

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи  
магістра

на тему: **Комп'ютеризована система вимірювання рівня рідини у  
резервуарах хімічного виробництва**

Виконав: студент 2 курсу, групи ІВТ-3м  
Спеціальності: 175 «Інформаційно-  
вимірювальні технології»

Сай Артем Анатолійович

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

**Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-  
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент \_\_\_\_\_ Сай Артем Анатолійович \_\_\_\_\_

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання рівня рідини у  
резервуарах хімічного виробництва

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ кандидат технічних наук, доцент Чепюк  
Л.О.

затверджена наказом по університету від « 04 » листопада 2025 р. № 622/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 15 » грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт вимірювань – рівень рідини у резервуарах хімічного виробництва, число каналів вимірювання – 1; діапазон вимірювання рівня рідини – 0...5000 мм; робоча температура: від +2°C до +70°C; межі допустимих значень основної похибки –  $\pm 0,2$  %.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)  
огляд та аналіз існуючих систем та методів вимірювання рівня у хімічній промисловості; розробка структурної схеми системи, вибір технічних засобів вимірювання рівня, розробка електричної принципової схеми системи; розробка алгоритму та програми роботи системи; розрахунок метрологічних характеристик системи.

5. Перелік графічного матеріалу

структурна схема системи, електрична принципова схема системи, блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------|----------------|------------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                           | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Огляд та аналіз джерел інформації                             | 01.10.25 – 05.10.25            | Виконано |
| 2     | Формулювання завдань кваліфікаційної роботи                   | 06.10.25 – 10.10.25            | Виконано |
| 3     | Розробка структурної схеми                                    | 25.10.25 – 09.11.25            | Виконано |
| 4     | Вибір технічних засобів вимірювального каналу системи         | 11.10.25 – 15.10.25            | Виконано |
| 5     | Розробка електричної принципової схеми системи                | 16.10.25 – 24.10.25            | Виконано |
| 6     | Розробка алгоритму та програми роботи системи                 | 10.11.25 – 22.11.25            | Виконано |
| 7     | Розрахунок метрологічних характеристик системи                | 23.11.25 – 03.12.25            | Виконано |
| 8.    | Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу | 04.12.25 – 17.12.25            | Виконано |

Студент

Сай А.А.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Чепюк Л. О.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## **АНОТАЦІЯ**

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану систему вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

Система повинна забезпечувати безперервне вимірювання рівня рідини, надавати точні дані у режимі реального часу та дозволяти оперативно реагувати на зміни рівня рідини. В роботі проведено аналіз існуючих методів вимірювання рівня рідини, розроблено структурну схему системи, обґрунтовано вибір датчиків та обладнання, розроблено електричну принципову схему системи. Виконано розробку програмного забезпечення для комп'ютеризованої системи контролю та вимірювання рівня рідини в резервуарах хімічного виробництва.

Ключові слова: комп'ютеризована система вимірювання, рівень рідини, мікроконтролер, ультразвуковий датчик рівня.

## **ABSTRACT**

In this qualification work, a computerized system for measuring the liquid level in chemical production tanks was developed.

The system should provide continuous measurement of the liquid level, provide accurate data in real time and allow prompt response to changes in the liquid level. In the work, the analysis of existing methods of measuring the liquid level was carried out, the structural diagram of the system was developed, the choice of sensors and equipment was justified, and the electrical schematic diagram of the system was developed. The development of software for a computerized system of control and measurement of liquid level in chemical production tanks has been completed.

Key words: computerized measurement system, liquid level, microcontroller, ultrasonic level sensor.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....                                                                                        | 7  |
| ВСТУП.....                                                                                                             | 8  |
| 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ.....                                                                                | 11 |
| 1.1. Вимірювання рівня у хімічній промисловості.....                                                                   | 11 |
| 1.1.1. Складні умови застосування засобів вимірювання рівня .....                                                      | 11 |
| 1.1.2. Простота у використанні.....                                                                                    | 13 |
| 1.1.3. Застосування рівнеміра на агресивних середовищах.....                                                           | 13 |
| 1.1.4. Запобігання переповненню.....                                                                                   | 14 |
| 1.1.5. Застосування рівномірів у теплових установках.....                                                              | 15 |
| 1.1.6. Обслуговування та надійність .....                                                                              | 16 |
| 1.2. Аналіз методів і засобів вимірювання рівня рідких середовищ.....                                                  | 18 |
| 1.2.1. Основні поняття .....                                                                                           | 18 |
| 1.2.2. Методи вимірювання рівня.....                                                                                   | 18 |
| 1.2.3. Класифікація рівнемірів, призначених для вимірювання рівня<br>рідини .....                                      | 19 |
| 1.3. Аналіз акустичних рівнемірів .....                                                                                | 22 |
| 1.3.1. Акустичні рівнеміри «прямого» зондування .....                                                                  | 22 |
| 1.3.2. Дисипативні рівнеміри .....                                                                                     | 24 |
| 1.3.3. Акустичні локаційні рівнеміри.....                                                                              | 25 |
| 1.3.4. Акустичні кореляційні рівнеміри.....                                                                            | 31 |
| 1.3.5. Акустичні осциляторні рівнеміри .....                                                                           | 32 |
| 1.3.6. Акустичні резонансні рівнеміри.....                                                                             | 34 |
| 1.3.5. Акустичні осциляторні рівнеміри .....                                                                           | 32 |
| 1.4. Застосування методів огинаючих другого і третього порядків для<br>визначення часового положення ехо-імпульсу..... | 37 |
| 2. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ<br>РІВНЯ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА.....             | 46 |
| 2.1. Розробка структурної схеми .....                                                                                  | 46 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2. Вибір датчика рівня рідини .....                                                                                                                                       | 48 |
| 2.3. Вибір звукового модуля .....                                                                                                                                           | 60 |
| 2.4. Вибір індикації.....                                                                                                                                                   | 61 |
| 2.5. Розробка принципової схеми.....                                                                                                                                        | 62 |
| 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО - АЛГОРИТМІЧНОГО ТА<br>МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ<br>СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ<br>ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА ..... | 70 |
| 3.1. Розробка алгоритму роботи системи .....                                                                                                                                | 70 |
| 3.2. Розробка програмного забезпечення .....                                                                                                                                | 72 |
| 3.3. Моделювання статистичної похибки ультразвукових рівнемірів .....                                                                                                       | 73 |
| 3.4. Підвищення точності ультразвукових вимірювань методом двох<br>компараторів .....                                                                                       | 78 |
| 3.5. Розрахунок похибки вимірювання.....                                                                                                                                    | 83 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                                                                                              | 85 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                                               | 86 |
| ДОДАТКИ .....                                                                                                                                                               | 90 |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

FMCW – технології безперервного випромінювання з частотною модуляцією

DVC – функція динамічної компенсації пари

УЗ – ультразвук

LCD – рідино кристалічний

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В останні роки в промисловості все більшого значення набуває автоматизація та комп'ютеризація виробничих процесів. Одним із важливих аспектів є контроль та моніторинг рівня рідин у резервуарах, що використовуються в хімічному виробництві. Це питання є актуальним, оскільки від точності вимірювання залежить безпека виробничих процесів, якість продукції та ефективність використання ресурсів.

Комп'ютеризована система вимірювання рідини в резервуарах хімічного виробництва є важливою частиною сучасних промислових процесів. Вона забезпечує точний контроль за рівнем рідин, що є критично важливим для безпеки, ефективності та оптимізації виробництва. Контроль рівня рідини допомагає уникнути аварійних ситуацій, таких як переповнення або недостатнє заповнення резервуарів, що може призвести до небезпечних умов або неефективної роботи обладнання. Відсутність точного контролю може викликати витрати через втрати продукту, аварії та незаплановані простої обладнання, що особливо важливо для хімічної промисловості з її високими стандартами безпеки та якості.

Розробка комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва є важливою з кількох ключових причин, що забезпечують її практичне застосування і цінність на таких підприємствах.

Точність вимірювань є критичною для хімічних процесів. Невірне визначення рівня рідини може призвести до небажаних хімічних реакцій, аварій або втрати продукції. Дана система забезпечує високу точність вимірювання рівня рідини, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для різноманітних виробничих процесів.

**Метою даної роботи** є розробка нової комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва, що має підвищити точність вимірювання рівня рідини. Система повинна забезпечувати безперервне вимірювання рівня рідини, надавати точні дані у

режимі реального часу та дозволяти оперативно реагувати на зміни рівня рідини.

*Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:*

- провести аналітичний огляд методів вимірювання рівня рідини;
- провести вибір контрольованих параметрів і розробити на їх основі структуру комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва;
- розробити програмно - алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва;
- розробити метрологічне забезпечення комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

*Об'єкт дослідження* – процеси вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

*Предмет дослідження* – комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

Методи дослідження базуються на аналітичному виведенні рівнянь математичної моделі вимірювального каналу, використанні обчислювальних блоків у вимірювальному каналі, застосуванні методів комп'ютерного моделювання з наступною статистичною обробкою отриманих результатів.

***Наукова новизна*** даної роботи полягає в:

- вибрано нові датчики для вимірювання рівня рідини;
- удосконалено структурну схему комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва;
- розроблено блок-схема алгоритму роботи комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

***Практична цінність*** даної роботи полягає в:

- вибрано вимірювальні засоби та елементну базу комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва;

- розраховано метрологічні характеристики комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва;
- пропонується впровадити нову комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва.

***Структура та обсяг роботи.*** Дана робота складається з анотації, вступу, 3 основних розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатку. Робота викладена на 89 сторінках основного тексту і містить 44 рисунки та 4 таблиці.

## **1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ**

### **1.1. Вимірювання рівня у хімічній промисловості**

Точні та надійні результати вимірювання рівня, обсягу рідких та сипких речовин у резервуарах, ємностях та силосах мають важливе значення для ефективної та безпечної роботи підприємств хімічної галузі. Повсюдне використання засобів автоматизації дозволило як забезпечити точність вимірювань, а й істотно підвищити ефективність роботи персоналу.

Передові технології вимірювання рівня також сприяють скороченню обсягу технічного обслуговування обладнання, отриманню розширеного набору даних про технологічні операції, оптимізації управління процесом та значному підвищенню безпеки персоналу та підприємства.

#### **1.1.1. Складні умови застосування засобів вимірювання рівня**

Вимірювання рівня в хімічній промисловості являє собою складне завдання через широке розмаїття рідких середовищ, що вимірюються, мінливих параметрів технологічних процесів, різних типів і розмірів ємностей. На точність вимірювань суттєво впливають такі фактори, як турбулентність середовища, утворення піни та конденсату у змішувальних баках та резервуарах реакторів. Підвищити точність вимірів можна за рахунок застосування відповідної технології. Це може бути точковий контроль рівня, вимірювання рівня методом різниці тисків або за допомогою хвилеводних та безконтактних радарних рівнемірів.

У застосуваннях з використанням реактора, мішалок і резервуарів для змішування важливо точно знати обсяг середовища, що знаходиться в ємності, щоб забезпечити необхідну якість кінцевого продукту. Для цього існує ціла низка технологій вимірювання. Однак, тільки завдяки безперервному виміру рівня радарними рівнемірами оператор отримуватиме не тільки достовірні дані про рівень продукту, але й здійснюватиме повний контроль технологічного процесу після завершення хімічної реакції.

Шум від пристроїв, що перемішують, впливає на якість і достовірність вимірювань. Однак за останні роки все більш доступними стають безконтактні радарні рівнеміри на базі технології безперервного випромінювання з частотною модуляцією (FMCW), які підвищують надійність та точність вимірювань, особливо у складних умовах застосування. Тому найбільш підходящим рішенням для вимірювання рівня в ємностях з пристроями, що перемішують, є безконтактний радарний рівнемір.

Принцип дії безконтактних радарних рівнемірів заснований на технології імпульсної модуляції. У напрямку поверхні середовища випромінюються мікрохвильові імпульси, які потім відбиваються на сенсор, при цьому рівень прямо пропорційний часу між передачею та прийомом сигналу. При використанні технології FMCW випромінювач передає безперервний сигнал-зондування з частотою, що постійно змінюється. Різниця між частотами відбитого сигналу і сигналу, що передається в цей момент, пропорційна відстані від рівнеміра до поверхні, за рахунок чого відбувається вимірювання рівня. Перевагою FMCW є те, що змінні технологічні дані визначаються в залежності від різниці частот, а не амплітудної модуляції сигналу або відрізка часу між переданим і відображеним сигналами, що сприяє більш точному перетворенню радіосигналу у відповідний вихідний сигнал. Більшість джерел шуму в резервуарах, наприклад пристрої, що перемішують, створюють амплітудну модуляцію, тому обробка сигналу за принципом частотної модуляції дозволяє не враховувати джерела шуму і при цьому забезпечувати точні вимірювання.

Перетворювачі з урахуванням технології FMCW в 30 разів більш чутливі ніж традиційні імпульсні радарні рівнеміри. Завдяки цьому вдається забезпечити максимальну потужність сигналу, надійні та точні вимірювання, а також значно підвищити рівень безпеки у складних умовах застосування.

Технологія FMCW не є новою, проте завжди вважалася енерговитратною і тому використовувалася тільки в чотирьох провідних пристроях. Установка таких пристроїв часто передбачає підведення додаткових кабелів, що потребує фінансових витрат і забирає час. В

результаті підприємствам доводилося жертвувати точністю та надійністю FMCW-пристроїв та встановлювати двопровідні датчики на базі імпульсної технології. У сучасних пристроях на базі технології FMCW проблему підвищеного енергоспоживання вирішено, і тепер вони доступні у вигляді двопровідних рішень, які можна встановити на території всього об'єкту без додаткових витрат на інфраструктуру.

Підвищення надійності вимірювань із двопровідним безконтактним радарним рівнеміром з використанням технології FMCW.

### **1.1.2. Простота у використанні**

Ще одним досягненням у технології вимірювання рівня стало спрощення встановлення, експлуатації та обслуговування обладнання. Безконтактний радарний рівнемір забезпечує надійність та точність вимірювань, але така робота може бути забезпечена при правильній установці та конфігурації. У минулому пристрої потребували значних знань персоналу, підтримка яких на підприємствах вимагала значних вкладень. Але тепер інтуїтивно зрозумілі програмні інтерфейси забезпечують простоту встановлення датчика та введення його в експлуатацію. Ця простота поширюється також на процедури контрольного тестування та обслуговування, що гарантує легкість виконання обох завдань. Це сприяє підвищенню ефективності трудовитрат персоналу, але, що найважливіше, забезпечує правильну роботу пристроїв та надання інформації, необхідної для безпечної та ефективної роботи технологічних установок.

### **1.1.3. Застосування рівнеміра на агресивних середовищах**

Ще одна проблема для контрольно-вимірювальних приладів, включаючи пристрої для вимірювання рівня - це агресивні середовища, які зазвичай використовуються в хімічній промисловості. Це висуває більш високі вимоги до компонентів рівнеміру, безпосередньо контактують із середовищем. Щоб вирішити цю проблему та знизити вимоги до технічного обслуговування, пропонується рішення з покриттям із PTFE, хвилеводні

радарні рівнеміри з зондами з покриттям PTFE та безконтактні радарні рівнеміри із ізольованими антенами з технологічним ущільненням. Нові конструкції безконтактних радарів FMCW повністю виключають необхідність використання ущільнювальних кілець, що змочуються. Це означає, що при зміні властивостей середовища від партії до партії, що є звичайним явищем у хімічній промисловості, виключаються ситуації, коли спочатку зазначене кільце ущільнювача може виявитися несумісним із середовищем. Ці особливості дозволяють встановити радарний рівнемір і забезпечити надійну роботу незалежно від середовища, яке може утримуватися в резервуарі в майбутньому.

#### **1.1.4. Запобігання переповненню**

Моніторинг рівня в резервуарах, що використовуються для зберігання сировини, продукту на проміжних стадіях процесу або кінцевого продукту, - ще одне поширене застосування технології вимірювання рівня в хімічному виробництві. Вимірювання рівня використовується для управління поставками та запасами, забезпечення контролю та запобігання переповненню. Нездатність ідентифікувати та запобігти переповненню резервуарів та судин, що містять небезпечні та легкозаймисті матеріали, може мати катастрофічні наслідки, про що свідчать гучні інциденти, такі як пожежа в Бансфілді у 2005 році.

Більшість прогресивних хімічних компаній впровадили автоматизовані рішення, які допомагають не тільки підвищити точність і надійність вимірів, а й позбутися обходів, що вимагають від робітників, підбиратися на резервуари та перебувати в потенційно небезпечних зонах. Протягом багатьох років радарні рівнеміри та сигналізатори рівня є оптимальним рішенням у переважній більшості застосувань. Тисячі успішних установок використовуються по всьому світу, новітні вібраційні сигналізатори, і радарні рівнеміри мають розширені вбудовані діагностичні функції та здатні виконувати часткові контрольні випробування віддалено, що забезпечує значні переваги порівняно з більш старими механічними технологіями.

Моніторинг працездатності пристроїв гарантує, що вони правильно працюватимуть у системі запобігання переповнень, а можливість виконувати віддалені часткові контрольні випробування економить час і підвищує ефективність роботи персоналу.

#### **1.1.5. Застосування рівномірів у теплових установках**

Котли - важлива частина хімічного заводу, що забезпечує теплом та парою, що використовується у виробництві. Їхня ефективна робота може мати значні переваги з точки зору зниження витрати палива, і пристрої вимірювання та контролю рівня відіграють важливу роль у досягненні цих цілей, а також допомагають запобігти пошкодженням та потенційним інцидентам, пов'язаним з безпекою. Вимірювання рівня при високому тиску і температурі є складним завданням, так як щільність середовища може значно змінюватися в процесі, що вносить до вимірювання похибку до 30%. Пристрої вимірювання щільності, такі що витісняють та датчики перепаду тиску повинні компенсувати ці зміни, щоб забезпечувати коректне вимірювання рівня. Застосування складних алгоритмів значно ускладнює систему управління, у своїй також слід відстежувати робочий тиск.

Хвилеводні радарні рівнеміри, що широко застосовуються в даний час у різних технологічних процесах, дозволяють безпосередньо вимірювати рівень поверхні рідини. Вимірювання рівня в цьому випадку зовсім не залежить від щільності, що усуває необхідність запрограмованих вручну налаштуваннях для здійснення компенсації пов'язаної зі змінами щільності. Це, поряд з можливістю витримувати екстремальні температури до 400 ° C і тиск до 345 бар, робить хвилеводні радарні рівнеміри ідеальним рішенням для застосування в нагрівачах поживної води та котлах. Тим не менш, існує додаткова складність у випадках, коли при високому тиску діелектрична проникність пари збільшується, і швидкість поширення мікрохвиль вниз по зонду радіолокації сповільнюється, що може призводити до помилок вимірювання до 20%, якщо цей вплив не компенсувати.

Компенсація може бути виконана двома способами - або за допомогою статичної компенсації, або у разі нових пристроїв вимірювання рівня, за допомогою функції динамічної компенсації пари (DVC), компенсація здійснюється розрахунковим методом електронікою рівнеміру. Для статичної компенсації очікувані робочі тиску та температури вводяться вручну при налаштуванні перетворювача. Використання функції динамічної компенсації дає значну перевагу, оскільки в цьому випадку здійснюється безперервна автоматична компенсація зміни діелектричної проникності в паровому просторі.

Для використання функції динамічної компенсації застосовується спеціальний зонд з реперним відбивачем, розташованому на фіксованій відстані для можливості безперервного визначення зміни діелектричної проникності пари. Перетворювач рівнеміру відстежує зміщення сигналу від реперного відбивача щодо його фактичного місцезнаходження і використовує це значення для зворотного розрахунку діелектричної проникності середовища в паровому просторі. Розрахунок визначається фізичними властивостями зонда, тому динамічна компенсація завжди виконується однаковим чином, що забезпечує точність та повторюваність. Завдяки динамічній компенсації пари рівень помилок може бути знижений до 2% і менше.

