових похибок імпульсних ультразвукових рівнемірів

4.1.1 Похибка від температурної залежності швидкості ультразвуку у газоподібному середовищі.

До найбільш істотних складових похибки вимірювання рівня рідини відноситься похибка від температурної залежності швидкості ультразвуку в газоподібному середовищі. Ця складова робить найбільший внесок у сумарну похибку вимірювання рівня. Залежність швидкості звуку від температури виражається формулою 4.1

$$c(t^\circ) = c_0 [1 + \alpha_c (t^\circ - t_0)], \quad (4.1)$$

де  $c_0$  - швидкість звуку за нормальних умов,

$\alpha_c$  - температурний коефіцієнт швидкості звуку,

$t_0$  - початкова температура.

На рис. 4.1 показано залежність похибки вимірювання рівня рідини від температури швидкості ультразвуку в парах рідини. Дані про температурний коефіцієнт швидкості ультразвуку в рідинах і газах наведено в [8].

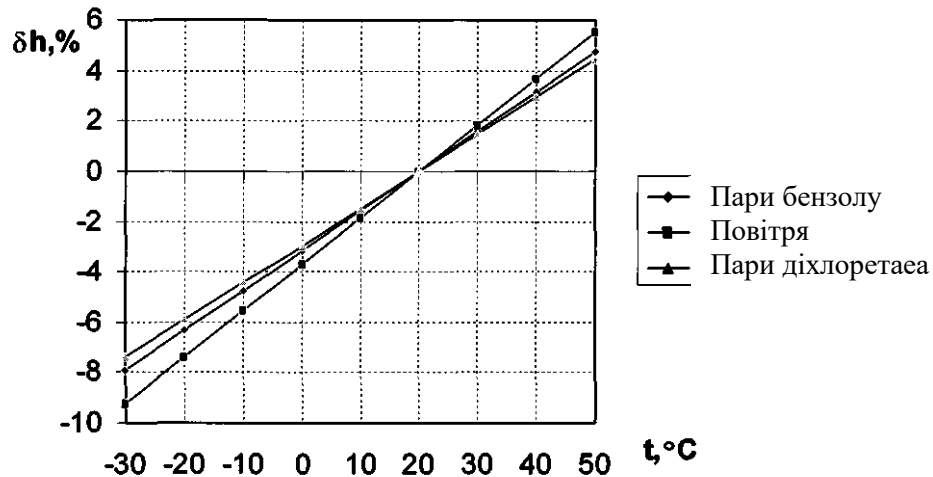


Рисунок 4.1 – Залежність похибки вимірювання рівня температури

Як видно з наведених графіків, додаткова похибка вимірювання рівня температури газоподібного середовища дуже велика.

Припущення про незмінність температурного коефіцієнта швидкості звуку правильне для тонкого інтервалу температур. У широкому інтервалі температур швидкість звуку у газах виражається залежністю:

$$c(t^\circ) = \sqrt{\frac{P_0 \chi [1 + \alpha(t^\circ - t_0)]}{P_0}}, \quad (4.2)$$

де  $P_0$  - тиск газу при температурі  $t_0$ ;

$\rho$  - щільність газу при  $t_0$ ;

$\alpha$  - коефіцієнт теплового розширення газу ( $\alpha = 1 / 273.2 \text{ K}^{-1}$ );

$\chi = c_p / c_v$  - відношення теплоємностей газу.

Таким чином, похибка від температурної залежності швидкості ультразвуку є систематичною і усувається запровадженням відповідної поправки. Для корекції результату вимірювання використовується інформація про температуру газу, для отримання якої до складу рівнеміру вводиться канал вимірювання температури. Корекція проводиться шляхом обчислення поправочного коефіцієнта за виміряною температурою.

#### 4.1.2 Похибка від зміни тиску в газоподібному середовищі.

Пов'язана із зміною швидкості ультразвуку відповідно до залежності (4.2). Похибка є систематичною і усувається введенням виправлення, для чого вводиться додатковий канал для вимірювання тиску. При використанні низькочастотних ультразвукових рівнів цієї складової похибки нехтують через її незначності, т.к. тиск у резервуарі близький до атмосферного, яке, своєю чергою, змінюється у невеликих межах.