Динамічна компенсація змін діелектричної проникності в паровому просторі дозволяє новітнім хвилеводним радарним рівнемірам забезпечувати більш точне та відтворюване вимірювання рівня в котлах.

#### **1.1.6. Обслуговування та надійність**

Близько 5% виробничих потужностей втрачається щороку через незаплановані простої, а відмова обладнання є причиною приблизно 40% з них. Важливе для виробництва обладнання, таке як нагнітач, вентилятори та компресори, все частіше контролюється для виявлення змін, що вказують на потенційні проблеми з їх технічним станом. Насоси є ще однією частиною обладнання, яка відіграє важливу роль на типовому хімічному виробництві,

оскільки вони використовуються для переміщення сировини, проміжних і кінцевих продуктів, а також для постачання та переробки основних послуг. Нездатність підтримувати та контролювати справність насосів також може значно впливати на час безвідмовної роботи та ефективність установки.

Недостатнє мастило є частою причиною відмов насосів. Для захисту критичних насосів звичайною практикою є забезпечення безперервної подачі мастила для цього критично важливо контролювати рівень олії в резервуарі. У сучасних умовах компанії прагнуть скоротити кількість обходів та ручних операцій, не тільки для підвищення ефективності, але й для забезпечення безпеки співробітників, у зв'язку з цим очевидна їхня зацікавленість у автоматизації систем моніторингу рівня в таких застосуваннях.

Вібраційні сигналізатори, що забезпечують контроль рівня рідини, є ідеальним автоматизованим рішенням для цього типу застосувань. Вони не мають частин, що рухаються, і практично не залежать від умов процесу, що сприяє їх надійній роботі. Коли рівень резервуару падає до певної нижньої межі, здійснюється сигналізація необхідності проведення технічного обслуговування, яке усуне проблему до того, як виникне небезпека для насосів. Сигналізатори рівня також можуть бути використані для виявлення середовищ, що протікають через насос. Насос, що працює в суху, може швидко перегрітися та вийти з ладу. Використовуючи сигнал сигналізатора, можна вчасно вимкнути насос і запобігти його перегріву.

Проблемою впровадження нових автоматизованих рішень часто є відсутність необхідної інфраструктури. Нові пристрої контролю рівня мають вбудовані можливості бездротового зв'язку, що дозволяє вирішити цю проблему, спростити процес установки і забезпечити передачу даних у реальному часі без необхідності організації провідної інфраструктури. Це призводить до зниження експлуатаційних витрат за одночасного підвищення захисту насосів від механічних пошкоджень.

## **1.2. Аналіз методів і засобів вимірювання рівня рідких середовищ**

### **1.2.1. Основні поняття**

Вимірювання рівня (рівнеметрия) - процес виміру висоти рівня рідини або сипучої речовини від положення, прийнятого за нульове.

Рівномірами називають засоби вимірювання рівня. Таким чином, рівнемір - це прилад для контролю або вимірювання рівня рідини та сипучих речовин у технологічних апаратах, резервуарах та сховищах.

Рівнем називають кордон, що відокремлює сипку речовину або рідину від вище розташованих рідини або газу меншої щільності. Вимірюють рівень у одиницях довжини.

За допомогою вимірювання рівня можна отримати інформацію про масу або обсяг рідини в резервуарах. Така інформація необхідна керувати виробничим процесом, і навіть щодо проведення товарно-облікових операцій. Розрізняють контактні та безконтактні методи вимірювання рівня [1, 7].

### **1.2.2. Методи вимірювання рівня**

Контактний метод вимірювань застосовується у будь-яких середовищах і реалізується зазвичай у ємнісних, гідростатичних, буйкових та поплавкових рівнемірах. Ці прилади легко встановити в резервуарі будь-якої форми і розміру або в безпосередній близькості до нього, вони відрізняються механічною міцністю, простотою монтажу, надійністю вимірювань і низькою вартістю [1, 2].

Безконтактний метод дозволяє вимірювати рівень без безпосереднього контакту із середовищем і полягають у зондуванні звуком (ультразвукові), зондуванні електромагнітним випромінюванням (радарні) та зондуванні радіаційним випромінюванням. Такі датчики варто використовувати в агресивних, в'язких, кристалізуються, пінних середовищах, де є ризик засмічення або корозії елементів приладу [3, 4].

### **1.2.3. Класифікація рівнемірів, призначених для вимірювання рівня рідин**

1. Механічні рівнеміри поділяються на: буйкові, що ґрунтується на вимірі сили виштовхування, що діє на буй і поплавцеві, з чутливим елементом (поплавком), що плаває на поверхні рідини [5].

2. Гідростатичні рівнеміри - засновані на вимірі гідростатичного тиску рідини, що залежить від висоти її рівня [6].

3. Електричні рівнеміри - величини електричних параметрів залежать від рівня рідини. Дані рівнеміри поділяються на такі види: вібраційні та ємнісні [7].

4. Акустичні (ультразвукові) рівнеміри - засновані на залежності інтенсивності поглинання або часу поширення акустичних коливань від висоти рівня рідини [8].

5. Мікрохвильові (радарні, хвильоводні) рівнеміри - засновані на принципі відображення поверхні сигналу високої частоти (НВЧ) [9].

Вибір методики вимірювання рідких середовищ слід розпочинати з аналізу технологічного процесу та визначення необхідної інформації:

1. Кількість контрольованих рівнів. Вимірювання рівня може бути безперервним, тобто не прив'язаним до будь-якої конкретної точки. При цьому відображається наповнення ємності у відсотковому відношенні реального обсягу середовища, що вимірюється, до загального обсягу ємності, яка приймається за 100 %.

2. Вимірюване середовище. Рідке середовище може бути агресивним, в'язким або з випаданням осаду, також у рідинах можуть виникнути проблеми осідання, пов'язані з утворенням суспензій або вмістом нерозчинного залишку. Більш того, піна, турбулентність і навіть пил можуть ввести в оману при використанні відбивних методів вимірювання, а діелектричні характеристики можуть вплинути на показання ємнісних датчиків.

3. Тип ємності. Форма, матеріал ємності, а також розташування, тобто доступ до неї, важливі показники вибору системи вимірювання та способу монтажу.

4. Точність вимірів. Зазвичай питання про точність вимірів відноситься лише до безперервних вимірів. Залежно від розмірів судини виміру можуть бути дуже точними ( $\pm < 1\%$ ), але при цьому будуть потрібні значні витрати. Необхідність виконувати точні вимірювання у великому резервуарі у межах зустрічається рідко. Одним із найпростіших та найбільш надійних способів визначення ступеня наповнення резервуара є його зважування [7].

Різноманітність рівнемірів, що випускаються в даний час, пояснюється наявністю більшої кількості завдань з контролю та вимірювання рівня: це вимірювання рівня рідких середовищ у різних робочих умовах, з різною точністю і діапазоном вимірювання. Кожен вимірювальний прилад має велику кількість різних модифікацій і опцій, що дозволяють підібрати найбільш оптимальний варіант для вирішення будь-якого вимірювального завдання в 450 області рівніметрії. Тому дуже важливо підібрати потрібний рівнемір для вимірювання рівня рідини у певних умовах, щоб уникнути великих похибок вимірів.

Таблиця 1.1 - Аналіз рівнемірів рідких середовищ

| Тип рівнеміра | Об'єкт виміру               | Діапазон вимірів: глибина(м) | Переваги рівнеміра                                                 | Недоліки рівнеміру                                                                     |
|---------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.Буйкові     | Паливо, олії, нафтопродукти | До 10 м                      | Точність вимірювання в пінних рідинах                              | Залежність показання від щільності рідини, витратна установка та подальша експлуатація |
| 2.Поплавкові  | Рідини з низькою щільністю  | До 25 м                      | Висока точність, незалежність показань від стану поверхні продукту | Складність монтажу, залежність показання від щільності середовища                      |

## Продовження таблиці 1.1 - Аналіз рівнемірів рідких середовищ

| Тип рівнеміра   | Об'єкт виміру                                                       | Діапазон вимірів: глибина(м) | Переваги рівнеміра                                                                     | Недоліки рівнеміру                                               |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 3.Гідростатичні | Однорідні, в'язкі рідини                                            | Від 2 до 100 м               | Низька ціна, простота конструкції                                                      | Низька точність вимірювань; обмеженість застосування             |
| 4. Ємнісні      | Масла, рідкі холодоагенти                                           | Від 0,2 до 20 м              | Надійність, висока точність                                                            | Неможливість роботи у в'язких рідинах                            |
| 5.Акустичні     | Пари, вируючі, димлять рідини, з піною                              | Від 0,2 до 12 м              | Висока завадозахисність зручність розташування на резервуарі                           | Незручність вимірювань піноутворювальних рідин                   |
| 6.Радарні       | Нафтопродукти, в'язкі, пари, неоднорідні, вибухонебезпечні продукти | Від 0,5 до 50 м              | Висока точність, стабільність вимірювання, зручність розташування на резервуарі        | Незручність вимірювань при кипінні або бурінні поверхні продукту |
| 7.Хвильоводні   | Рідини, межі розділу двох рідин                                     | До 32 м                      | Різні варіанти виконання, можливість вимірювання за будь-яких станів поверхні продукту | Висока вартість                                                  |

### 1.3. Аналіз акустичних рівнемірів

#### 1.3.1. Акустичні рівнеміри «прямого» зондування

Акустичне «пряме зондування» передбачає використання двох роздільних акустичних перетворювачів 1 і 2, розташованих у найпростішому випадку спів вісно із зустрічним розташуванням чутливих елементів-мембран щодо один одного. Один із перетворювачів (1) є джерелом акустичних коливань, інший (2) – приймачем.

Контрольований об'єкт - шар рідини чи газу є акустичний канал.

Рівнеміри «прямого зондування» як інформативний параметр можуть використовувати час проходження ультразвукового імпульсу через контрольовану рідину (рис. 1.1, а), газове середовище (рис. 1.1, б) і загальний простір, що займається газовим і рідким середовищем (рис. 1.1, в).

Ці рівнеміри можуть використовувати ефект і параметри згасання ультразвукового сигналу при проходженні через ці середовища.

Останній варіант покладено в основу роботи дисипативних рівнемірів, описаних нижче.

Використовуючи час проходження як інформативний параметр, ультразвукові датчики рівня за наведеними схемами на рис. 1.1 можуть працювати під час-імпульсному, частотно-імпульсному або фазовому режимах. У реалізованих практично приладах використовується переважно часо-імпульсний метод.

Відмінність швидкостей поширення звукових хвиль в газовій  $c_1$  і рідкій  $c_2$  середовищах дозволяє вести контроль рівня контрольованого середовища за рахунок вимірювання часу розповсюдження ультразвукового імпульсу від випромінювача 1 до приймача 2, розташованих на верхньому і нижньому торцях судини (рис. 1.1, в). При цьому зондується повна висота резервуару  $H$ , а сумарний час проходження акустичної хвилі

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2,$$

де  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$  відповідно час проходження газового проміжку  $(H-h)$  та шару рідини  $h$ . У цьому  $\Delta t_1 = (H-h)/c_1$  і  $\Delta t_2 = h/c_2$ .

Спільне рішення наведених виразів дозволяє знайти функцію перетворення і, відповідно, значення рівня межі розділу середовищ як:

$$h = (\Delta t \cdot c_1 - H) / \left( \frac{c_1}{c_2} - 1 \right), \quad (1.1)$$

де:  $\Delta t_1$  – час поширення акустичної хвилі;  $c_1$  і  $c_2$  – відповідно швидкості звуку в газовому та рідкому середовищах;  $H$  – повна висота резервуара.

Треба брати до уваги те, що має місце значне згасання звуку в газовому середовищі (рис. 1.1, б), що призводить до істотного послаблення сигналу; зміна швидкості звуку при зміні температури та складу середовищ, що призводить до виникнення похибки; поява хибних сигналів за рахунок поширення імпульсу по стінках ємності.

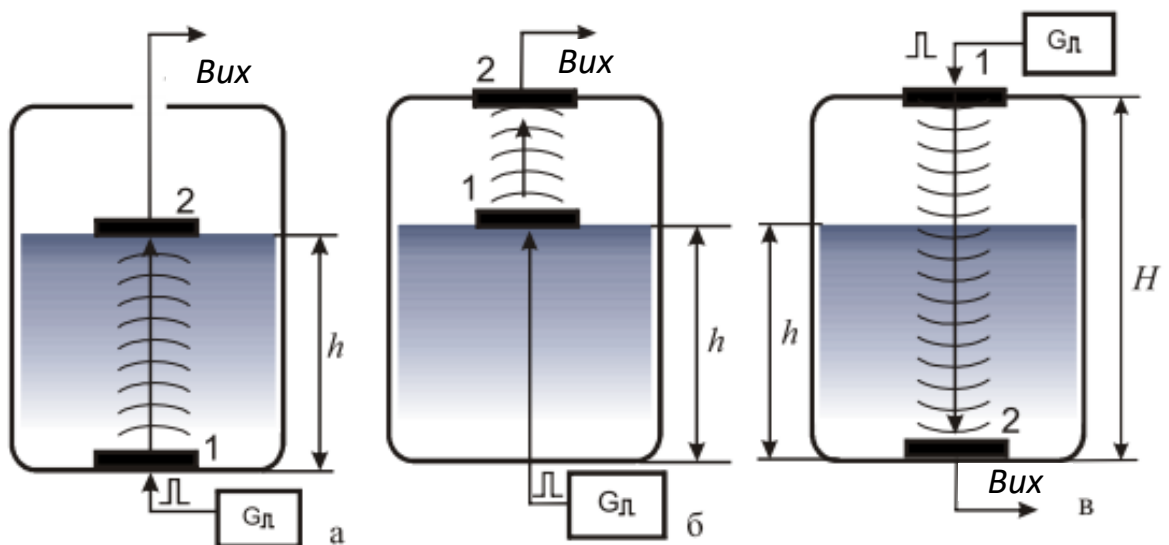


Рис. 1.1. Акустичні рівнеміри «прямого» зондування  
(дисипативні рівнеміри)

Пряме зондування контрольованого рідкого середовища (рис. 1.1, а) більш переважно через значно менше загасання звуку та менших вимог до потужності акустичних перетворювачів. Однак, необхідний безпосередній контакт одного або обох перетворювачів з контрольованою рідиною.

### 1.3.2. Дисипативні рівнеміри

Дисипація енергії (розсіювання, поглинання) – перехід енергії впорядкованого процесу в енергію неупорядкованого процесу.

Принцип дії дисипативних ультразвукових рівнемірів заснований на явищах розсіювання і поглинання звукової енергії в речовині, тобто переході енергії звукової хвилі в інші види енергії в результаті взаємодії з іншим середовищем, в якому вона поширюється, за рахунок наявності сил опору. При розсіянні відбуваються заломлення та трансформація ультразвукових хвиль. Поглинання звуку, як, втім, і інших хвильових полів, призводить до зниження інтенсивності ультразвуку внаслідок його згасання в залежності від пройденої в будь-якому матеріалі відстані  $x$  відбувається за експонентним законом:

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-ax}, \quad (1.2)$$

де  $J(x)$  - інтенсивність ультразвуку на відстані  $x$  від джерела випромінювання, інтенсивність випромінювання якого  $J_0$ ;  $a$  - коефіцієнт загасання (поглинання). Коефіцієнт поглинання  $a$  складною функцією стану і фізичних властивостей середовища поглинання, в тому числі щільності, теплопровідності. Крім того, значення коефіцієнта поглинання пропорційно квадрату частоти акустичної хвилі.

У найпростішому випадку дисипативний рівнемір (рис. 1.1, в) складається з випромінювача 1 і приймача випромінювання 2, встановлених на дні та кришці судини.

Нелінійність функції перетворення, а також низький коефіцієнт корисної дії, зумовлений додатково відображенням звукової енергії від межі розділу «рідина-газ» Наприклад, інтенсивність заломленої ультразвукової хвилі при проходженні через межу розділу «рідина-газ» в результаті великої різниці хвильових опорів контактуючих середовищ становить всього  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  падаючої хвилі, що перешкоджає широкому застосуванню дисипативних рівнемірів.

Принцип поглинання використовується переважно в акустичних сигналізаторах рівня.

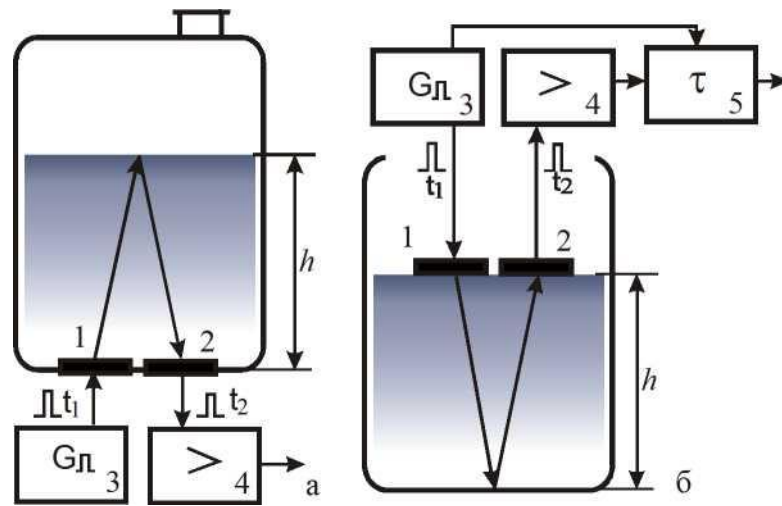
### 1.3.3. Акустичні локаційні рівнеміри

У техніці вже давно відомі такі поняття, як ехолоти, гідролокатори, акустичні (ультразвукові) далекоміри, а останнім часом і *сонари* (SOund NAvigation and Ranging). Незважаючи на різні назви, принцип їхнього функціонування однаковий - *локація*.

Локація передбачає визначення відстані до об'єкта шляхом впливу на нього впорядкованим фізичним полем та отриманням реакції у відповідь. В акустичній локації використовуються акустичні поля, а перераховані вище прилади можна однозначно називати акустичними локаторами. В акустичній рівніметрії об'єктами локації є межі розділу двох і більше фізичних середовищ з різними насамперед акустичними властивостями.

В акустичних рівнемірах застосовують два основних методи локації, як через рідину, так і через газове середовище. Зазвичай діапазон робочих частот становить 0,1-2 МГц при зондуванні через рідину та 20-100 кГц при зондуванні через газ. При локації через рідину «знизу» (рис. 1.2, *а*) або «зверху» (рис. 1.2 *б*) перетворювач ультразвукового датчика посилає короткі ультразвукові імпульси і приймає їх у вигляді ехо-сигналів, відбитих від межі розділу середовищ «газ-рідина» або від дна резервуара.

Час проходження ультразвукового імпульсу від моменту передачі до прийому при відомій швидкості звуку в рідкому середовищі сж пропорційно вимірюваній відстані, тобто рівню  $\tau = 2h/c_{\text{ж}}$ . У цьому значення рівня розраховується, як  $h = c_{\text{ж}} \tau / 2$ . Визначене таким чином значення рівня рідкого середовища перетворюється на електричний сигнал потрібного формату. Описані випадки локації через рідину відносяться до *контактних методів* рівніметрії, коли перетворювачі мають безпосередній контакт з контрольованою рідиною, що не можна використовувати. Локація через рідину краще, тому що при цьому потрібна менша потужність випромінювача, і менше посилення сигналу в приймальній частині рівнеміру.



1 – випромінювач акустичних коливань; 2 – приймач; 3 - генератор зондувального сигналу; 4 - підсилювач прийнятого сигналу; 5 - блок обробки та індикації

Рис. 1.2. Локаційні акустичні рівнеміри контактні: а – локація «знизу» і б – локація «зверху»

Недоліком таких рівнів є те, що їх показання сильно залежать від властивостей рідини (від можливих змін її складу і температури), що призводять до зміни швидкості поширення ультразвуку. Крім того, існує ряд випадків, коли застосування таких рівнів неможливо: немає доступу до нижньої частини ємності; на дні ємності є опади, що сильно поглинають ультразвукові коливання; рідина насичена великою кількістю газу і при падінні тиску в ємності відбувається інтенсивне виділення, що призводить до великого розсіювання ультразвуку.

**При локації через газове середовище** випромінювачі та приймачі знаходяться зверху, безпосередньо на даху резервуара і з рідиною контакту не мають (рис. 1.2). Такі рівнеміри забезпечують т.з. *безконтактний метод вимірювання* можуть застосовуватися для вимірювання рівня більшості рідин, у тому числі і агресивних. Шукане значення рівня рідкого середовища може бути знайдено як  $h = H - c_T \tau / 2$ , де  $c_T$  - швидкість поширення звуку в газовому середовищі.

Метод локації через газ вимагає застосування ефективних акустичних перетворювачів, так як при випромінюванні ультразвукових коливань в газ

через суттєву різницю між акустичними опорами цих середовищ відбувається значна втрата енергії на відображення. Крім того, при локації через газ істотно впливає (на низьких частотах) дифракційна розбіжність, що призводить до значного ослаблення звукового сигналу, що приймається, при великих відстанях.

Іноді для виключення цих втрат використовують випромінювання в трубі, яка одночасно є також і заспокоювачем рівня рідини, що коливається.

При акустичній локації застосовують два варіанти влаштування датчиків: з одним, т.з. зверненим акустичним перетворювачем з функціями та випромінювача та приймача (рис. 1.3, *а*) та з двома 1 і 2 перетворювачами з роздільними функціями (рис. 1.3, *б*).

Застосування одного зверненого перетворювача, що виконує функції випромінювача 1 і приймача 2, вимагає застосування керуючого впливу (блок 5, рис. 1.3, *а*), для перемикання перетворювача з функції випромінювання на функцію прийому акустичної хвилі.

Схема функціонує в такий спосіб.

Пусковим імпульсом від блоку 5 активізується схема збудження випромінювача, яка виробляє серію зондувальних сигналів.

Частота ультразвукових коливань може орієнтовно лежати в діапазоні від 30 до 100 кГц в залежності від типу датчика, а частота повторення пачок імпульсів знаходиться між 14 і 140 Гц.

Тим же пусковим імпульсом блокується вхід підсилювача 4 приймача. Після вимкнення випромінювача приймач переводиться в режим очікування. Відбитий від межі розділу середовищ сигнал сприймається перетворювачем 2 і через блок приймального підсилювача 4 у вигляді аналогового сигналу надходить на блок обробки 5.

Те, що випромінювач і детектор виконані в одному корпусі, забезпечує компактність конструкції датчика і не вимагають складної установки.

Схема з одним перетворювачем має істотний недолік, який полягає в тому, що після випромінювання пачки імпульсів має пройти деякий час, перш ніж мембрана випромінювача заспокоїться та зможе працювати на прийом.

Цей інтервал називається «мертвим» часом датчика. Наявність «мертвого» часу призводить до того, що ультразвукові вимірювачі відстані з однією голівкою мають так звану «сліпу» зону. Це той випадок, коли об'єкт локації перебуває надто близько від перетворювача, відбитий сигнал приходить у вимірювач так швидко, що той не встигає перебудуватися з передачі на прийом і вимірювання рівня, як таке, не відбудеться.

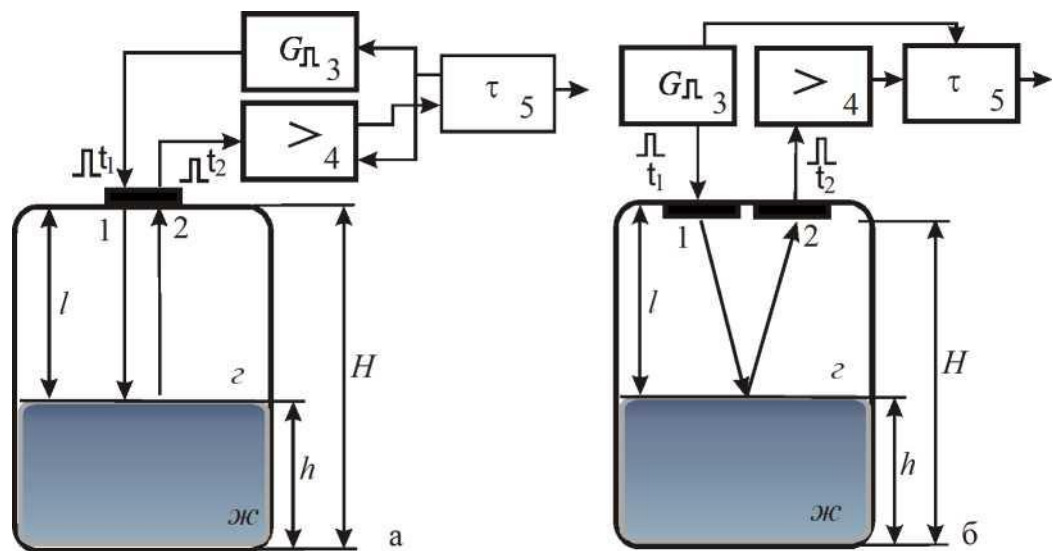


Рис. 1.3. Локаційні акустичні рівнеміри безконтактні:

а - з одним «наверненим» перетворювачем і

б - з двома перетворювачами з роздільними функціями

"Сліпі" зони можуть мати значні розміри. Так, наприклад, межа «сліпої» зони для ультразвукових датчиків фірми Perregrl+Fuchs традиційних конструкцій з діапазонами вимірювання 1 м та 6 м дорівнює 0,2 м та 0,8 м. Це відповідає «мертвому» часу 1 мс та 5 мс.

Шляхом застосування двох роздільних перетворювачів (рис. 1.3 б) на випромінювання і прийом сигналів мінімальна відстань виявлення («сліпа зона») може бути зменшено в порівнянні з випадком використання єдиного зверненого перетворювача. Якщо приймальний перетворювач акустично розділений з випромінюючим перетворювачем, то, практично, відбитий сигнал може бути прийнятий відразу, лише з деякою невеликою затримкою,

яка визначається перехідними процесами в перетворювачах. При цьому слід забезпечити максимальну чутливість схеми за рахунок правильного вибору однієї і тієї ж резонансної частоти для випромінювача та приймача. Обидва перетворювачі можуть розташовуватися в одному корпусі (суміщені перетворювачі) або встановлюватися окремо.

Класичний метод визначення часу проходження УЗ імпульсу ґрунтується на використанні тригерних схем для формування так званих «тимчасових воріт» та підрахунку кількості імпульсів у цузі, що відповідає визначеному часу. При цьому початок вимірюваного інтервалу встановлюється по передньому фронту збудливого імпульсу, а його закінчення визначається в момент рівності опорної напруги та миттєвого значення напруги УЗ імпульсу, що подаються на входи порогового пристрою.

Одна з основних умов нормального функціонування локаційних рівнемірів - певне взаємне положення джерела - приймача ультразвукових коливань і поверхні рівня, що відбиває. Хвилювання поверхні рідини в посудині, нахил судини або датчика - випромінювача можуть призвести до того, що відбитий сигнал або взагалі не потрапить на приймач, або потрапить настільки ослабленим, що не спрацює схеми вимірювання часу. У подібних умовах, як говорилося вище, доводиться вживати спеціальних заходів - розміщувати датчик у заспокійливих камерах, використовувати звукові труби.

На результат контролю можуть надавати небажані сигнали, які відображені від конструктивних елементів, розташованих усередині резервуара. Ефективним засобом застосування інтелектуальних датчиків. Ці пристрої, розроблені спеціально визначення рівня заповнення резервуара, запам'ятовують відбитий сигнал при порожньому резервуарі. При цьому фіксуються всі відображення від технологічного оснащення, вбудованого в резервуар, такий як мішалки, нагрівальні спіралі або аварійні трапи. При зміні рівня заповнення картина відбиття порівнюється з вихідною картиною, отриманої при порожньому резервуарі. "Виявленими" вважаються об'єкти, які не були присутні при попередньому конфігуруванні. Випадкові сигнали перешкод виключаються під час перевірки достовірності.

Проблемою локаційних рівнемірів, що базуються на оцінці часу проходження сигналу, є залежність виміряного часу від швидкості поширення звуку. На швидкість звуку у повітрі впливає ряд факторів, таких як температура, атмосферний тиск, вологість та склад повітряного середовища. Звичайно, для повного обліку всіх цих факторів можна було б використовувати набір датчиків стану повітря і на підставі даних обчислювати швидкість поширення сигналу в повітрі. Насправді досить компенсувати вплив температури, оскільки саме температура має найбільше впливом геть швидкість поширення звуку.

Зазвичай швидкість звуку в робочому середовищі визначається експериментально в процесі градування рівнеміру. Для цього на точно вимірній відстані  $l$  від випромінювача - приймача - встановлюють спеціальний відбивач-репер, а вимірювальну схему доповнюють перемикаючим пристроєм, що дозволяє виводити на індикатор відбитий від нього сигнал. Швидкість звуку визначається як  $c = 2l/\tau$ , де  $\tau$  - час проходження сигналу від випромінювача до відбивача і назад приймач.

Аналогічний принцип використовується і в рівнях з автоматичною компенсацією зміни швидкості поширення звуку. У цих рівнемірах поряд з основним каналом для вимірювання рівня є додатковий *компенсаційний* канал строго фіксованої довжини  $l$  і постійно заповнений речовиною, через яку ведеться локація рівня.

Визначена таким способом реальна швидкість поширення звуку може бути передана через засоби сполучення робочих датчиків або зовнішнього (головного) пристрою обробки інформації.

Використання компенсаційних схем дозволяє суттєво зменшити похибку локаційних рівнемірів.

### 1.3.4. Акустичні кореляційні рівнеміри

Можуть застосовуватися як для рівнемірів "прямого зондування", так і для локаційних рівнемірів.

При вимірі рівня локаційними методами, у тому числі і акустичними, широке використання можуть отримати кореляційні способи вимірювання, коли тимчасове зрушення визначається шляхом обчислення взаємнокореляційної функції двох випадкових процесів, що характеризують положення двох рознесених у просторі точок та визначення положення її максимуму.

Акустичний кореляційний рівнемір - система активного типу (рис.1.4). Генератор зондувальних сигналів 3 і перетворювач 1 є джерелами вихідного акустичного сигналу  $f_1(t)$ , а перетворювач 2 сприймає сигнал  $f_1(1-\tau)$ , відбитий від межі розділу середовищ «газ-рідина».

Сигнали  $f_1(t)$  і  $f_1(1-\tau)$  аналогічні за формою, але мають запізнення відносно один одного. Вихідне положення рівня розділу  $h$  є детермінованою функцією від значення  $\tau$ .

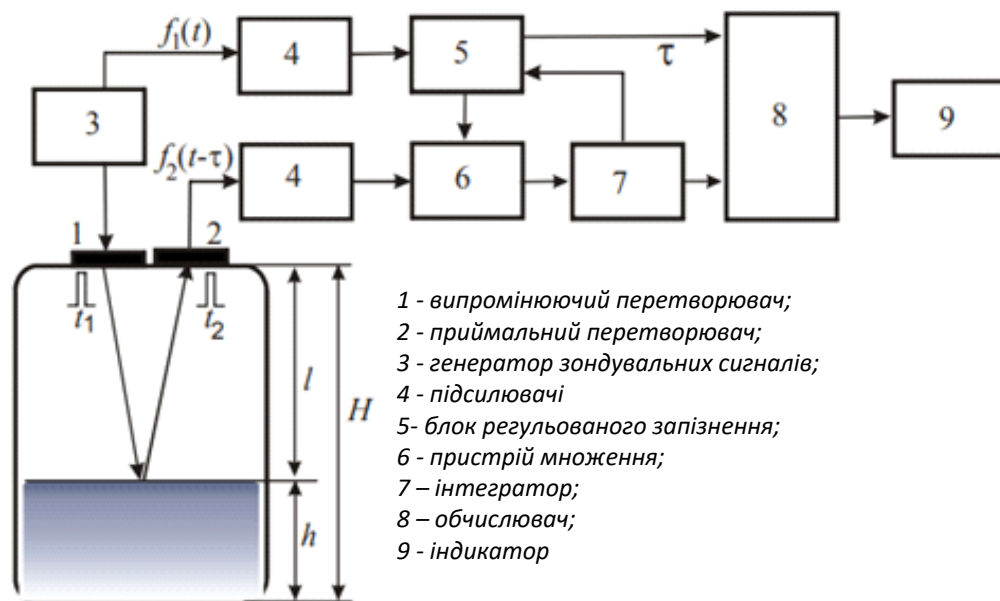


Рис. 1.4. Акустичний кореляційний рівнемір

Саме запізнення  $\tau$  може бути визначено шляхом пошуку максимуму взаємно-кореляційної функції пари вхідних сигналів  $f_1(t)$  та  $f_1(1-\tau)$  шляхом подачі в систему обробки сигналів у режимі реального часу через вхідні пристрої 4-4. Ця процедура виконується за допомогою корелятора, що складається з блоку регульованого запізнення 5, розмножувального пристрою 6 та інтегратора 7. Отримана на виході корелятора взаємно-кореляційна функція вхідних сигналів

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t - \tau) dt$$

має максимальне значення за рівності регульованої затримки та запізнення  $\tau$  сигналів двох перетворювачів. Вочевидь, що  $\tau = 2l/c$ , де  $c$  - швидкість звуку серед.

Шукане значення вимірюваного рівня  $h$  обчислюється і відображається пристроєм 8 і індикатором 9, як  $h = H - l = H - c \tau / 2$ , де  $c$  - швидкість звуку в газовому середовищі і  $\tau$  - значення запізнення. [25], [17].

Кореляційний метод вимірювання, володіючи високою точністю і завадо захищеністю, не вимагає контакту з контрольованим середовищем, не висуває жодних вимог до фізичних властивостей цього середовища і може бути використаний для вимірювання рівня найрізноманітніших об'єктів.

Для однозначного визначення дальності період повторення при випромінюванні імпульсних сигналів має зростати зі зростанням вимірюваної відстані. Тому середня потужність випромінювання знижується, що призводить до погіршення точності вимірювання. Виходом із цього положення є модулювання несучої шумовим або псевдо шумовим сигналами.

### 1.3.5. Акустичні осциляторні рівнеміри

Для акустичних рівнемірів з двома УЗ - перетворювачами можна побудувати частотну схему, охопивши позитивним зворотним зв'язком через підсилювач 3 вихід приймального ультразвукового перетворювача 2 з входом ультразвукового випромінювача 1 (рис. 1.5).

Класичне положення створення генераторних (осциляторних) схем формулюється в такий спосіб.

1. Система, що включає генератор пружних хвиль, з'єднаний з ним твердотільний елемент (середовище для поширення хвиль) і приймач, розташований на відстані, що вимірюється від генератора. Вихідним сигналом є час пробігу вимірюваної відстані пакетом хвиль, народжених генератором.

2. Попередня система, включена в ланцюг зворотного зв'язку підсилювача і службова лінією затримки, в результаті чого контур зворотного зв'язку стає осцилятором (генератором), частота якого змінюється при зміні відстані між генератором пружних хвиль та приймачем.

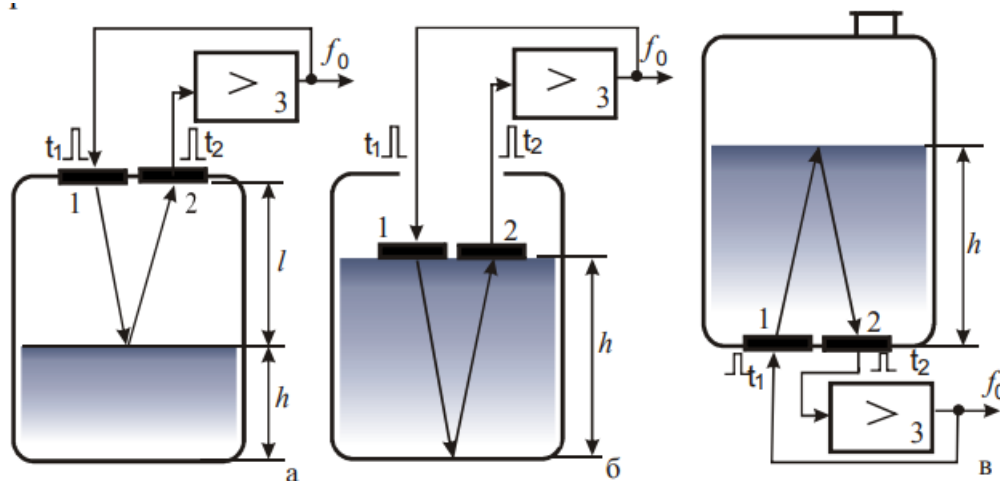


Рис. 1.5. Генераторні (осциляторні) акустичні рівнеміри:

а - з локацією через газове середовище; б і в - з локацією через рідину

Стосовно *акустичної рівнеметрії* генератор пружних хвиль - ультразвуковий, наприклад, п'єзоелектричний випромінюючий перетворювач. Пружне середовище для поширення пружних хвиль - контрольовані газові та рідкі середовища. Приймач ультразвукових хвиль - зворотний п'єзоелектричний перетворювач, розташований на відстані  $2l$  - для схеми «а» і  $L$  - для схем «б» і «в» (рис. 1.5) від випромінюючого перетворювача.

При цьому період вихідного сигналу буде дорівнює часу проходження ультразвукових коливань вимірюваної відстані від перетворювача 1 до

перетворювача 2 з урахуванням швидкості поширення акустичної хвилі в газовій  $C_g$  і рідкій  $C_{ж}$  середовищах. Розрахунок значень рівня йде у відомому порядку.

Застосування перетворювачів з «частотним виходом» мають незаперечні переваги перед перетворювачами з виходом аналоговим [29].

### 1.3.6. Акустичні резонансні рівнеміри

Датчик рівнеміру є трубчастим резонатором (рис. 1.6, а) достатньою для утворення стоячої хвилі довжини  $L$  ( $L$  має бути не менше трьох діаметрів резонатора і забезпечувати необхідний діапазон вимірювання рівня  $H$ ).

Принцип дії резонансних рівнемірів полягає в збудженні коливань стовпа газу над рівнем рідини і у фіксації резонансної частоти, при якій спостерігається виникнення стоячої хвилі.