#### 4.1.3 Похибка від зміни складу газоподібного середовища.

Швидкість звуку в газах залежить від складу. Залежність швидкості звуку виражається формулою

$$c = \sqrt{\frac{1}{k_s \rho_0}},$$

де  $k_s$  - адіабатичний коефіцієнт стиснення,

$\rho_0$  - незбурена щільність середовища.

Наявність слідів інших газів призводить до значної зміни швидкості звуку – до одиниць відсотків. Важливий випадок – наявність парів води. Згідно з експериментальними даними, при підвищенні вологості повітря швидкість звуку спочатку швидко збільшується, проходить через максимум, трохи зменшується, потім знову зростає [16], при цьому положення максимуму залежить від частоти ультразвуку. Ця похибка є систематичною, проте у зв'язку з труднощами визначення складу газоподібного середовища в резервуарі аналітичний розрахунок поправки неможливий. Для усунення впливу складу газоподібного середовища швидкість звуку застосовується логометричний метод. Для його реалізації вводиться штучна перешкода, розташована на фіксованій відстані від акустичного перетворювача. Рівень обчислюється по відношенню до часу пробігу УЗ-імпульсу до межі поділу середовищ до часу пробігу УЗ-імпульсу до штучної перешкоди [2].

#### 4.1.4 Похибка від градієнта швидкості звуку за висотою.

Це систематична похибка, зумовлена тим, що в резервуарах великої висоти температура та склад газу над поверхнею рідини та поблизу акустичного перетво-

рювача неоднакова. Для усунення впливу градієнта швидкості звуку використовуються системи з кількох штучних перешкод (відбивачів), розташованих на рівній відстані одна від одної. При цьому рівнемір приймає кілька відбитих сигналів з різними затримками. Рівень рідини обчислюється за допомогою апроксимації залежності швидкості звуку.

#### 4.1.5 Похибка від дії акустичних шумів.

Ця похибка є випадковою. На відбитий сигнал впливають як імпульсні перешкоди, і шум зі спектром, що у смузі пропускання акустичного перетворювача має рівномірний спектр. Значний вплив на процес вимірювання рівня рідини надають імпульсні акустичні перешкоди, походження яких пов'язане, наприклад, з наявністю поблизу резервуара машин і механізмів, що викликають вібрацію, що передається через основу. Зменшити вплив імпульсних перешкод дозволяє застосування вузлів обробки з інерційним зворотним зв'язком та накопиченням сигналу [1,7]. Похибка виміру, обумовлена впливом білого шуму, виражається залежністю (2.36). Вплив акустичних шумів на похибку вимірювання рівня дуже велике при низькій швидкості наростання сигналу, яка обумовлена великою постійною часом низькочастотних акустичних перетворювачів.

#### 4.1.6 Похибка стану поверхні рідини.

Це випадкова похибка, яка обумовлена низкою факторів. До них належать наявність піни і хвилювання поверхні рідини. Вплив цих факторів виявляється у зміні форми відбитого сигналу, що приймається, і флуктуації фази відбитого сигналу. Для вимірювання рівня пінних рідин застосовуються багаточастотні рівнеміри. Застосовується також просторова обробка, для чого використовується один передавальний та декілька приймальних акустичних перетворювачів [9].

#### 4.1.7 Похибка дисперсії газової суміші.

У газах без домішок дисперсія незначна [8]. При невизначеному складі газоподібного середовища похибка дисперсії виступає як випадкова. Вплив дисперсії виявляється у зміні тривалості та форми відбитого сигналу, що утрудняє застосування методів узгодженої фільтрації.

## 4.2 Похибка від швидкої зміни рівня рідини

Ця похибка є динамічною. Найбільше впливає вона на рівні міри, в яких використовується усереднення або стежить врівноваження. У слідкуючих рівнях з вузлом обробки рис. 1.8 максимальна швидкість зміни рівня рідини становить

$$v = \frac{\Delta_k \cdot K_1(Z) \cdot K_D(Z) \cdot K_{KGC}(Z)}{T_i},$$

де  $\Delta_k$  – крок квантування,

$K_1(Z)$  - визначає астатизм першого порядку в передавальній функції вузла управління  $K_{v1}(Z) = K_1 Z^{-1} / (1 - Z^{-1})$ ;

$K_D(Z)$  - передатна функція дискримінатора,

$K_{KGC}(Z)$  - передатна функція керованого генератора стробів,

$T_i$  - період проходження зондувальних імпульсів.