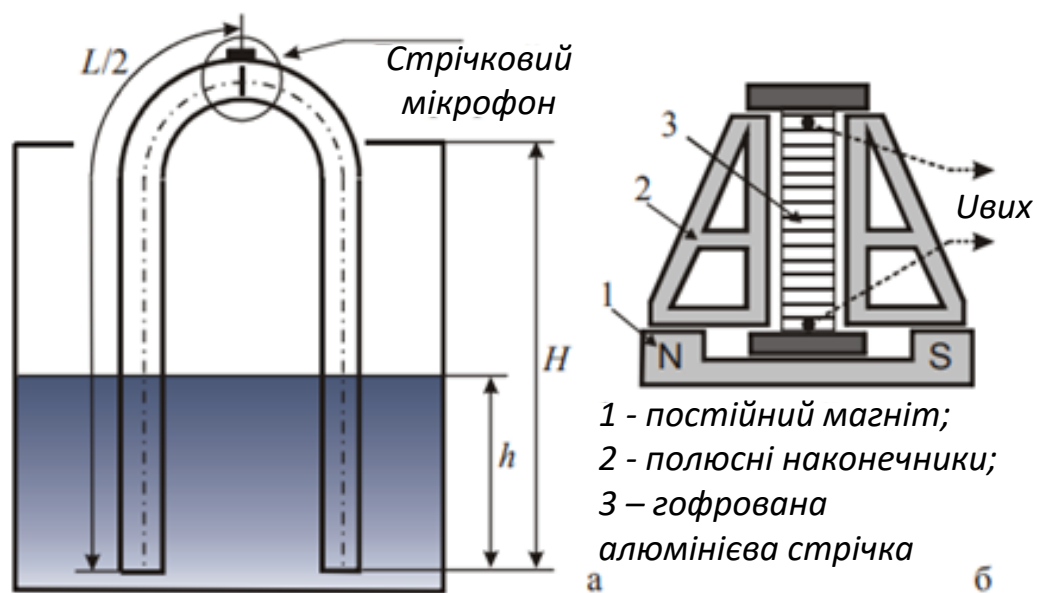


Рис.1.6. Акустичний резонаторний рівнемір (а) та звернений електромагнітний перетворювач - стрічковий мікрофон (б)

Для збудження та прийому акустичних коливань резонатора використовуються магнітоелектричні (електродинамічні) звернені перетворювачі  $M$  - зазвичай стрічковий мікрофон, що володіє унікальними

параметрами, і, перш за все, високою чутливістю. У ньому немає традиційної котушки, та її роль грає тонка гофрована алюмінієва стрічка 3, що у зазорі з магнітним полем. Магнітне поле створюється постійним магнітом 1 та полюсними наконечниками 2 (рис. 1.6, б). Сама стрічка відіграє роль та мембрани. Стрічковий мікрофон відноситься до звернених перетворювачів - поряд з функцією приймача (мікрофона) він може виконувати роль джерела акустичних коливань.

Статична характеристика перетворення резонансних рівнів мір описується формулою

$$f_0(h) = \frac{c}{2(L - 2h)}, \quad (1.3)$$

де  $f_0$  - резонансна частота, що фіксується вимірювальною схемою рівнеміру;  $c$  - швидкість звуку у газовому середовищі.

Основні недоліки розглянутих резонансних рівнемірів - складність і громіздкість конструкції резонатора (особливо при великих діапазонах вимірювань рівня), а також істотний вплив на їх показання змін швидкості з поширення звуку в газовому середовищі.

Акустичний резонансний рівнемір, представлений на рис. 1.7, а має трубчастий резонатор 1 з жорсткими стінками, з глухим верхнім кінцем, відкритий нижній кінець занурений в контрольовану рідину на всю довжину резервуара [29].

Незаповненою залишається довжина газового стовпа  $l$ , що визначає параметри резонатора. Незаповненою залишається довжина газового стовпа  $L$ , що визначає параметри резонатора. Під кришкою всередині резонатора поміщаються випромінювач шумового сигналу 2 і приймач-мікрофон 3, що його сприймає. Акустичний резонансний рівнемір містить також генератор шумового сигналу 4, блок управління 5, блок обробки сигналів 6 і індикатор значення вимірюваного рівня 7.

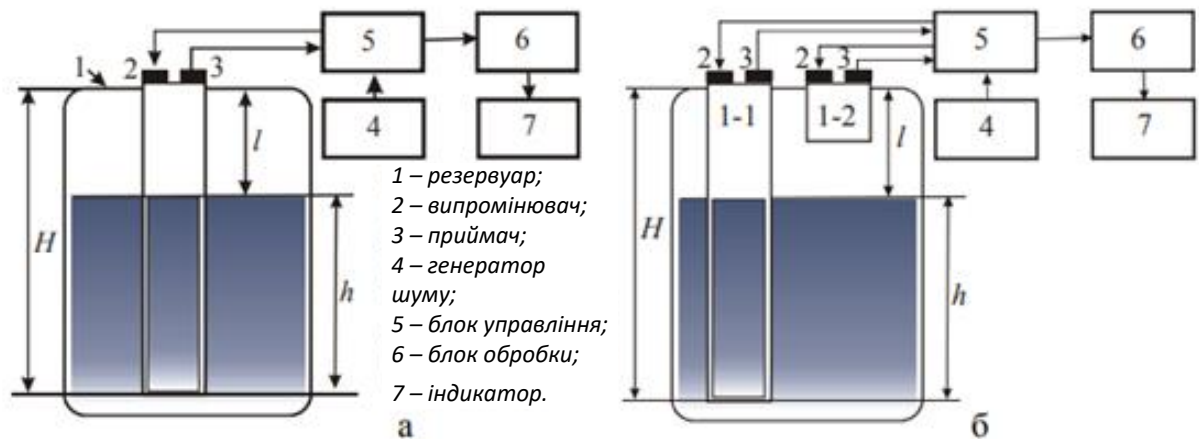


Рис. 1.7. Акустичні резонансні рівнеміри:

а - з одним резонатором та б - з двома резонаторами

Використання окремих випромінюючого 2 і приймального 3 акустичних перетворювачів у поєднанні з подальшим посиленням сигналів дозволяє розширити смугу частот сигналу, що приймається, і поліпшити точність вимірювань. Період резонансних коливань газу в цьому просторі визначається часом проходження звукової хвилі зі швидкістю звуку від одного торця до іншого і назад. Звукові хвилі резонують у верхній порожнині труби, вільної від рідини, що контролюється, а частоти резонансів залежать від її розміру. При довжині вільного простору  $l$  резонансна частота, як на основний, так і на вищих гармоніках може бути записана як  $f_n = cn/2l$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , де  $n$  - номер гармоніки. Вимірюючи значення основної гармоніки  $f_1 = c/2l$ , можна обчислити розмір  $l$  та значення рівня  $h$ :  $l = c/2f_1$ ,  $h = l - c/2f_1$ .

Для ідеального газу швидкість звуку визначається низкою параметрів газового середовища, таких як: тиску, щільності та температури. За інших рівних значення резонансної частоти може бути представлене як,  $f(l) = k\sqrt{T}/l$ , де  $T$  - абсолютна температура газу, а  $k$  - деяка постійна, що враховує теплові властивості газового середовища, молекулярну вагу, її тиск і щільність.

Для усунення температурної похибки ехолокаційні рівнеміри, як правило, оснащуються датчиками температури повітря та електронними

системами коригування значення швидкості звуку. При постійному складі газу в резонаторі таке коригування ефективне і може застосовуватися і в акустичних резонансних рівнемірах. При неконтрольованій зміні складу газу резонаторі виникають додаткові помилки через зміни швидкості звуку у ньому.

Ефективним вирішенням зазначеної проблеми є введення в конструкцію акустичного резонансного рівнеміру додаткового калібрувального резонатора (рис. 1.7 б), порожнину якого заповнена тією ж газовою сумішшю, що і вільна порожнина основного резонатора. У калібрувальному резонаторі збуджується спектральний резонансний звукоряд із основною гармонікою  $f_k l(1) = e/2l_k$ .

У цьому  $c = 2l_k f_{kl}$  та  $h = 1 - l_k f_{kl} / f_1$ .

Такий акустичний резонансний рівнемір називається дворезонаторним. Система обробки сигналів може бути єдиною, що підключається за допомогою комутатора 5 до калібрувального резонатора при необхідності або в регулярному штатно встановленому режимі.

#### **1.4. Застосування методів огинаючих другого і третього порядків для визначення часового положення ехо-імпульсу**

Вимірювання швидкості або часу поширення пружних коливань в середовищі дозволяє отримати інформацію про дальність до будь-якого об'єкта, про рівень рідини або сипучого матеріалу в резервуарах або водоймищах, про фізико-хімічні або механічні властивості середовища і т.д.

Методи вимірювання часу природним чином діляться на імпульсні методи і методи, що використовують безперервні хвилі. Перевагою імпульсних методів є можливість звільнення від стоячих хвиль, а також відділення сигналу від наведень завдяки поділу їх у часі [6].

Похибка вимірювання ультразвукових часо-імпульсних приладів є однією з основних технічних характеристик. Визначення рівня або швидкості поширення пов'язане з необхідністю вимірювання часу запізнення ехо-сигналу щодо зондуючого випромінювання.

$$h = c \frac{t_3}{2}, \quad (1.4)$$

де  $h$  – рівень;  $c$  – швидкість поширення ультразвукових імпульсів;  $t_3$  – час запізнення ехо-сигналу щодо зондувального випромінювання.

Похибка  $\Delta h$  непрямих вимірів залежить від похибок кожного з прямих вимірів величин, що входять до формули (1.4) [2]:

$$\Delta h = \frac{dh}{dc} \Delta c + \frac{dh}{dt} \Delta t_3 = \frac{h}{c_{cp}} \Delta c + c_{cp} \Delta t_3, \quad (1.5)$$

де  $c_{cp}$  – середня швидкість поширення ультразвукових імпульсів.

Похибка складається із суми систематичної та випадкової складових, що входять у вираз (1.5):

$$\Delta h = \Delta h_{cm} + \Delta h_{cl}.$$

Систематичну складову похибки можна компенсувати запровадженням поправки при калібруванні апаратури. Випадкову похибку компенсувати не можна, тому вона визначає і обмежує точність вимірювання. Випадкова складова похибки вимірювання рівня ультразвукових рівнемірів обумовлена неточністю визначення приходу ультразвукового імпульсу.

Момент приходу ультразвукового ехо-імпульсу у зазвичай визначають за допомогою компаратора [6]. Цей метод ґрунтується на використанні порогового елемента (компаратора), що формує імпульс, тривалість якого відповідає часу проходження ультразвукового імпульсу від випромінювача до приймача. Початок імпульсу встановлюється по передньому фронту збудливого імпульсу, закінчення визначається компаратором, на вхід якого надходить ехо-імпульс.

При проходженні через стінки судини і вимірюване середовище ультразвуковий імпульс втрачає багато енергії, і його амплітуда зменшується. У результаті компаратор пропускає кілька періодів коливань ультразвукового імпульсу, амплітуда яких менше його порога спрацьовування (рис. 1.8), і час спрацьовування компаратора не збігається з початком імпульсу.

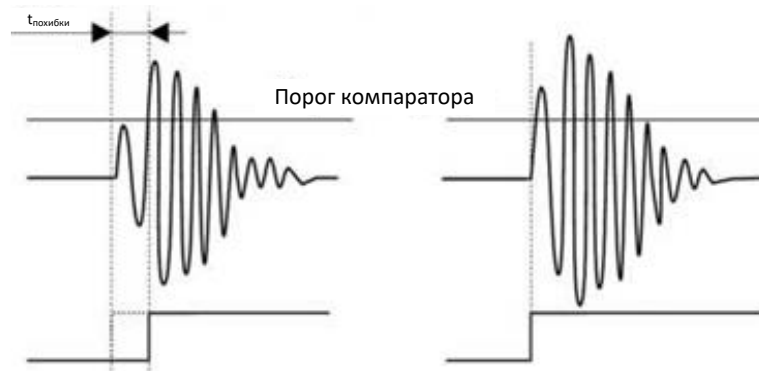


Рис. 1.8. Похибка, обумовлена недостатнім рівнем ехо-імпульсу

Форма та амплітуда ехо-імпульсу має нестационарний характер і залежить від багатьох параметрів. Вона змінюється в залежності від відстані від випромінювача до приймача. Чим менше амплітуда ехо-імпульсу, тим більше періодів коливань буде пропущено компаратором. Це призводить до того, що похибка методу компаратора змінюється залежно від рівня, що вимірюється, і цю похибку неможливо врахувати.

Огинаюча переднього фронту ультразвукового імпульсу зазвичай є монотонно зростаючою функцією. Це дає можливість апроксимувати криву, що огинає, переднього фронту, що описується поліномом другого ступеня

$$s = at^2 + bt + c,$$

де  $s$  - амплітуда огиноючої;  $t$  - час;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - коефіцієнти полінома.

Оскільки форма ехо-імпульсу несиметрична щодо осі  $t$ , то апроксимації фронту використовуються дві криві. Одна крива огинає імпульс за позитивними значеннями, інша - за негативними значеннями (рис. 1.8). Ці криві мають дві загальні точки, одна з яких приймається за початок досліджуваного відлуння-імпульсу.

Для знаходження коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  беруться значення амплітуди ультразвукового імпульсу в трьох точках, відповідних вершин синусоїдального сигналу (екстремумах) у трьох сусідніх періодах. Використовуючи ці дані, складається система рівнянь:

$$\begin{cases} s_1 = at_1^2 + bt_1 + c \\ s_2 = at_2^2 + bt_2 + c, \\ s_3 = at_3^2 + bt_3 + c \end{cases} \quad (1.6)$$

де  $s_1, s_2, s_3$  - значення амплітуди ультразвукового імпульсу в точках екстремумів у моменти часу  $t_1, t_2, t_3$ .

З системи рівнянь (1.6) знаходяться коефіцієнти  $a, b, c$ .

За таким же принципом можна апроксимувати форму переднього фронту імпульсу кривої, що описується поліномом третього ступеня:

$$s = at^3 + bt^2 + ct + d.$$

Поліном третього ступеня в деяких випадках апроксимує загальну переднього фронту ехо-імпульс у з більшою точністю, що дає кращий результат. Для знаходження коефіцієнтів  $a, b, c, d$  складається система із чотирьох рівнянь:

$$\begin{cases} s_1 = at_1^3 + bt_1^2 + ct_1 + d \\ s_2 = at_2^3 + bt_2^2 + ct_2 + d \\ s_3 = at_3^3 + bt_3^2 + ct_3 + d \\ s_4 = at_4^3 + bt_4^2 + ct_4 + d \end{cases} \quad (1.7)$$

Рішення систем рівнянь (1.6) та (1.7) знаходяться за допомогою методу Крамера [4]. Огинають можуть не перетинатися, тому як початок ехо-імпульс у приймається точка найменшої відстані між огинаючими.

На відміну від методу визначення моменту приходу ехо-імпульс у за допомогою компаратора з фіксованим порогом спрацьовування, похибка методів огинаючих другого і третього порядків не залежить від амплітуди ехо-імпульс у, але залежить від його форми.

У реальних умовах на форму ехо-імпульс у істотно впливають перешкоди і шуми, які призводять до помилок при розрахунку рівнянь огинаючих. Щоб зменшити вплив перешкод і шумів на розрахунок, знаходження коефіцієнтів рівняння кривих використали метод найменших

квадратів. Цей метод відрізняється тим, що в у розрахунок береться кількість точок, що перевищує кількість невідомих змінних, і будується усереднена огинаюча по цих точках. Загалом у разі метод найменших квадратів використовується для оцінки невідомих величин за результатами вимірів, що містить випадкові помилки [5].

Коефіцієнти апроксимації знаходяться шляхом розв'язання наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i^2 s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i, \\ \sum_{i=1}^n s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn \end{cases}$$

де  $n$  - кількість точок екстремумів, вибраних для поліноміальної апроксимації; індекс  $i$  – поточний номер експериментальної точки.

Для практичної перевірки запропонованих методів для ехо-імпульс у були побудовані огинаючі другого та третього порядків (рис. 1.5).

Побудова обгинаючих здійснювалася за таким алгоритмом: за допомогою цифрового запам'ятовуючого осцилографа зберігалася осцилограма прийнятого ехо-імпульс у, на якій вибирався певний відрізок часу для пошуку екстремумів. Положення цього відрізка часу визначалося моментом спрацьовування компаратора з фіксованим порогом. Для розрахунку відбиралося п'ять періодів досі спрацьовування і десять періодів після спрацьовування компаратора. Для того щоб виключити з розрахунку точки з амплітудою, що не перевищує рівень шумів (у разі коли початок відрізка знаходиться раніше початку ехо-імпульс у), на обраному відрізку визначався максимум з найбільшою амплітудою, а точки з амплітудою менше 5% від максимуму в розрахунку не враховувалися.

На рис. 1.9 зображений ультразвуковий ехо-імпульс , форма якого апроксимувалась огинаючою другого (рис. 1.9, а) і третього порядків (рис. 1.9,

б). Вертикальною рисою позначено розрахунковий час початку ультразвукового імпульсу.

Для оцінки точності аналізованих методів була отримана експериментальна залежність похибки вимірювання рівня методами компаратора, що огинають другий і третій порядок (рис. 1.9) від відстані  $L$  між випромінювачем і приймачем. В експерименті використовувався круглий металевий хвилевід діаметром 52 мм. Як випромінювач і приймач використовувалися ультразвукові перетворювачі МА40В діаметром 8 мм. Вони розташовувалися в центрі хвилеводу. Частота ультразвукових коливань дорівнює 40 кГц, питома імпульсна потужність випромінювання – 20 Вт/м<sup>2</sup>. Поріг спрацьовування компаратора дорівнює 0,45 і не змінювався в процесі розрахунку.

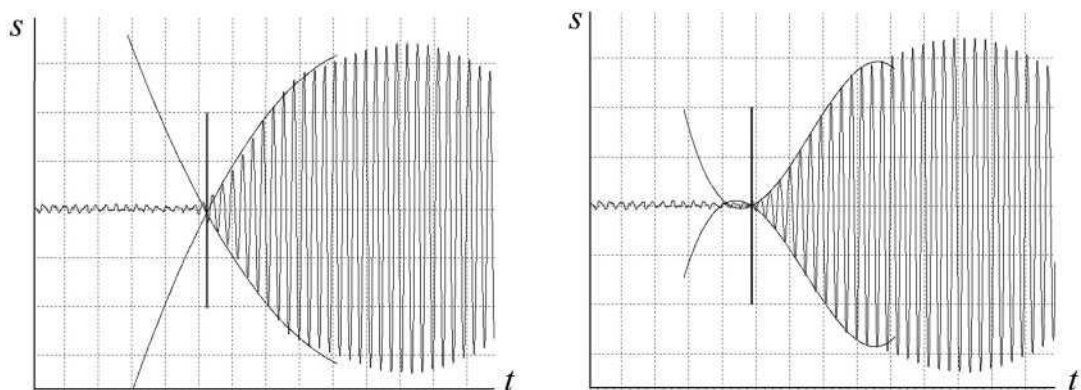


Рис. 1.9. Апроксимація фронту ультразвукового імпульсу огинаючою  
а) другого та б) третього порядків

З рис. 1.10 видно, що систематична похибка зменшилася більш ніж 2 разу, а випадкова - більш як 1,5 разу. Похибки вимірювання дальності при використанні методів огинаючих другого і третього порядків практично не відрізняються, проте трудомісткість розрахунку тимчасового положення ехо-імпульсу значно вища при використанні огинаючої третього порядку.

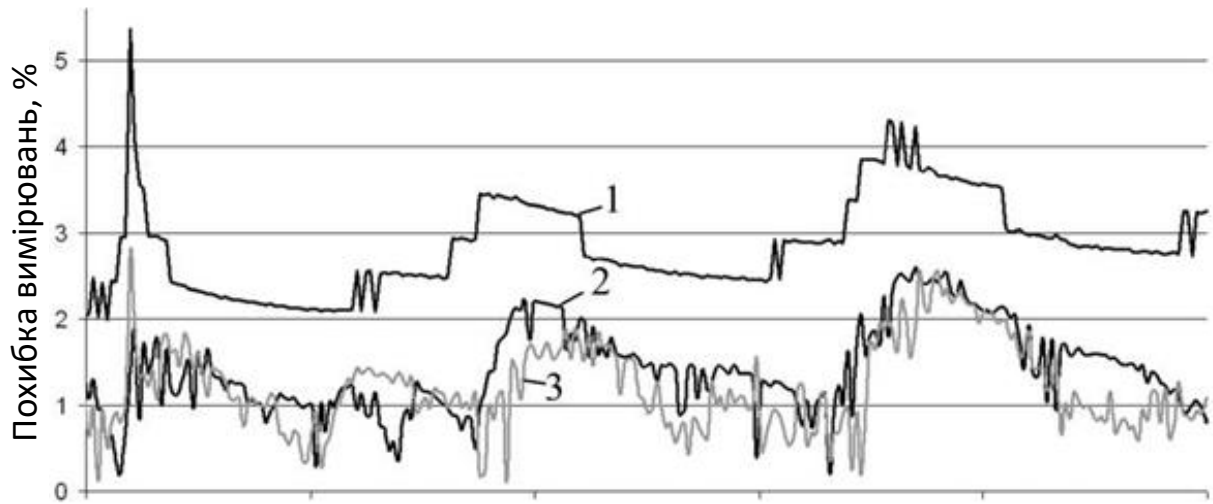


Рис. 1.10. Залежність похибки вимірювання рівня методами:  
1) компаратора, 2,3) огинаючих 2 і 3 порядку від відстані  $L$  між  
випромінювачем та приймачем

Подальші перспективи розвитку методу полягають у визначенні мінімальної частоти оцифрування ехо-сигналу, що не призводить до зниження точності вимірювання, що дозволить знизити вартість реалізації методу другого і третього порядків.