Головна перешкода для зниження цієї складової похибки - неможливість збільшення частоти проходження зондувальних імпульсів через реверберацію в резервуарі. В той же час, швидка зміна рівня рідини не характерна для резервуарів великої місткості через їх значний поперечний переріз і може бути викликана лише аварійною ситуацією. Типове значення максимальної швидкості зміни рівня рідини при вимірюванні за допомогою стежать рівнемірів становить від 0.5 до 1 см/с.

### 4.3 Похибки, пов'язані з апаратною частиною рівня

До них відносяться складові похибки, обумовлені впливом власних шумів приймального тракту, тимчасовою і температурною нестабільністю вузлів рівнеміра, дискретністю шкали та ін. зробити висновок про те, що проблема впливу її на метрологічні характеристики ультразвукових рівнемірів в даний час знято.

### 4.4 Дослідження похибки непрямого виміру об'єму рідини

Значне підвищення точності сучасних ультразвукових рівнемірів уможливило їх застосування для кількісного обліку нафтопродуктів. При непрямому вимірі об'єму та маси рідини за відомим рівнем на похибку вимірювання значною мірою впливають фактори, пов'язані з властивостями рідини та резервуару. У зв'язку з цим наявність у системі збору даних високоточних рівнемірів не є єдиною умовою отримання низької похибки вимірювання об'єму та маси рідини. Значний інтерес представляє аналіз тих факторів, що впливають, що призводять до появи систематичних складових похибки вимірювання об'єму і маси, зокрема, температурного розширення рідини і резервуара, деформації резервуара під дією ваги рідини. Зазначені складові похибки можна усунути введенням виправлення в результат вимірювання. <sup>51</sup>

При організації кількісного обліку кількості рідини в резервуарах великих розмірів найбільшого поширення набули два методи вимірювання маси та обсягу. Для реалізації першого застосовуються витратоміри та лічильники, об'єм рідини обчислюється відповідно до співвідношення

$$V = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} Q(t)dt + V_0, \quad (4.3)$$

де  $Q(t)$  - об'ємна витрата рідини;

$\Delta t$  - час вимірювання;

$V_0$  - початковий обсяг.

Другий заснований на непрямому вимірюванні об'єму відповідно до співвідношення:

$$V = \int_0^H S(h) dh ,$$

$V$  - об'єм рідини;

$S(h)$  - переріз резервуару на рівні  $h$  ;

$H$  - висота рівня рідини.

Наявність у витратоміра деякої похибки призводить до зміни другого доданку у формулі (4.3). При багаторазовому повторенні операцій наповнення та зливу рідини залишається неконтрольований початковий об'єм  $V_0$ . Усунути цей ефект можна лише регулярним випорожненням резервуара. Метод непрямого вимірювання обсягу з використанням рівнеміра позбавлений цього недоліку.

Як правило, кількісні виміри пов'язані з приведенням результату виміру до деяких початкових умов, при цьому повинні враховуватися такі фактори: розширення рідини, розширення резервуара, деформація резервуара та багато інших. Вплив більшості цих чинників викликає поява систематичної похибки, яка може бути зменшена запровадженням відповідної поправки [5]. Причому з підвищенням вимог до точності вимірювань доводиться враховувати складові похибки, які раніше не враховувалися через недостатньо високу точність рівнемірів. До таких складових похибки вимірювання обсягу відноситься складова, обумовлена деформацією резервуара під дією ваги рідини, що має різну питому вагу. Розрахунки показали, що похибка вимірювання об'єму, обумовлена деформацією резервуара під дією ваги рідини, для сталевих резервуарів (модуль пружності сталі  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  [6]) висотою понад 10 м може становити від 0,01 до 0.1 %, що при великих діаметрах резервуарів може призвести до значної абсолютної похибки виміру обсягу. Ця похибка різко зростає зі збільшенням лінійних розмірів резервуара. Так, при подвоєнні діаметра резервуара похибка від деформації зростає у 8 разів, що підтверджує необхідність її обліку під час проектування систем вимірювання об'єму рідини у резервуарах великих розмірів.