Запропонований метод обробки акустичних імпульсів був використаний в ультразвуковому витратомірі ксенонової суміші. Структурна схема блоку обробки витратоміра наведена на рис. 1.11.

Для визначення початку імпульсу використовувалося по три точки екстремумів для кожної огинаючої. Пристрій працює наступним чином. Блок управління та індикації 1 видає дозвіл на автономну роботу блоку формування адреси 12 і виробляє імпульс запуску ультразвукового генератора 2, цим же імпульсом блок формування часового інтервалу 3 встановлюється в стан логічної одиниці. Генератор 2 збуджує випромінювач 4. Випромінений ультразвуковий імпульс поширюється по контрольованому середовищі і приймається приймачем 5, посилюється підсилювачем 6 і надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача 8. Одночасно сигнал з виходу підсилювача 6 надходить на вхід порогового пристрою 7 (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Структурна схема блоку обробки ультразвукового витратоміра

Як тільки напруга на виході підсилювача 6 перевищить напругу  $U_1$ , вихід порогового пристрою 7 переключиться в логічний стан 1, і скине блок формування часового інтервалу 3 в стан логічного нуля (точка 11 рис. 1.12). Цей сигнал подається на вхід блоку керування та індикації 1 сигналізуючи про закінчення формування часового інтервалу, а також на вхід тригера 10 і вхід блоку затримки 11, на виході тригера 10 з'являється логічна одиниця, яка дозволяє роботу блоку формування адреси 12 і аналого-цифрового перетворювача 8 аналогічно на вхід даних оперативного запам'ятовуючого пристрою 13 і записуються за адресою, сформованою блоком формування адреси 12. Одночасно аналого-цифровий перетворювач 8 видає імпульс блоку формування адреси 12 для формування наступної адреси і за час перетворення

аналого-цифрового перетворювача 8 на виході блоку формування адреси 12 сформується наступний. Після спрацювання блоку затримки 11 на його виході з'являється імпульс, який надходить на блок управління та індикації 1, сигналізуючи про закінчення процесу запису даних, і скидає тригер 10 стан логічного нуля. Нульовий рівень на виході тригера забороняє роботу блоку формування адреси 12 аналого-цифрового перетворювача 8.

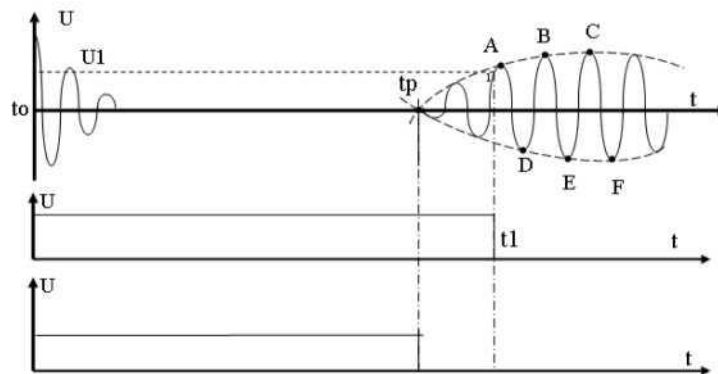


Рис. 1.12. Діаграми роботи ультразвукового витратоміра

Після цього блок управління та індикації 1 здійснює послідовну вибірку даних з оперативного запам'ятовуючого пристрою 13 для визначення точок екстремумів і по цих точках складає систему трьох квадратних рівнянь з трьома невідомими, вирішує її і розраховує час від початку імпульсу до спрацювання компаратора. Облік цього часу дозволив зменшити похибку вимірювання швидкості потоку вчетверо порівняно з традиційним способом.

1. Методи огибаючих другого та третього порядків для визначення моменту приходу ехо-імпульс у акустичного тракту ультразвукового рівнеміру, які дозволяють підвищити точність вимірювання в 1,5...2 рази.

2. Для визначення початку ехо-імпульс у достатньо використовувати огибаючу другого порядку, яка апроксимує фронт з точністю не гірше, ніж огибаюча третього порядку.

## **2. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА**

### **2.1. Розробка структурної схеми**

Система виконує наступні функції:

1. Безперервне точне та надійне вимірювання рівня рідини в резервуарах, що дає можливість оперативно реагувати на зміни рівня та уникати можливих аварійних ситуацій.

2.. Обробка і збереження даних для подальшого аналізу, що включає в себе зберігання історичних даних про рівень рідини для відстеження тенденцій та оцінки ефективності роботи системи.

3. Сигналізація та оповіщення, які інформують операторів про критичні зміни рівня рідини або про несправності в роботі обладнання, що дає можливість своєчасного реагування на потенційно небезпечні ситуації.

4. Зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача для перегляду поточних та історичних даних, налаштування параметрів та управління системою на моніторах або дисплеях.

5. Інтеграція з іншими системами автоматизації виробництва для забезпечення комплексного контролю та управління виробничими процесами.

Було розглянуто декілька моделей мікроконтролерів

1. Arduino Uno R3 є популярною серед початківців завдяки простоті використання та широкій підтримці в спільноті [14]. Вона побудована на базі мікроконтролера ATmega328 і має 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів, 16 МГц кварцовий осцилятор, USB-з'єднання, роз'єм живлення та кнопку скидання.

2. Raspberry Pi Pico використовує власний мікроконтролер RP2040 [15]. Вона має двоядерний процесор ARM Cortex-M0+ з тактовою частотою до 133 МГц, 264 КБ SRAM та підтримку USB. Завдяки своїй високій продуктивності та низькій ціні Raspberry Pi Pico підходить для створення складних проектів, що потребують великої обчислювальної потужності.

3. ESP8266 та ESP32 (компанії Espressif) підходить для проєктів Інтернету речей (IoT) [16]. ESP8266 має вбудований Wi-Fi модуль, що дозволяє легко підключати пристрої до мережі, а ESP32 додатково підтримує Bluetooth.

4. STM32 від STMicroelectronics побудовані на базі ядра ARM Cortex і мають спектр можливостей від простих 32-бітних моделей до високопродуктивних багатоядерних систем [17]. Мають високу надійність та продуктивність, широко використовується в промислових та комерційних проєктах.

5. PIC мікроконтролери від Microchip мають високу надійність та багатофункціональність і використовуються у багатьох застосуваннях від простих побутових приладів до складних промислових систем [18].

Для даної системи було обрано мікроконтролер Atmega328 (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Мікроконтролер Atmega328

Технічні характеристики Atmega328 Arduino Nano:

- Процесорне ядро: AVR, частота до 16 МГц
- Пам'ять: 32 КБ флеш, 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM
- Живлення: 5 В, споживання до 20 мА

- Інтерфейси: 1 UART, 1 SPI, 1 I2C, 14 GPIO
- Аналогові входи: 6 каналів 10-розрядного АЦП
- Таймери: 3 таймери (два 8-розрядних, один 16-розрядний)

Це робить Atmega328 ідеальним вибором для розробки системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва, забезпечуючи надійність, точність та зручність використання.

Структурна схема вимірювальної системи наведена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Структурна схема вимірювальної системи

## 2.2. Вибір датчика рівня рідини

### *Ультразвуковий датчик вимірювання відстані HC-SR04*

Часто необхідно швидко і досить точно виміряти відстань від спостерігача до деякого об'єкта [19]. Пристрої, розроблені на вирішення таких завдань, називаються далекомірами. Області застосування таких пристроїв є широкими: від робототехніки до систем моніторингу складних інженерних конструкцій.

Умовно, далекоміри можна розділити на активні:

- звуковий;

- світловий;
- лазерний та ін. і пасивні:
- далекоміри, які використовують оптичний паралакс;
- далекоміри, що використовують зіставлення об'єкта будь-якому зразку, наприклад, нитяний далекомір та ін.

Принцип дії далекомірів активного типу однаковий для всіх пристроїв і полягає у вимірі часу, протягом якого сигнал проходить відстань від передавача до приймача. Причому швидкість поширення сигналу (швидкість світла, звуку тощо) вважається відомою.

Далекоміри звукового типу є найдешевшими і найпоширенішими з усіх, які можна підключити до мікроконтролера. Розглянемо ультразвуковий далекомір IC-ВР04.

Ультразвуковий далекомір – пристрій, призначений визначення відстані від датчика до об'єкта. В основі принципу вимірювання лежить ехо-локація, як у дельфінів або кажанів. Датчик складається з передавача, що генерує ультразвукові хвилі, приймача, який приймає відлуння, та додаткових схем для забезпечення роботи модуля.

Ультразвуковий далекомір HC-SR04 представлений на рис. 2.3, де передавач (*transmitter*) та приймач (*receiver*), позначені Г і R відповідно.



Рис. 2.3. Ультразвуковий далекомір HC-SR04

Далекомір генерує звукові хвилі на частоті 40 кГц. Після того, як ці хвилі відбиваються від об'єкта і повертаються на приймач, датчик видає

інформацію про час, витрачений на проходження звуку від датчика до об'єкта і назад. Наочно цей процес показано на рис. 2.4.

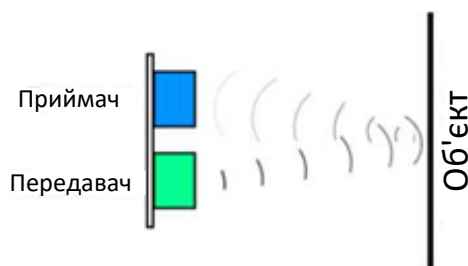


Рис. 2.4. Рух ультразвукового сигналу від передавача до приймача

Ультразвуковий сигнал поширюється широко направленою хвилею  $30^\circ$ . Напрямок поширення ультразвукового сигналу з передавача показано на рис. 2.5. Найефективніший кут виміру  $15^\circ$ . Сторонні об'єкти, які підпадають під цей кут вимірювання, можуть збивати показання датчика.

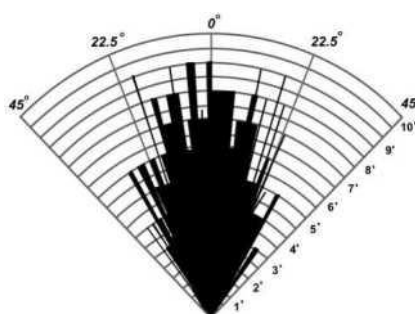


Рис. 2.5. Діаграма спрямованості ультразвукової хвилі

На показання ультразвукових далекомірів не впливають засвічення від сонця або колір об'єктів, як це відбувається з інфрачервоними датчиками. Ультразвукова хвиля відбиватиметься практично від будь-яких поверхонь, навіть прозорих, але можуть виникнути труднощі з визначенням відстані до пухнастих або дрібних предметів.

Також на показання впливає кут падіння хвилі. Якщо датчик спрямований перпендикулярно до об'єкта, то вимірювання будуть найбільш точними. А якщо кут падіння буде занадто великим, то хвиля, відбившись від об'єкта, не потрапить у приймач, що призведе до невірного виміру.

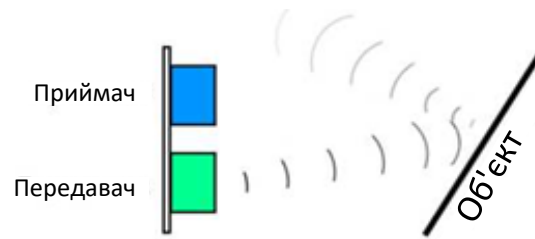


Рис. 2.6. - Рух ультразвукового сигналу від передавача до приймача під кутом

Датчик видає імпульс певної тривалості і подальші розрахунки необхідно проводити в мікроконтролері.

Розрахунок відстані відбувається на підставі отриманого часу і обчислюється за формулою:

$$S = vt; \quad t = T / 2 \Rightarrow S = vT / 2, \quad (2.1)$$

де  $v$  - швидкість звуку ( $\approx 340$  м/с);

$t$  - час руху хвилі від датчика до об'єкта.

$T$  - час руху хвилі від датчика до об'єкта та назад.

Поділ на два потрібно через те, що сигнал проходить відстань до об'єкта та назад, тоді коли потрібна лише відстань до об'єкта. Для вимірювання тривалості сигналу пропонується використовувати таймер. Таймер налаштовується у такий спосіб, що 1 розряд дорівнює 0,000001 с. Отже, формула виглядатиме так:

$$S = vT / 2 \Rightarrow S = vT_{im} \cdot 10^{-6} / 2, \quad (2.2)$$

де  $T_{im}$  - кількість відліків таймера до мкс.

Остаточна форма виглядатиме таким чином:

$$S = 340 \cdot T_{im} 10^{-6} / 2 = 170T_{im} / 10^6. \quad (2.3)$$

Для того, щоб перевести цю відстань у см, помножимо на 100.

$$S_{cm} = 17T_{im} / 10^3, \quad (2.4)$$

В результаті можна розрахувати відстань до об'єкта в сантиметрах:

$$S_{cm} = 0.017 \cdot T_{im}. \quad (2.5)$$

Однак у мікроконтролері не передбачені операції над числами з плаваючою точкою. Тому для обчислення відстані необхідно використати формулу (2.4). Або замінити число 0,017 на взаємно зворотне:

$$S_{cm} = T_{im} / 58.8, \quad (2.6)$$

Формулу (2.6) можна знайти в документації, але із заокругленням до 58.

Наведених формул цілком достатньо для коректного виміру відстані, проте якщо є необхідність покращити точність виміру, потрібно врахувати ряд факторів.

По-перше, бажано враховувати температуру навколишнього середовища, в якому виробляються виміри. Це пов'язано з тим, що швидкість звуку в газах збільшується з підвищенням температури. При підвищенні температури повітря на  $1^{\circ}\text{C}$  швидкість звуку в ньому збільшується на  $0,6 \text{ м/с}$ . Графік залежності швидкості звуку від температури наведено на Рис. 2.7, а у Табл. 2.1 наведено деякі значення.

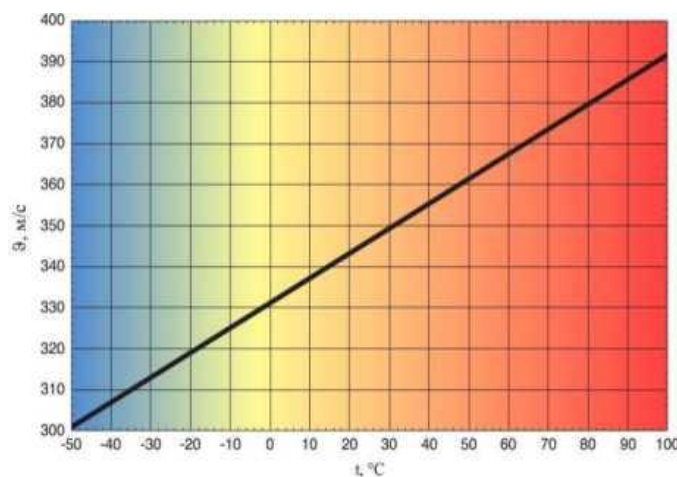


Рис. 2.7. Залежність швидкості звуку від температури

Таблиця 2.1 - Швидкість звуку за певної температури

|                     |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t, ^\circ\text{C}$ | -20   | -10   | 0     | 10    | 20    | 30    |
| $V, \text{v/c}$     | 318,8 | 325,1 | 331,5 | 337,3 | 343,1 | 348,9 |

Щоб мати можливість оперативно підлаштовуватись під зміну температури навколишнього середовища, можна додати в систему вимірювання температурний датчик та використовувати його результати вимірювань. На деяких далекомірах передбачені температурні датчики.

По-друге, необхідно врахувати траєкторію поширення сигналу. З геометричної точки зору, знаходження відстані від датчика до об'єкта вимірювання є знаходженням висоти рівнобедреного трикутника « $h$ », Рис. 6. Однак варто зауважити, що за формулою (2.5) або (2.6) обчислюється довжина « $a$ ».

Для знаходження висоти « $h$ » звернемося до теореми Піфагора:

$$h^2 = a^2 - (b/2)^2, \quad (2.7)$$

де  $h$  - відстань від датчика до об'єкта (висота рівнобедреного трикутника);

$a$  - відстань, пройдена звуковою хвилею від передавача до об'єкта або від об'єкта до приймача (бічна сторона);

$b$  - відстань від передавача до приймача (основа), для HC-SR04  $b = 3$  см.

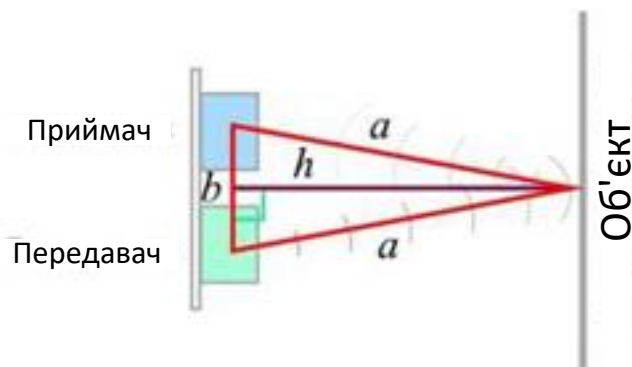


Рис. 2.8. Геометричне уявлення поширення звукової хвилі

Оскільки основа «*b*» досить мала, вона чинитиме значний вплив при малих значеннях «*a*», тобто, при вимірі малих відстаней. Для прикладу візьмемо за «*h*» мінімально і максимально можливі відстані вимірювання датчика, це 2 см і 400 см.

При  $h = 2$  см отримуємо:

$$a = \sqrt{2^2 + 3^2 / 4} = \sqrt{4 + 2.25} = 2.5$$

При  $h = 400$  см:

$$a = \sqrt{400^2 + 3^2 / 4} = \sqrt{160000 + 2.25} = 400.0028$$

Виходячи з розрахунків, маємо: при вимірі реальних 2 см до об'єкта, датчик покаже 2,5 см (похибка 25%), а при вимірі 400 см похибка становитиме лише 0,0007%. Для компенсації цієї похибки, знайдену за формулою (6) відстань необхідно перетворити на реальну:

$$S_{hcm} = \sqrt{S_{cm}^2 - 2.25},$$

В цьому випадку виходить заявлена точність 0,3 мм.

Крім HC-SR04 існують інші ультразвукові датчики. Однак їх відмінності незначні. Кожен, оснащений передавачем та приймачем, мають ідентичний принцип вимірювання, фізичні розміри пристроїв практично однакові. Різними є такі параметри як: максимально можлива відстань виміру, точність. Деякі датчики підтримують спеціалізовані інтерфейси для сполучення.

Розглянемо деякі з них.

Ультразвуковий датчик HY-SRF05 [20], дорожча покращена модель, порівняно з HC-SR04. Основна відмінність, як заявляє виробник, максимально можлива відстань виміру - 450 см. Крім того, на платі додано ще один вивід "OUT".



Рис. 2.9. Ультразвуковий далекомір HY-SRF05

Ультразвуковий датчик *US-015* [21], як заявляє виробник, виконує вимірювання з більшою точністю, ніж *HC-SR04*. Крім того ціна на цей пристрій трохи вища, тому що датчик менш популярний. Точність у різних джерелах вказується як 0,1 мм або 0,3 мм. Розташування виводів, таке саме, як і в *HC-SR04*. Схожість характеристик датчиків робить їх взаємозамінними.



Рис. 2.10. Ультразвуковий далекомір US-015

Ультразвуковий далекомір *URM37* [23] дає можливість підключення по ряду інтерфейсів: *Serial* або *PWM*, *TTL* або *RS232*. Також передбачені різні режими роботи: визначення відстані на запит або постійне сканування. Крім того, на платі встановлено датчик вимірювання температури, який використовується для коригування показань вимірювання далекоміра, як говорилося раніше, швидкість звуку при різних температурах навколишнього середовища різна.



Рис. 2.11. Ультразвуковий далекомір *URM37*

Крім розглянутих датчиків, існують спеціалізовані модулі, які, працюючи у парі з ультразвуковим далекоміром, розширюють функціональні можливості системи. Наприклад, модуль *RCW 0012* [23], представлений на рис. 2.12 самостійно виконує всі необхідні обчислення, тим самим втрачається необхідність у підключенні мікроконтролера *STM32* або будь-якого іншого. А вбудований у модуль три розрядний семи сегментний індикатор дозволяє відразу відображати відстань до об'єкта в сантиметрах. Основою плати є мікроконтролер *STC 11f-04e*. На платі є роз'єм на 4 контакти, в якій встановлюється ультразвуковий модуль.



Рис. 2.12. Модуль *RCW 0012*

Ще один модуль, який здатний виконати ці завдання, – це *DYP-ME008*. Паралельно, розробники випустили власний ультразвуковий датчик *DYP-ME007* [24], припускаючи їхню спільну роботу. Зв'язка цих двох пристроїв представлена на рис. 2.13.



Рис. 2.13. Модуль *DYP-ME008* та ультразвуковий далекомір *DYP-ME007*

Порівняння характеристик цих ультразвукових датчиків та деяких інших наведено у табл. 2.2.

Модуль *Octasonic 8 x HC-SR04 Ultrasonic Breakout Board*, який є приватною розробкою «*Super Awesome Robots!*», дозволяє використовувати декілька ультразвукових датчиків одночасно в одній системі. Розробник пропонує використовувати свій пристрій як незвичайний синтезатор [25].



Рис. 2.14. Модуль *Octasonic 8 x HC-SR04 Ultrasonic Breakout Board*

Оскільки ультразвуковий далекомір часто використовують, як «зір» роботів, наступний важливе питання, кріплення модуля на об'єкт. Для цих цілей у продажу є спеціалізовані корпуси. Для забезпечення можливості повороту ультразвукового модуля, існують кріплення для з'єднання із сервоприводом, рис. 2.15.

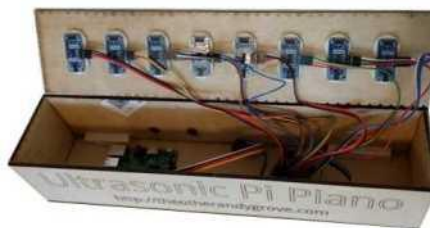


Рис. 2.15. Вісім датчиків *HC-SR04* підключених до модуля *Octasonic 8 x HC-SR04 Ultrasonic Breakout Board* вмонтовані у дерев'яний корпус

Таблиця 2.2 - Порівняльна таблиця характеристик ультразвукових датчиків

|                               | HC-SR04  | HY-SRF05 | US-015   | US-100   | URM37   | GH-311   | DYP-ME007 |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|-----------|
| Напруга живлення, В           | +5       | +5       | +5       | +5       | +5      | +5       | +5        |
| Споживання в режимі тиші, мА  | 2        | 2        | 2,2      | 2        | -       | -        | -         |
| Споживання при роботі, мА     | 15       | 15       | 20       | 15       | 20      | -        | -         |
| Діапазон вимірювання, см      | 2 - 400  | 2 - 450  | 2 - 400  | 2 - 450  | 2 - 500 | 2 - 300  | 2 - 500   |
| Ефективний кут вимірювання, ° | 15       | 15       | 15       | 15       | 15      | 15       | 15        |
| Частота ультразвука, кГц      | 40       | 40       | 40       | 40       | 40      | 40       | 40        |
| Точність, мм                  | 0,3      | 0,3      | 0,1+1%   | 0,1      | 1       | -        | 0,3       |
| Габарити, мм                  | 45x20x15 | 45x20x15 | 45x20x12 | 44x26x14 | 51x22   | 46x20x18 | 45x20x15  |
| Середня ціна, грн             | ≈ 25     | ≈ 35     | ≈ 40     | ≈ 75     | ≈ 500   | ≈ 260    | ≈ 120     |

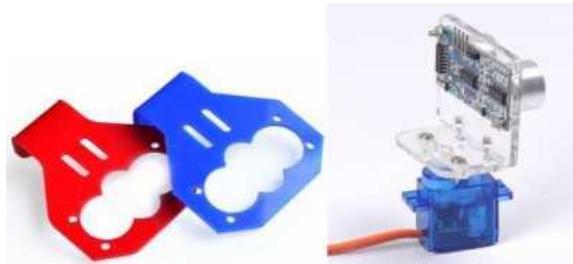


Рис. 2.16. Кріплення для ультразвукового модуля

Можна зробити наступні висновки:

- Ультразвуковий далекомір *IC-BP04* є добрим і дешевим модулем для вимірювання відстані, порівняно з його аналогами.
- Процес вимірювання досить простий та зрозумілий, а сполучення датчика та мікроконтролера не потребує спеціалізованих інтерфейсів.
- На точність вимірювань впливає безліч факторів, які необхідно враховувати. Це температура навколишнього середовища, траєкторія поширення сигналу, кут падіння хвилі, форма та розмір об'єкта. Однак навіть з урахуванням усіх похибок не вдалося досягти точності, заявленої розробником.
- За необхідності максимально точних вимірювань слід використовувати лазерні далекоміри. А ультразвукові краще підходять, наприклад, як датчики руху на невеликих дистанціях або як «зір» робота для знаходження об'єктів навколо себе.
- Існують модулі, розроблені спеціально для ультразвукових датчиків. Використання цих модулів дозволяє працювати з датчиками без підключення мікроконтролера, оскільки можуть самостійно проводити обчислення та відображати результати.

При використанні будь-яких датчиків слід пам'ятати загальні правила їх вибору та застосування [13]. Використання ультразвукових датчиків дуже актуально розробки рухомих роботів [14-25].

### 2.3. Вибір звукового модуля

Для звукової індикації у системах контролю рівня рідини часто використовують прості звукові модулі, такі як п'єзо динаміки або активні зумери, наприклад активний зумер (рис.2.17) [26].



Рис.2.17 Активний зумер

#### Переваги активного зумера

1. Простота використання, для активації зумера достатньо подати живлення, не потребує зовнішніх генераторів сигналу.
2. Сумісність з Arduino: легко інтегрується з мікроконтролером Atmega328 на платформі Arduino.
3. Низьке енергоспоживання, що важливо для автономних систем.
4. Доступність: активні зумери є недорогими і широко доступними на ринку.

## 2.4. Вибір індикації

Чіткість та зручність відображення інформації LCD-дисплей 16x2 (рис. 2.18) дозволяє чітко і зрозуміло відображати текстову інформацію на двох рядках по 16 символів [27]. Це забезпечує легке сприйняття інформації про рівень рідини та інші параметри системи.

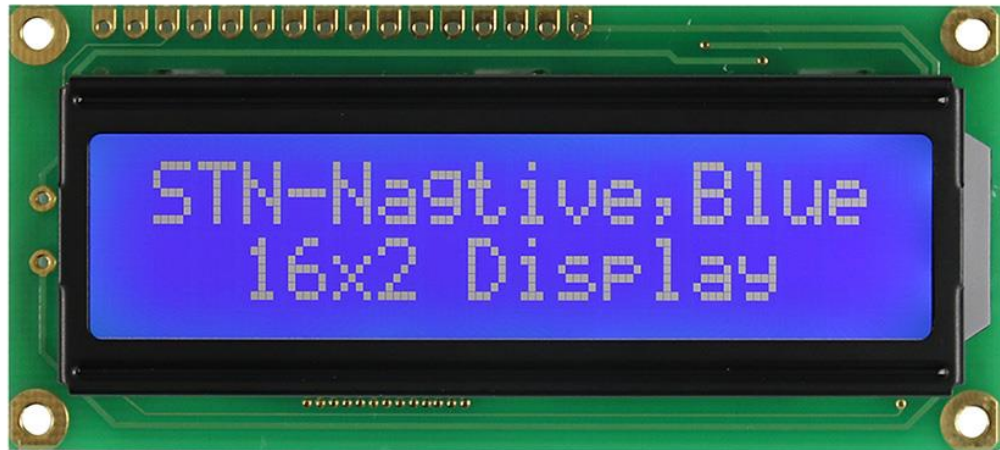


Рис. 2.18. LCD-дисплей 16x2

Наявність підсвітки дозволяє використовувати дисплей у різних умовах освітлення, включаючи темні приміщення. Це важливо для виробничих умов, де рівень освітлення може змінюватися.

LCD-дисплей 16x2 легко інтегрується з мікроконтролером завдяки стандартним інтерфейсам, таким як I2C або паралельний інтерфейс, що спрощує процес підключення і зменшує кількість необхідних з'єднань.

LCD-дисплеї 16x2 є відносно недорогими порівняно з іншими типами дисплеїв, такими як OLED або TFT, що дозволяє знизити загальну вартість системи без втрати функціональності.

LCD-дисплеї можуть працювати протягом тривалого часу без суттєвих збоїв або необхідності заміни, що важливо для безперервної роботи у виробничих умовах .

Дисплей дозволяє відображати не тільки стандартні символи, але і спеціальні, що можуть бути створені користувачем, що дає можливість адаптувати відображення під специфічні потреби системи.

## 2.5. Розробка принципової схеми

Atmega328 - це 8-розрядний мікроконтролер, заснований на архітектурі AVR, широко використовується в проектах з мікроелектроніки, автоматизації та вбудованих систем. Це компактний і потужний модуль, який поєднує простоту використання з достатньою потужністю для більшості завдань, що робить його популярним вибором для хобістів і професійних розробників. Для роботи Atmega328 було обрано плату Arduino Nano [28].

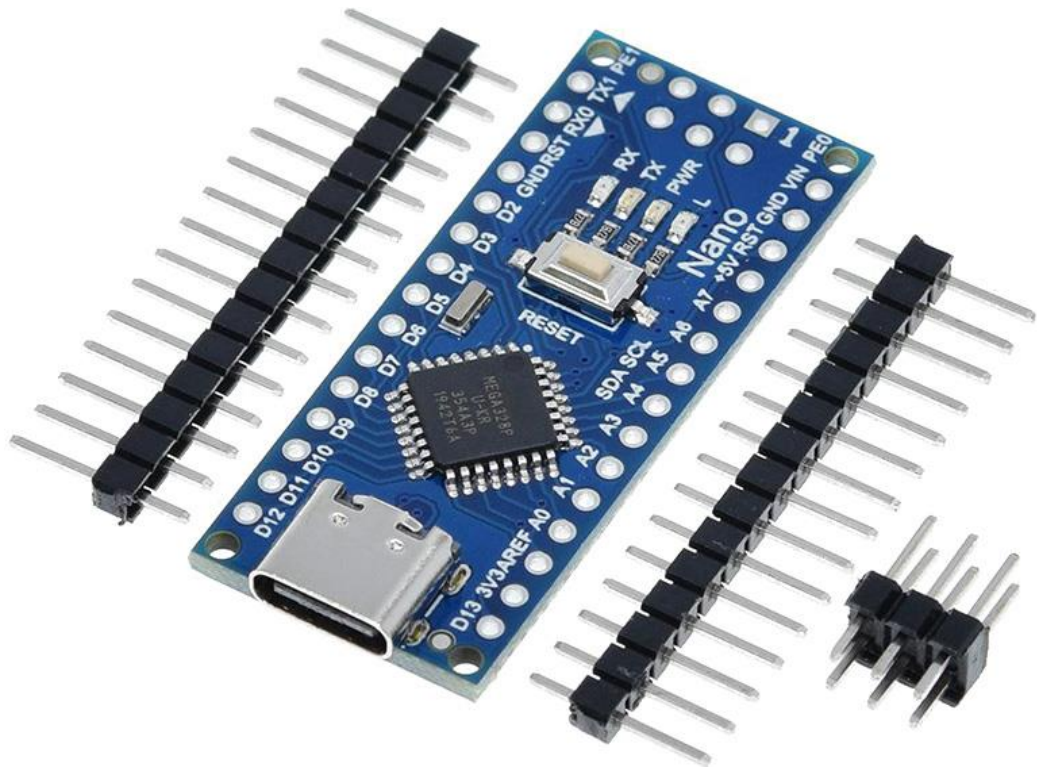


Рис. 2.19. Мікроконтролер Atmega328 на платі Arduino Nano

Технічні характеристики Arduino Nano (Atmega328)

Процесорне ядро:

1. Ядро: AVR

2. Частота: до 16 МГц
3. Архітектура: RISC (Reduced Instruction Set Computing)

Пам'ять:

1. Вбудована флеш-пам'ять: 32 КБ
2. Оперативна пам'ять SRAM: 2 КБ
3. EEPROM: 1 КБ

Живлення:

1. Напруга живлення: 5 В (працює і від 7-12 В через роз'єм живлення)
2. Споживана потужність: до 20 мА (у режимі активності)

Інтерфейси:

1. UART: 1
2. SPI: 1
3. I2C: 1
4. GPIO: 14 (з них 6 підтримують PWM)
5. АЦП: 6 каналів 10-розрядного АЦП

Таймери:

1. Загальна кількість таймерів: 3 (два 8-розрядних, один 16-розрядний)

Аналогові периферійні пристрої:

1. 10-розрядний АЦП: 1 (6 каналів)
2. Аналогові компаратори: 1

Робочі умови:

1. Температурний діапазон: -40°C до +85°C
2. Корпус: TQFP-32

Інші функції:

1. Watchdog таймер
2. Програмування через ISP (In-System Programming)

Датчик рівня рідини HC-SR04 – ультразвуковий датчик, який може бути ефективно використаний для вимірювання рівня рідини в резервуарах.



Рис. 2.20. Ультразвуковий датчик HC-SR04

#### Технічні характеристики HC-SR04

1. Робоча напруга: 5 В
2. Робочий струм: 15 мА
3. Кут огляду: Менше 15°
4. Діапазон вимірювання: 2 см - 400 см
5. Точність:  $\pm 3$  мм
6. Частота ультразвуку: 40 кГц
7. Інтерфейс: Два пін: Trigger (тригер) і Echo (відлуння)
8. Час затримки: 10 мкс (тригер) / 100 мс (відлуння)
9. Робоча температура: -15°C до +70°C

Активний зумер є електромеханічним пристроєм, який використовується для генерації звуку. Він має вбудований генератор сигналу, що дозволяє йому видавати звук при подачі на нього постійного струму.

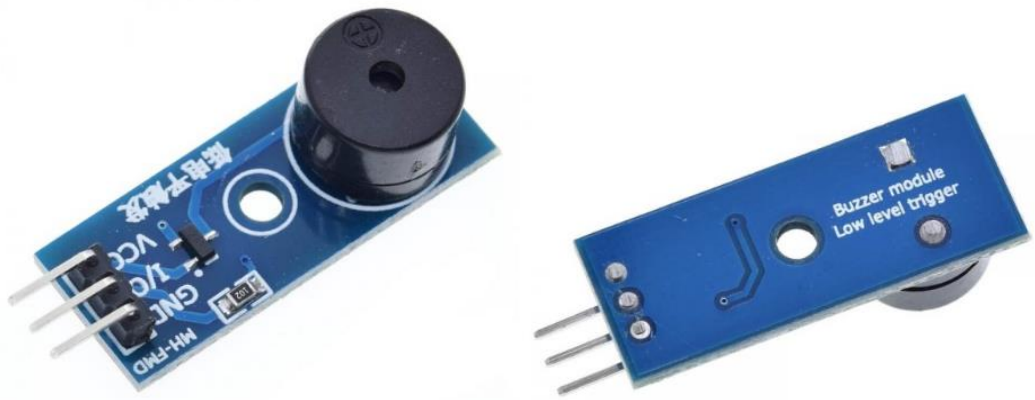


Рис.2.21. Активний зумер

Технічні характеристики активного зумера

Робоча напруга: 3.3 В – 5 В

Робочий струм: 10 мА – 30 мА

Частота: 2 кГц – 4 кГц

Гучність: 85 дБ – 95 дБ (на відстані 10 см)

Розміри: Діаметр близько 12 мм, висота близько 9 мм

Температурний діапазон: -20°C до +60°C

Тип: Активний (з вбудованим генератором сигналу)

Для управління системою за допомогою мікроконтролера часто використовуються кнопки різних типів, включаючи тактові кнопки (Tactile Push Button) через їх простоту використання і надійність [29]. Такі кнопки мають малий розмір і чітке тактильне відчуття при натисканні.

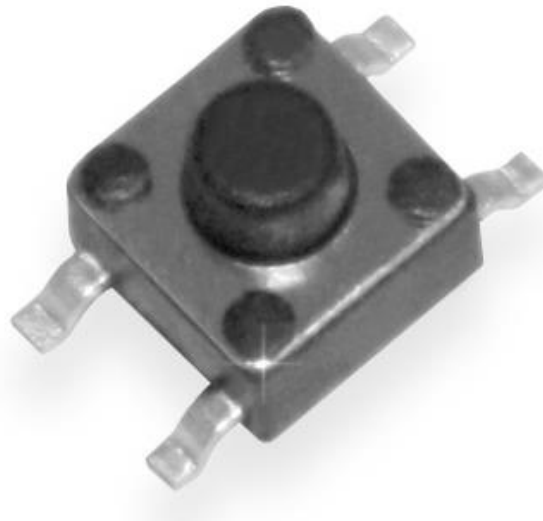


Рис. 2.22. Тактові кнопки (Tactile Push Button)

Основні технічні параметри для вибору кнопок:

- Розмір: 6 мм x 6 мм або 12 мм x 12 мм (залежно від вимог до простору і зручності).
- Номінальна напруга: 3.3V або 5V, сумісні з логічними рівнями STM32.
- Номінальний струм: до 50 мА, що забезпечує достатню надійність і довговічність.

Схема підключення кнопок

Для підключення кнопок до мікроконтролера, використовується простий резистивний дільник для забезпечення стабільного сигналу. Кожна кнопка підключається до одного з цифрових входів мікроконтролера, а також через резистор до землі (GND) для утворення так званого "pull-down" контуру.

LCD-дисплей 16x2 (16 символів на 2 рядки) – це широко використовуваний рідкокристалічний дисплей, він став стандартом у багатьох додатках для відображення інформації.

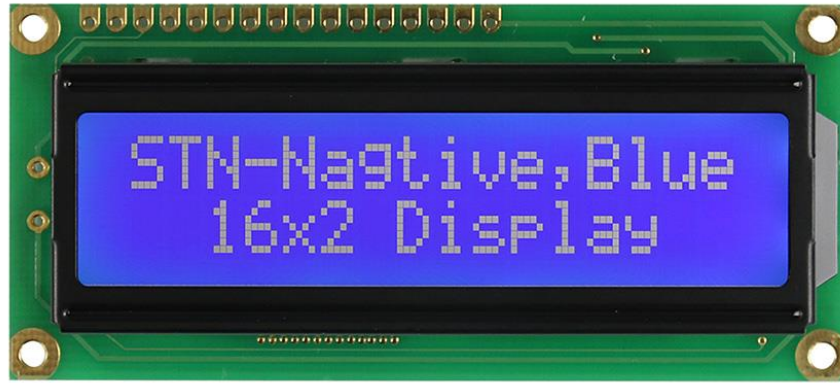


Рис. 2.23. LCD-дисплея 16x2

### Технічні характеристики LCD-дисплея 16x2

#### Фізичні параметри

- Розміри дисплея: приблизно 80 мм x 36 мм.
- Розміри видимої області: приблизно 66 мм x 16 мм.
- Кількість символів: 16 символів на рядок, 2 рядки.