Для ілюстрації сказаного вище були побудовані залежності абсолютної похибки вимірювання об'єму циліндричного резервуара від рівня рідини для різних значень внутрішнього діаметра (рис. 4.2).

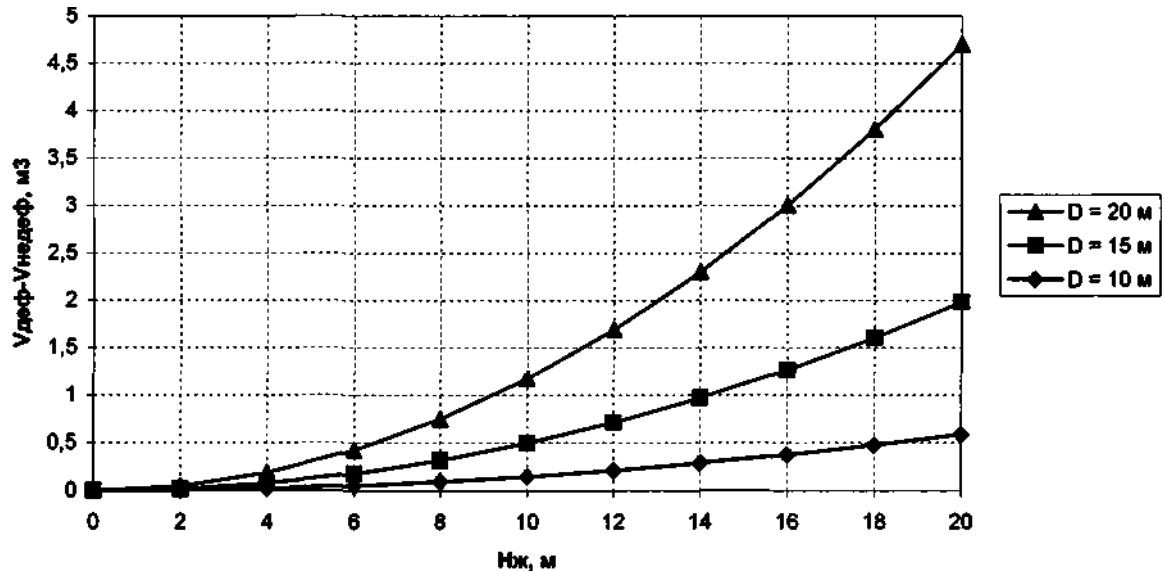


Рисунок 4.2 – Залежність похибки вимірювання рівня від рівня рідини

З наведених графіків видно, що похибка від деформації різко зростає зі збільшенням геометричних розмірів, що підтверджує необхідність введення поправки, розрахованої за пропонованою методикою, внаслідок непрямого виміру об'єму рідини під час роботи з резервуарами великого обсягу. Ця складова похибки є систематичною, що дозволяє ввести корекцію при вимірюванні об'єму:

$$V_p = V_{\text{вимір}} (1 + \delta_{\text{деф}}),$$

Де  $V_p$  - об'єм рідини, що визначається;

$V_{\text{вимір}}$  - об'єм, виміряний без урахування деформації резервуара,

$\delta_{\text{деф}}$  - відносне збільшення об'єму від деформації.

#### 4.5 Оцінка невизначеностей при калібруванні

Схема лабораторної установки для калібрувань акустичного рівнеміра показана на рис. 4.3.

Характеристики рівня визначалися в діапазоні рівнів від 0 до 6 м, що відповідає максимальному діапазону вимірювання акустичного преобразователя АП-6В. За нулеву відмітку було прийнято мінімально виміряна відстань, обумовлене перехідним процесом у переданому тракті, яке вчиталося з виміряного та дійсного значення.

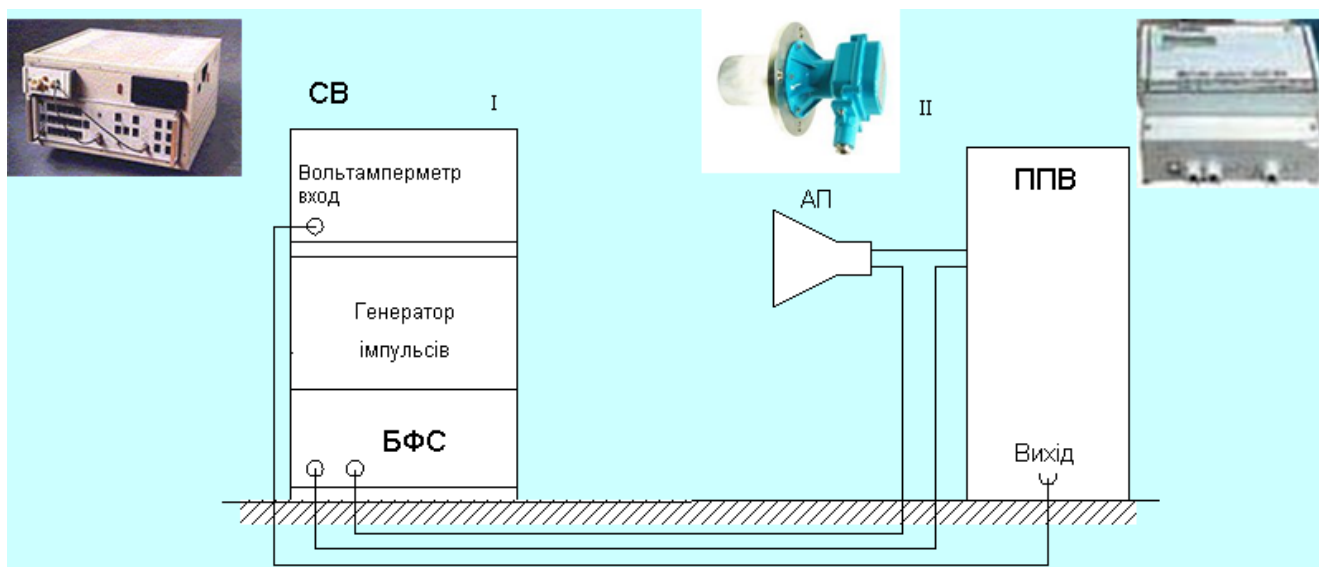


Рисунок – 4.3 Структурна схема калібрування акустичного давача рівня:

I – калібрувальна установка;

СВ – стійка вимірювання, що включає: вольтаперметр, генератор імпульсів, блок формування сигналів БФС;

II – Акустичний датчик рівня:

АП – акустичний перетворювач,

ППВ - перетворювач передавальний вимірювальний.

Відліки з таймерами узла управління передавалися по інтерфейсу ІРПС (токова петля 20 мА) на швидкості 9600 біт/с в комп'ютер для накопичення масивів відсчетов і розрахунку математического очікування і середньоквадратичного відхилення в автоматичному режимі. Перед зняттям показаних було введено значення швидкості звуку, яка при температурі повітря в приміщенні +16 °С становить 340,89 м/с.

Для оцінки невизначеності під час калібрування рівнеміра та встановлення придатності приладу було проведено багаторазове спостереження  $n=100$  для діапазону рівнів (000,000 – 600,000 см). Проведено обробку результатів багаторазових спостережень. Отримано сповільнену ультразвукову відповідь, мс та значення вихідного сигналу, мА (табл. 1).