#### Електричні параметри

- Напруга живлення: 5 В постійного струму (DC).
- Споживаний струм: 1-2 мА (без підсвічування), до 30 мА (з підсвічуванням).
- Рівень логічного сигналу: TTL сумісний.

#### Інтерфейси

- Паралельний інтерфейс: 4-бітний або 8-бітний.
- Підключення: 16-контактний роз'єм (піновий роз'єм).

#### Функціональні можливості

- Контролер: HD44780 або сумісний.
- Підтримувані символи: Стандартні ASCII символи, можливість визначення користувацьких символів.
- Підсвічування: світло діодне, зазвичай з синім або зеленим кольором фону.

#### Робочі умови:

- Температурний діапазон: 0°C до +50°C.
- Вологість: до 90% (без конденсації).

Інші параметри

- Контраст: регульований потенціометром.
- Режими роботи: 8-бітний або 4-бітний режим для зменшення кількості використовуваних портів мікроконтролера.

Принципова електрична схема комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва наведена на рис. 2.24.

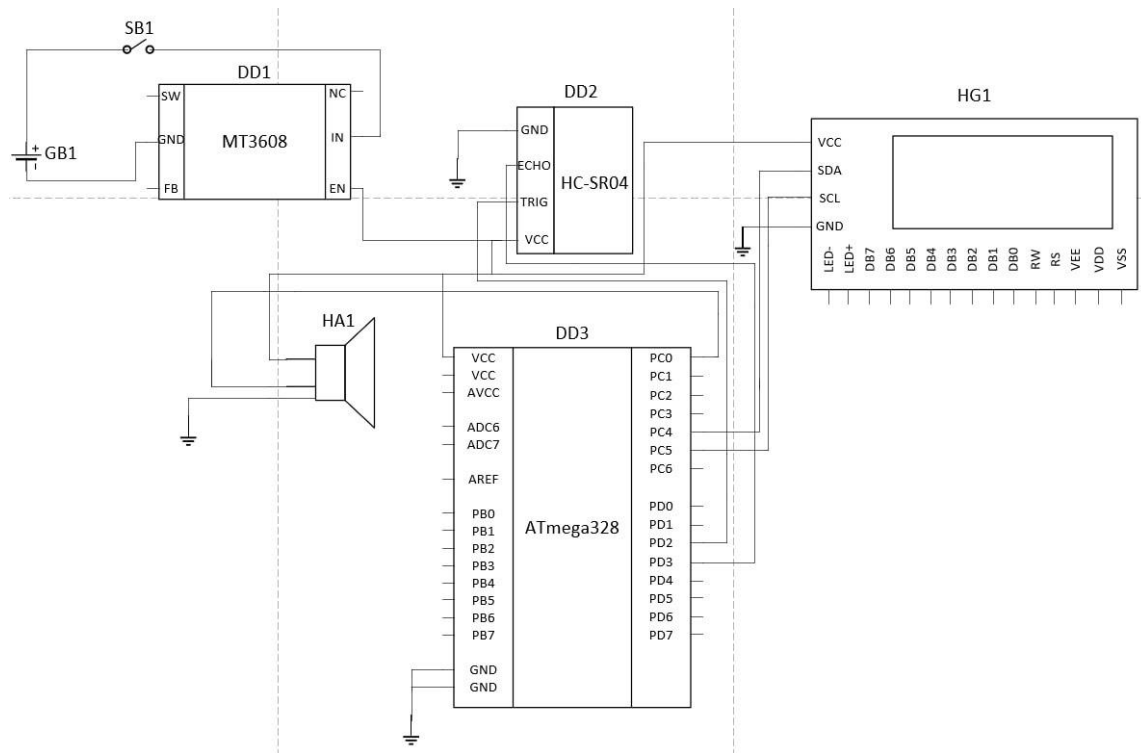


Рис.2.24 Принципова електрична схема комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва

Складові системи наступні:

- GB1 – літій-іонний акумулятор;
- SB1 – перемикач;
- DD1 – перетворювач напруги MT3608;
- HA1 – Активний зумер;

- DD2 – Ультразвуковий датчик HC-SR04;
- DD3 – мікроконтролер ATmega328;
- HG1 – LCD 16x2 дисплей;

### **3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО - АЛГОРИТМІЧНОГО ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА**

#### **3.1. Розробка алгоритму роботи системи**

Розробка алгоритму роботи системи, основні кроки:

Ініціалізація системи:

- Встановлення початкових параметрів мікроконтролера Atmega328.
- Ініціалізація ультразвукового датчика HC-SR04
- Ініціалізація LCD-дисплея та активного зумера.
- Ініціалізація кнопок керування.

Зчитування даних з датчика:

Мікроконтролер відправляє імпульс тригера на ультразвуковий датчик HC-SR04 для запуску вимірювання. Датчик випромінює ультразвуковий сигнал і приймає його відбиття від поверхні рідини. Мікроконтролер вимірює час, який пройшов між відправкою і прийомом сигналу

Обробка даних:

Отриманий час перетворюється у відстань на основі швидкості звуку у повітрі. Розрахована відстань конвертується у рівень рідини у резервуарі.

Аналіз даних:

Розрахований рівень рідини порівнюється з заданими пороговими значеннями для визначення чи є рівень рідини у допустимих межах.

Відображення інформації:

Якщо рівень рідини знаходиться у межах норми, мікроконтролер виводить значення на дисплей. Якщо рівень рідини виходить за межі допустимих значень, активується звукове сповіщення зумера.

Циклічне повторення:

Алгоритм повторюється знову з періодичністю, визначеною у програмі

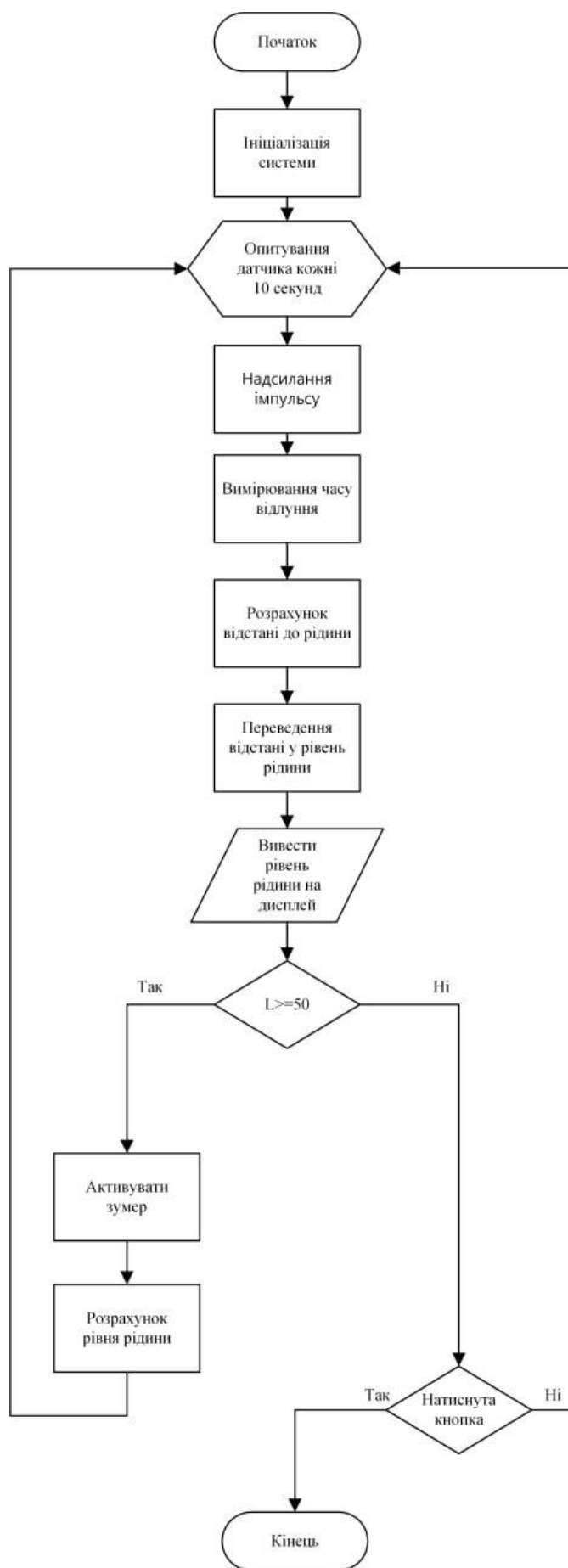


Рис. 3.1 Блок-схема основних функцій

### 3.2. Розробка програмного забезпечення

Програмне забезпечення для системи визначення рівня рідини розроблено для мікроконтролера Atmega328 на платформі Arduino Nano. Основні функції ПЗ включають ініціалізацію датчиків та дисплея, зчитування даних з ультразвукового датчика HC-SR04, обробку цих даних для визначення рівня рідини, відображення результатів на LCD-дисплеї та активацію звукового зумера при перевищенні критичного рівня рідини.

Програмне забезпечення складається з наступних модулів: модуль ініціалізації підключених компонентів; модуль вимірювання часу відлуння ультразвукового датчика; модуль обчислення рівня рідини; модуль відображення даних на LCD-дисплеї; модуль активації зумера при критичному рівні рідини.

Лістинг коду наведено на рис. 3.2 і рис. 3.3.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Піни підключення ультразвукового датчика
const int trigPin = 9;
const int echoPin = 10;

// Пін підключення зумера
const int buzzerPin = 8;

// Параметри дисплея
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// Критичний рівень рідини (у см)
const int criticalLevel = 10;

void setup() {
    // Ініціалізація серійного зв'язку для налагодження
    Serial.begin(9600);

    // Ініціалізація пінів датчика і зумера
    pinMode(trigPin, OUTPUT);
    pinMode(echoPin, INPUT);
    pinMode(buzzerPin, OUTPUT);

    // Ініціалізація дисплея
    lcd.begin();
    lcd.backlight();
    lcd.print("Liquid Level");
}
```

Рис. 3.2

```

void loop() {
    // Відправка ультразвукового імпульсу
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);

    // Читання часу відлуння
    long duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

    // Обчислення відстані до рідини
    int distance = duration * 0.034 / 2;

    // Виведення даних на дисплей
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Distance: ");
    lcd.print(distance);
    lcd.print(" cm ");

    // Перевірка критичного рівня
    if (distance < criticalLevel) {
        digitalWrite(buzzerPin, HIGH); // Активувати зумер
    } else {
        digitalWrite(buzzerPin, LOW); // Деактивувати зумер
    }