Таблиця 4.1 – Результати багатократних вимірювань рівня

Результати багатократних вимірювань рівня в кінці діапазону, см:									
599.948	599.825	599.863	599.868	599.829	599.892	599.892	599.859	599.869	
599.865	599.855	599.880	599.844	599.919	599.856	599.863	599.889	599.862	
599.857	599.838	599.868	599.824	599.879	599.904	599.841	599.883	599.894	
599.817	599.821	599.875	599.849	599.879	599.882	599.879	599.895	599.878	
599.892	599.828	599.859	599.856	599.817	599.867	599.831	599.898	599.838	
599.874	599.866	599.835	599.801	599.858	599.833	599.877	599.874	599.906	
599.876	599.843	599.870	599.833	599.859	599.859	599.860	599.851	599.890	
599.809	599.872	599.884	599.880	599.876	599.861	599.878	599.875	599.853	
599.850	599.852	599.820	599.854	599.863	599.868	599.899	599.851	599.877	
599.882	599.885	599.833	599.866	599.866	599.833	599.840	599.889	599.856	
599.871	599.862	599.843	599.845	599.872	599.834	599.881	599.875	599.838	
599.853									
Результати багатократних вимірювань рівня на початку діапазону, см:									
0.004	0.028	0.049	0.013	0.033	0.031	0.026	0.001	0.002	0.016
0.003	0.000	0.060	0.026	0.004	0.024	0.000	0.000	0.019	0.048
0.028	0.041	0.000	0.014	0.019	0.000	0.000	0.047	0.025	0.010
0.044	0.031	0.001	0.057	0.032	0.060	0.052	0.009	0.000	0.023
0.017	0.005	0.037	0.061	0.012	0.005	0.019	0.041	0.004	0.000
0.022	0.023	0.037	0.011	0.021	0.015	0.023	0.062	0.010	0.007
0.036	0.003	0.026	0.010	0.038	0.038	0.020	0.000	0.028	0.063
0.049	0.000	0.023	0.009	0.000	0.000	0.032	0.015	0.026	0.016
0.014	0.034	0.042	0.076	0.000	0.000	0.050	0.016	0.000	0.033
0.062	0.042	0.072	0.037	0.070	0.017	0.000	0.020	0.054	0.000

Таблиця 4.2 - Результати калібрування

Рівень		Затримка УЗ- відгуку, мс	Оцінка значення вихідного сигналу, мА		
см	%		0-5	0-20	4-20
600	0	45,987	0	0	4
420	30	35,672	1,5	6	8,8
300	50	38,795	2,5	10	12
150	75	20,199	3,75	15	16
0	100	11,603	5	20	20

На основі рекомендацій [16-18] визначено стандартну невизначеність за типом А:  $u_A=0,735$ ; оцінені невизначеності за типом В:  $u_B=0,574$  і загальна стандартна невизначеність  $u_{600}=1,57$  ( $P=0,95$ ) калібрувань.

## ВИСНОВКИ

В рамках кваліфікаційної роботи «Вдосконалення метрологічного забезпечення локаційних методів вимірювання рівня» проведено дослідження та отримано наступні результати:

1. Виконо аналіз та зроблено класифікація рівнемірів, придатних для вимірювання рівня легкозаймистих рідин. Вказано основні технічні характеристики та недоліки застосовуваних методів вимірювання. Обґрунтовані переваги імпульсних ультразвукових рівнів, для яких обґрунтована необхідність удосконалення алгоритмів функціонування із застосуванням сучасних методів і засобів синтезу та обробки сигналів.

2. Запропоновано спосіб розширення діапазону вимірювань імпульсних ультразвукових рівнів з низькочастотними п'єзорезонаторами, заснований на компенсації перехідного процесу. Виведені аналітичні розрахунки для розрахунку параметрів компенсуючого сигналу.

3. Розроблена та досліджена структурна схема імпульсного ультразвукового рівня на основі мікроконтролерів, що дозволяє реалізувати запропонований спосіб покращення характеристик. Розроблено алгоритми функціонування розроблених рівнемірів.

4. Проведено аналіз факторів, що впливають на ефективність компенсації перехідного процесу. Розроблені математическі моделі для розрахунку впливу на процес компенсації точності установки компенсуючої напруги, розбудови частоти генератора зондируючих імпульсів, значення співпротилеження опорного резистора.

5. Проаналізовано похибки вимірювання рівня речовини: додаткові погрешности, інструментальні похибки, динамічні похибка.

6. Наведено розрахунок похибки, зумовленої деформацією резервуара під дією ваги рідини, алгоритм розрахунку поправки та програма розрахунку поправки на мові високого рівня.

7. Запропоновані методи і засоби калібрування розробленого УЗ- рівня, оцінено невизначеності.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андросова, В. Г. П'єзоелектричні резонатори [Текст]: Довідник / В. Г. Андросова, Є. Г. Броннікова, А. М. Васильєв. - К: Радіо і зв'язок, 2010. - 392 с.
2. Бакаленко, В. І. Корекція температурної похибки акустичних рівнемірів [Текст] / В. І. Бакаленко, І. О. Оробей, В. Н. Хроль, А. А. Василенко // Вимірювальна техніка. - 2015. - № 5. - С. 32-36.
3. Бергман, Л. Ультразвук та його застосування в науці та техніці. Переклад із ньому. [Текст] / М. В. Григор'єв, Л. Д. Розенберг, 2-ге вид. : вид-во іноземної літератури, 2013 - 726 с.
4. Бобровніков, Г. Н. Методи вимірювання рівня. [Текст] / Г. Н. Бобровніков, А. Г. Катков. : Машинобудування, 2007.
5. Гриньова, Л. Д. та ін. Матеріали та датчики для ультразвукових витратомірів [Текст] / Л. Д. Гриньова, Л. М. Слесарева, Р. А. Молчанова // Вимірювальна техніка 2007 № 7.
6. Гусинський, І. С. Малі АСУТП вимірювання рівня рідких та сипких матеріалів [Текст] / І. С. Гусинський, В. С. Гусєв, Ю. Є. Гладишев // Прилади та системи управління. - 2008. - № 8. С. 21 - 25.
7. Трофімов, А. І. П'єзоелектричні сигналізатори рівня агресивних рідин з згинальними хвилеводами [Текст] / А. І. Трофімов, В. В. Мішук. Вимірювальна техніка. - 2007. - № 7.
8. Степанов, В. Л. Слідкує ультразвуковий рівнемір рідин і сипучих середовищ [Текст] / В. Л. Степанов, В. А. Шалатонін, А. В. Асаєвич // Прилади та системи управління. - 2009. - № 2 - С. 31 - 33.
9. Кюрегян, С. Г. Моделі гідростатичного та об'ємно-масового методів вимірювання маси рідини у вертикальних резервуарах [Текст] / С. Г. Кюрегян, А. А. Тер-Хачатуров // Вимірювальна техніка 2007. - № 2. - С 25-29.
10. Калашник, Р. Р. Сучасні інформаційно-вимірювальні системи обліку

нафтопродуктів для резервуарних парків [Текст] / Р. Р. Калашник, З. А. Кузьмін, З. Р. Макушкин // Світ зв'язку, 2012. – № 7 – 8.

11. Вимірювання у промисловості [Текст]: Справ. вид. у 3 – х кн. Кн. 2. Способи вимірювання та апаратура: Пер.з нім. / За ред. Профоса П. 2-ге вид., перероб. та дод. - К.: Металургія, 2011 - 384 с.

12. Мордасов, Д. М. Струменево-акустичний сигналізатор рівня [Текст] / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов // Прилади та системи управління. – 2008. – № 3. – С. 29 – 31.

13. Кюрегян, С. Г. Методичні похибки непрямих вимірювань маси рідини в резервуарах [Текст]/С. Г. Кюрегян, Р. А. Акопян, А. І. Буланов// Вимірювальна техніка. -2017. - №7. - С. 18-24.

14. Хусаїнов, Н. М. Сучасні методи та засоби повірки рівнемірів [Текст] / Н. М. Хусаїнов, Б. Г. Хусаїнов, Н. Н. Антонов // Сер. "Метрологічне забезпечення вимірів". – 2016. – № 2. – С. 44.

15. Чураков, П. П. Ультразвуковий рівнемір з розширеним діапазоном виміру [Текст] / Чураков. - К.: Датчики та системи, 2015. - №5., с. 51–54.

16. Zakharov, I. and Botsyura, O. Estimation of expanded uncertainty in measurement when implementing a Bayesian approach // Measurement Techniques, 2018, Volume: 61, Issue: 4, pp. 342-346.

17. SO/IEC Guide 98-3:2008 «Uncertainty of measurement – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)».

18. ДСТУ-Н РМГ 43-2006. Metrology. Application of the "Guidelines for the Evaluation of Uncertainty in Measurements".