    // Затримка перед наступним циклом вимірювання
    delay(1000);
}

```

Рис. 3.3

### 3.3. Моделювання статистичної похибки ультразвукових рівнемірів

В енергетиці та промисловості для вимірювання рівня рідини у різних ємностях широко використовуються ультразвукові рівнеміри. Традиційна схема такого рівнеміра заснована на ехо-імпульсному методі вимірювань з тимчасової затримки ультразвукового сигналу [30]. Перевагою ультразвукових рівнемірів вважаються відносно висока точність і надійність вимірювань, оскільки на відміну від ємнісних і поплавкових рівнемірів вимірювання виробляються дистанційно.

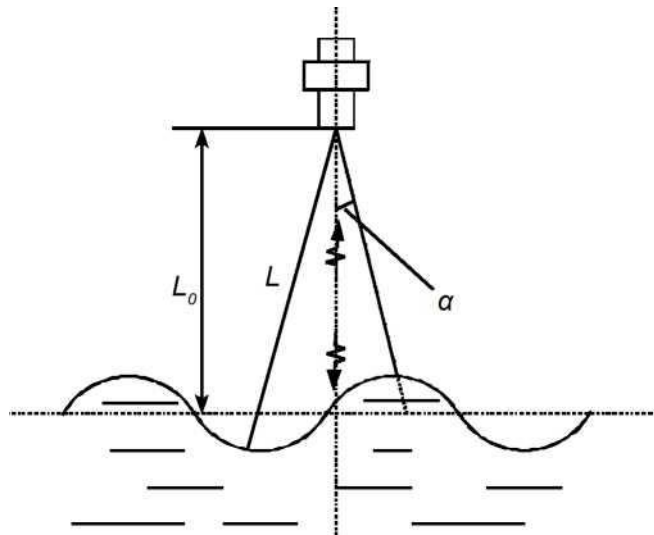


Рис 3.4. Загальна схема роботи ультразвукових рівнемірів

Розглянемо моделювання статистичної похибки ультразвукового рівнеміра з урахуванням хвилювання поверхні рідини. Схема вимірів наведено на рис. 3.4.

Форма відбитого від поверхні сигналу істотно залежить як від нерівності поверхні рідини, так і від ширини діаграми спрямованості ультразвукового перетворювача. Оскільки відстань від ультразвукового перетворювача до поверхні досягає іноді декількох метрів, а його розміри, як правило, порівняні з довжиною ультразвукової хвилі, кута  $\alpha$ , що визначає розбіжність випромінювання і розмір майданчика, що відображає, може істотно впливати на точність визначення рівня рідини.

Теоретично розсіювання хвиль на нерівній поверхні радіолокаційний сигнал з циклічною частотою про  $\omega = 2\pi f$  розраховується у вигляді інтегралу по майданчику розсіювання  $S$ :

$$R = \iint_S f\left(\frac{e - ikr}{r}\right) dS, \quad (3.1)$$

де  $R$  - коефіцієнт відбиття;  $k = \frac{\omega}{c}$  - хвильове число;  $c$  – швидкість звуку;  
 $r$  – радіус-вектор від перетворювача до елемента поверхні.

Функція  $f$  включає випадкову висоту нерівностей поверхні, залежність коефіцієнта відображення ультразвукової хвилі від кута падіння і так далі. Інтегрування (1), як правило, можливе лише приблизно, а чисельне рішення супроводжується складнощами, пов'язаними з інтегруванням швидко осцилюючих функцій. Крім того, при вирішенні задачі ехо-імпульсного зондування для розрахунку форми ехо-сигналу необхідно подальше зворотне перетворення Фур'є. Для моделювання розсіювання імпульсного сигналу на нерівній поверхні ми замінили дифракційну задачу (1) завданням розсіювання плоскої акустичної хвилі від шару з випадковим профілем швидкості звуку. При цьому товщина шару визначалася різницею  $\Delta L$  між найкоротшим  $L_0$  відстанню до поверхні і відстанню до краю майданчика  $L$ . Такий підхід є досить грубим наближенням, проте дозволяє оцінити особливості статистичної похибки ультразвукового рівнеміру, оскільки забезпечує як фазову, так і випадкову амплітудну модуляцію відбитого від поверхні сигналу. Приклади профілю швидкості звуку при модельних розрахунках показано на рис.2, в. Для розв'язання розсіяння хвилі від неоднорідного шару використовувався метод інваріантного занурення, що дозволяє звести крайову задачу до завдання з початковими умовами та реалізувати ефективні чисельні алгоритми її вирішення [30]. Рішення для коефіцієнта відображення  $R$  гармонійної хвилі частотою  $\omega$  про знаходиться з нелінійного диференціального рівняння першого порядку [30]:

$$\frac{dR_L}{dL} = 2ikR_L + i\frac{k}{2}\varepsilon(L)(1+R_L)^2, \quad (3.2)$$

де  $L$  – поточний параметр інтегрування;  $\varepsilon(L)$  - визначає неоднорідність шару.

Вирішуючи рівняння занурення за різних частотах  $\omega$ , ми можемо одержати частотну характеристику  $R_L(\omega)$ . Знаходячи спектр  $X(\omega)$  падаючої шар хвилі  $x(t)$ , характерна імпульсна форма якої показано на рис. 2, а, і примножуючи його на  $R_L(\omega)$ , ми отримуємо спектр відбитого сигналу  $Y(\omega)$  і після зворотного перетворення Фур'є - сам відбитий сигнал, тобто

$$y(t) = \Phi^{-1}\{Y(\omega)\} = \Phi^{-1}\{X(\omega) \cdot R_L(\omega)\}.$$

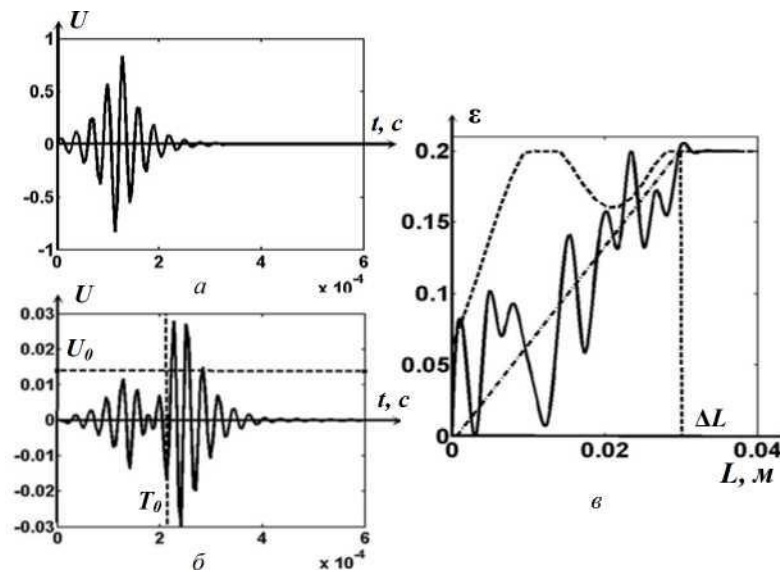


Рис. 3.5. Приклад вхідного (а) та вихідного (б) імпульсів та варіанти профілів (в)

Форма вхідного імпульсного сигналу  $x(1)$  показана на рис. 3.5, а, характерна, наприклад, для ультразвукових резонансних перетворювачів частотою 40 кГц, збуджуваних одиночним імпульсом.

Профіль неоднорідності шару (рис. 3.5, в) задавався у вигляді випадкової функції з гаусовим розподілом, що відповідає характерним нерівностям різного масштабу на поверхні. Висота нерівності можна порівняти з довжиною акустичної хвилі.

Традиційним способом виміру затримки ультразвукового сигналу є оцінка часового інтервалу  $T_0$  при досягненні сигналом певного рівня  $U_0$ . Оскільки відбитий сигнал має випадкову амплітудну і фазову модуляцію, статистика  $T_0$  за сукупністю відбитих імпульсів залежить від випадкових характеристик поверхні, і від заданого рівня  $U_0$ .

На рис. 3 наведено гістограми статистичних розподілів затримки  $\rho(T_0)$  залежно від масштабів нерівності поверхні та заданого рівня  $U_0$  (0,1 та 0,5 від максимальної амплітуди сигналу). Гістограми отримані за модельною вибіркою зі 100 імпульсів. Розподіл рис.3 відповідають збільшенню масштабів

хвилювання поверхні. Верхні розподіли відповідають дрібномасштабному хвилюванню, середні - хвилюванню, що схоже з довжиною акустичної хвилі, нижні - великомасштабному хвилюванню. Як видно з рис. 3.6, при гаусовому розподілі нерівності поверхні статистичне розподіл затримки  $\rho(T_0)$  має досить складний вигляд і істотно змінюється зі збільшенням масштабів хвилювання. Головною особливістю статистичного розподілу є наявність кількох максимумів розподілу. При цьому відстань між максимумами розподілів рис.3.6 приблизно відповідає довжині звукової хвилі, а їх висота і ширина визначаються характеристиками хвилювання на поверхні рідини. Гістограми рис.3.6 відповідають класичним результатам [30], відповідно до яких при кутах падіння, близьких до нормальних, звук відбивається в основному від вершин поверхневих хвиль і западин між ними. З розподілів рис.3.6 видно, що середньозважене значення затримки змінюється від гістограми до гістограми.

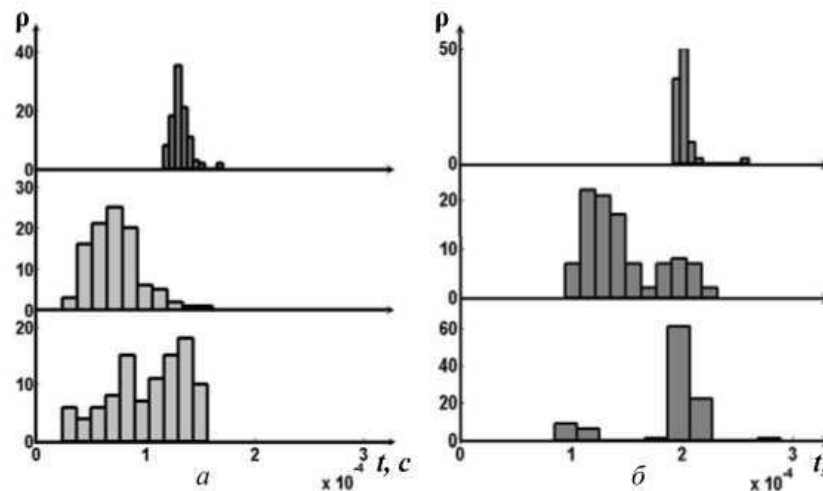


Рис. 3.6. Розподіл затримки при рівні відсічення 0.1(а) та 0.5(б)

Таким чином, в залежності від рівня спрацьовування компаратора в схемі ультразвукового рівнеміру і параметрів поверхневого хвилювання рідини може змінюватися не тільки статистична похибка рівнеміра, але і середнє значення затримки  $T_0$ , яке є вимірюваною величиною, що шукається. Отже, для калібрування рівнеміра необхідні побудова статистичного

розподілу  $\rho(T_0)$  і оцінка потрібного числа ультразвукових імпульсів, що в середньому використовуються, в залежності від умов, в яких рівнемір буде експлуатуватися

### 3.4. Підвищення точності ультразвукових вимірювань методом двох компараторів

Ультразвукова технологія - одна з небагатьох, що дозволяє вимірювати об'єми і відстані в різних середовищах: газах рідинах і твердих тілах [5].

Похибка вимірювання відстані пов'язана з різним загасанням і різною швидкістю поширення сигналу при проходженні різних тканин. У зв'язку з цим, ультразвуковий імпульс зазнає істотних змін, і в залежності від відстані, у прийнятого сигналу змінюється не тільки амплітуда, а й тривалість переднього фронту огинаючої, що призводить до виникнення помилки вимірювання. Істотно підвищити точність виміру можна, використовуючи сучасні методи обробки ехо-сигналів. Одним з таких методів є метод двох компараторів з різними порогами спрацьовування [6].

Спрацювання першого компаратора, має рівень  $U_1$  відбувається у час  $t_1$ , спрацювання другого компаратора, має рівень  $U_2$ , відбувається у момент часу  $t_2$ . Побудова прямої за координатами цих точок дозволяє знайти тимчасову координату початку ехо-імпульсу у  $t_p$  з виразу

$$t_p = t_1 - \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.3)$$

Визначимо значення помилки, одержуване цим методом для лінійного наростання огинаючої переднього фронту ехо-імпульсу у:

$$U_{i+1}^{\max} = U_i^{\max} + k \cdot U_1, \quad (3.4)$$

де  $i = 0, 1, \dots, k$  - тангенс кута нахилу переднього фронту огинаючої імпульсу,  $U_1$  - порогова напруга першого компаратора.

Максимальні помилки в моменти реєстрації рівнів виходять тоді, коли величини рівнів  $U_1$  і  $U_2$  будуть на рівні максимумів попередніх піків (рис. 3.7) [6].

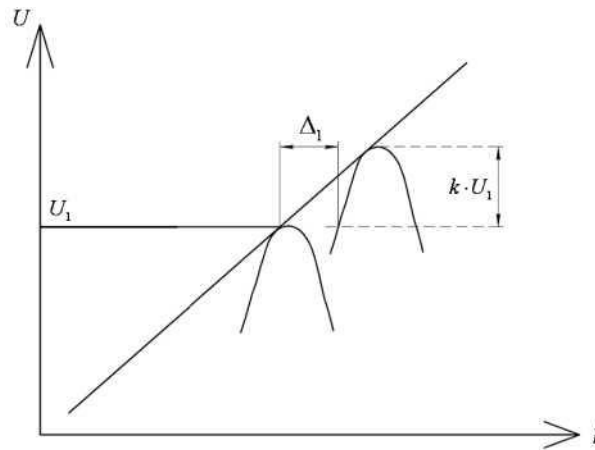


Рис. 3.7. Виникнення помилки за рахунок першого компаратора

Максимальна амплітуда  $i$ -го періоду, після спрацьовування першого компаратора визначається з виразу

$$U_i^{\max} = \frac{U_1}{\cos \frac{\Delta \varphi_1}{2}}.$$

З урахуванням виразу (1.1) можна визначити кут:

$$\cos \frac{\Delta \varphi_1}{2} = \frac{U_1}{U_1 + k \cdot U_1}.$$

Звідси

$$\frac{\Delta \varphi_1}{2} = \arccos \frac{1}{1+k}.$$

Знаючи кут, можна знайти помилку у визначенні часу першого відліку (рис. 3.6):

$$\Delta_1 = \lambda \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \arccos \left( \frac{1}{1+k} \right) \right].$$

Аналогічно для другого відліку

$$U_2 + k \cdot U_1 = \frac{U_2}{\cos \frac{\Delta \varphi_2}{2}}$$

Позначимо

$$q = \frac{U_1}{U_2}.$$

На рис. 3.7 показані два крайні випадки: перший випадок, коли перший відлік має максимальну помилку, а другий відлік має мінімальну помилку, і другий випадок зворотний, коли перший відлік має мінімальну помилку, а другий відлік має максимальну помилку. Крпки  $A$  і  $B$  відповідають ідеальній огинаючої точки  $C$  і  $D$  відповідають помилкам у відліках.

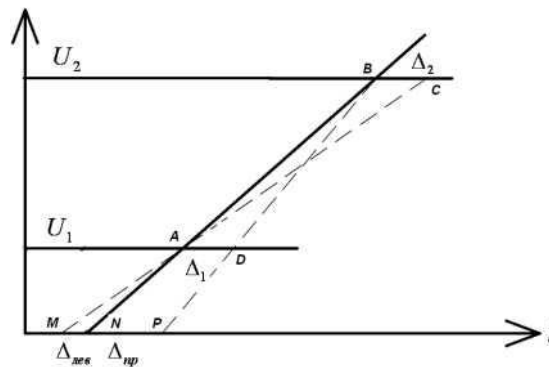


Рис. 3.7. Побудова огинаючої переднього фронту ехо-імпульсу по двох відліках: пряма  $NB$  – ідеальний випадок;  
пряма  $MC$  – за наявності помилки другого компаратора;  
пряма  $BP$  - за наявності помилки першого компаратора

З подоби трикутників  $\triangle ADB$  і  $\triangle NBP$  можна записати вираз

$$\frac{\Delta_{пр}}{\Delta_1} = \frac{U_2}{U_2 - U_1}.$$

Звідси

$$\Delta_{пр} = \Delta_1 \cdot \frac{1}{1 - q}.$$

З подоби трикутників  $\triangle ABC$  і  $\triangle MAN$  можна записати вираз

$$\frac{\Delta_{лев}}{\Delta_2} = \frac{U_1}{U_2 - U_1}.$$

Звідси

$$\Delta_{лев} = \Delta_2 \cdot \frac{q}{1-q}.$$

Результуюча помилка перебуває як сума помилок:

$$\Delta_{лев} + \Delta_{пр} = \Delta_2 \cdot \frac{q}{1-q} + \Delta_1 \cdot \frac{1}{1-q}.$$

Після проведення математичного аналізу, було отримано вираз визначення відносної помилки при 95 % довірчому інтервалі

$$\frac{\Delta}{\lambda} = \frac{1}{1-q} \cdot \left[ 1+q - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \arccos \frac{1}{1+k} + q \cdot \arccos \frac{1}{1+k} \right) \right]. \quad (3.5)$$

Чим крутіше огинаюча переднього фронту (чим більше  $k$ ), тим менше помилка у визначенні початку ехо-імпульс у. Зі збільшенням різниці у встановленні порогів компараторів  $U_1$  та  $U_2$  (чим менше  $q$ ) зменшується помилка у визначенні часу початку ехо-імпульс у. Вплив різниці в порогах проявляється сильніше, ніж вплив крутості переднього фронту огинаючої.

Максимальна помилка виходить при спрацюванні компараторів в один період прийнятого сигналу. Однак такий випадок є малоймовірним і в цій роботі не розглядається [6].

Для оцінки правильності отриманих теоретичних результатів з використанням цього методу були проведені лабораторні випробування, які показали, що точність вимірювань залежить від величини обраних порогів спрацювання компараторів.

На рис. 3.8 наведено графіки теоретичного та експериментального значення залежності максимальної помилки вимірювання від величини порога другого компаратора, при цьому поріг першого компаратора був обраний трохи вище рівня шумів.

З графіка видно, що зі збільшенням значення порога спрацювання другого компаратора зменшується похибка виміру при постійному рівні спрацювання першого компаратора. Відмінність експериментальної та розрахункової залежності пояснюється різною швидкістю наростання огинаючої переднього фронту, що не було враховано при моделюванні.

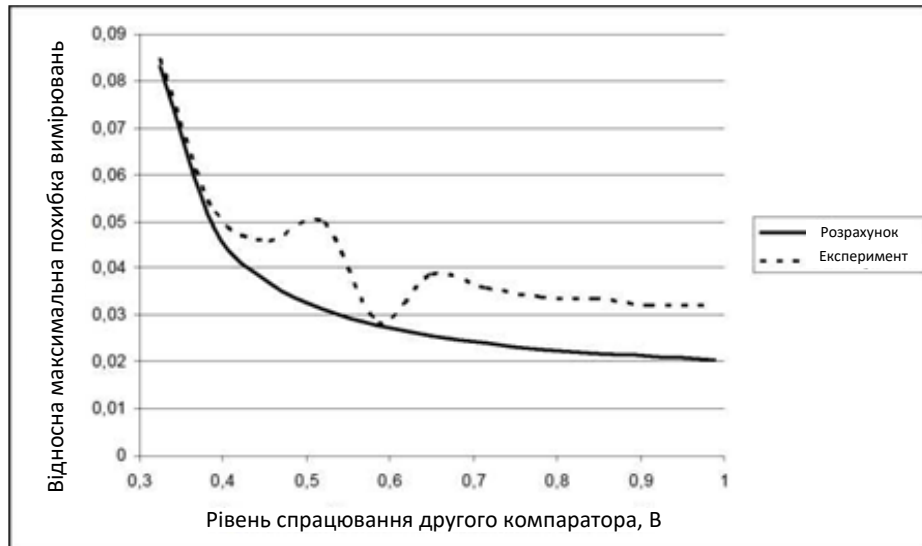


Рис. 3.8. Графік залежності максимальної помилки виміру від величини порога другого компаратора

Таким чином, застосування методу двох компараторів дозволяє значно збільшити точність вимірювання ультразвукових локаційних пристроїв.

### 3.5. Розрахунок похибки вимірювання

Для розрахунку похибок визначення рівня рідини, проведемо дії для ультразвукового датчика HC-SR04, який вимірює відстань до поверхні рідини. Ми отримали наступні значення вимірювань рівня рідини у см:

$$R = (398, 399, 400, 401, 402, 399, 400, 401, 398, 402)$$

Знайдемо середнє арифметичне значення R за формулою (3.6):

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3.6)$$

де  $n = 10$  (кількість вимірювань).

$$R = \frac{398+399+400+401+402+399+400+401+398+402}{10} = 400$$

Знайдемо похибки повторних вимірювань:

$$\Delta R_i = R_i - \bar{R}$$

(3.7)

$$(\Delta R_i)^2 = (R_i - \bar{R})^2$$

Таблиця 3.1 - Таблиця результатів

| № з. п. | R, см | $\Delta R_i$ , см | $\Delta R_i^2$ , см <sup>2</sup> |
|---------|-------|-------------------|----------------------------------|
| 1       | 398   | -2                | 4                                |
| 2       | 399   | -1                | 1                                |
| 3       | 400   | 0                 | 0                                |
| 4       | 401   | 1                 | 1                                |
| 5       | 402   | 2                 | 4                                |
| 6       | 399   | -1                | 1                                |
| 7       | 400   | 0                 | 0                                |
| 8       | 401   | 1                 | 1                                |
| 9       | 398   | -2                | 4                                |
| 10      | 402   | 2                 | 4                                |
| сер     | 400   | 0                 |                                  |

Середнє значення:  $R=400$  см

Розрахунок випадкової похибки вимірювання.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta R_i)^2} \approx 1.49$$

Випадкова похибка:

$$\Delta R_{\text{вип}} = t_{0.95} \cdot s / \sqrt{n} = 2.26 \cdot 1.49 / \sqrt{10} \approx 1.06$$

Похибка приладу за формулою :

Припустимо, що точність НС-SR04 складає  $\pm 3$  мм (0.3 см):

$$\Delta R_{\text{прил}} = 0.3 \text{ см}$$

Похибка заокруглення за формулою (3.3):

$$\Delta R_3 = \frac{h}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \approx 0.29 \text{ см}$$

Загальна абсолютна похибка за формулою (3.4):

$$\Delta R_{\text{заг}} = \sqrt{\Delta R_{\text{вип}}^2 + \Delta R_{\text{прил}}^2 + \Delta R_3^2} = \sqrt{1.06^2 + 0.3^2 + 0.29^2} \approx 1.15 \text{ см}$$

Таким чином, загальна абсолютна похибка визначення рівня рідини складає приблизно 1.15 см. Це означає, що при вимірюванні рівня рідини в межах 0-400 см, похибка вимірювання складає приблизно  $\pm 1.15$  см.

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведено детальний аналіз та розробку комп'ютеризованої системи вимірювання рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва. Основною метою роботи було створення ефективного, надійного та точного рішення для контролю рівня рідини, що забезпечить підвищення безпеки та автоматизації виробничих процесів.

Ультразвукові датчики виявились надійним вибором для багатьох застосувань завдяки їхній точності та простоті інтеграції. Вони забезпечують безконтактне вимірювання, що є критично важливим у середовищах з агресивними рідинами. Недоліком є їх чутливість до змін температури та тиску.

У ході роботи було розроблено структурну схему комп'ютеризованої системи, яка включає в себе датчики, мікроконтролер ATmega328, а також програмне забезпечення для обробки і візуалізації даних. Це рішення дозволяє забезпечити безперервний моніторинг рівня рідини в режимі реального часу, автоматизацію процесів контролю та підвищення загальної безпеки виробництва.

На основі проведеного аналізу було визначено, що для кожного конкретного випадку необхідно ретельно підбирати тип датчика, враховуючи специфіку виробничих умов, тип рідини та вимоги до точності. Впровадження комп'ютеризованої системи контролю рівня рідини дозволить значно підвищити ефективність технологічних процесів, знизити ризики аварій та оптимізувати використання ресурсів.

Таким чином, розроблена система є перспективним рішенням для хімічного виробництва і може бути адаптована для інших галузей промисловості, де важливий точний і надійний контроль рівня рідини.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Метрологія та вимірювальна техніка /Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін.: Підручник – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с.
2. Нестерчук Д. М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М. Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 256 с.
3. Поліщук Є. С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко: Львів: Вид-во “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.
4. Петльований Є. О. Методи та засоби інформаційно-вимірювальної техніки, випробувань і контролю: підручник. Дніпро, 2018. – 191 с.
5. Сидоренко В. А.; Основи автоматизації хімічних виробництв; Навчальний посібник; Львів; Видавництво ЛНУ ім. Івана Франка; 2016; 290 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/97358d2f-ecf9-44a1-a78f-6510ffef424c/content>
6. Романенко Д. І.; Контроль та автоматизація хімічних виробництв; Монографія; Одеса; Одеський національний політехнічний університет; 2019; 280 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://conference.ikto.net/pub/akit\\_2024\\_11-17march\\_1.pdf](https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf)
7. [https://kytola.com/industries/liquid-level-measurement/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=252245078&gbraid=0AAAAADkabiKx9MBQFQAp1A2xZOOPoCBTP&gclid=Cj0KCQiAx8PKBhD1ARIsAKsmGbd9N-fuNKWKV5zFarq5l8U\\_SB1CfkskClAq\\_RCatcevIJBlU5xU2lgaAsDLEALw\\_wcB](https://kytola.com/industries/liquid-level-measurement/?gad_source=1&gad_campaignid=252245078&gbraid=0AAAAADkabiKx9MBQFQAp1A2xZOOPoCBTP&gclid=Cj0KCQiAx8PKBhD1ARIsAKsmGbd9N-fuNKWKV5zFarq5l8U_SB1CfkskClAq_RCatcevIJBlU5xU2lgaAsDLEALw_wcB)
8. <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/level-measurement?srsId=AfmBOor7lDr-BG0W103v2rhEcdgau3eVbDloZD0PiezK6MSNXa72gHEP>

9. <https://www.burkert.com/en/service-support/knowledge-center/glossary/Liquid-level-measurement>
10. Збірник наукових праць "Автоматизація та приладобудування"; Автоматизація та приладобудування; Науковий збірник; Харків; Харківський національний університет радіоелектроніки; 2020; 200 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/e83f5f27-ce10-4cba-8a4a-acc62b52187/content>
11. Кузьменко Л. В.; Методи контролю рівня рідини у резервуарах хімічного виробництва; Докторська дисертація; Львів; Національний університет "Львівська політехніка"; 2019; 280 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2022/jan/26205/zbirnykmaterialivekokongres2022.pdf>
12. "Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для визначення рівня рідини в резервуарах хімічного виробництва", Житомирська політехніка, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/334.pdf>
13. "Сенсорні технології у промисловості", Київ, 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://iti.fit.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/ITI-2019.pdf>
14. <https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340?srsId=AfmBOorvbJH2QxJF5JxpKCDUqRoqXZd8K-jmwqRHSy6vPCZ9dF-D-FPQ>
15. <https://arduino.ua/prod4358-raspberry-pi-pico?srsId=AfmBOoqQB457Vt2EyNk7wW5UPC-S22atVGbUlsRBuABO-b-sV0X5qoMd>
16. [https://arduino.ua/cat126-wi-fi-esp8266?srsId=AfmBOoqUxSivT9eolDoSKdYUD9tb59Adc8whvaAi2qXxNpxic6jzZs\\_t](https://arduino.ua/cat126-wi-fi-esp8266?srsId=AfmBOoqUxSivT9eolDoSKdYUD9tb59Adc8whvaAi2qXxNpxic6jzZs_t)
17. <https://itmaster.biz.ua/electronics/stm32/stm32-intro.html>

18. [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/pic16f676-i-sl\\_42811.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/pic16f676-i-sl_42811.html)
19. [https://arduino.ua/prod182-yltrazvykovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04?srsltid=AfmBOoq5rSmru\\_G5cj-cmVkJtWnrIpvu7V2ePLy-gx83D8Lj9dmoHB3M](https://arduino.ua/prod182-yltrazvykovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04?srsltid=AfmBOoq5rSmru_G5cj-cmVkJtWnrIpvu7V2ePLy-gx83D8Lj9dmoHB3M)
20. [https://uamper.com/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9-%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D1%8F-HY-SRF05?srsltid=AfmBOooE\\_\\_9i-KErYvXnadBlieBfgzeWMR4nVi50ClGMdUZuSC6qaj2T](https://uamper.com/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9-%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D1%8F-HY-SRF05?srsltid=AfmBOooE__9i-KErYvXnadBlieBfgzeWMR4nVi50ClGMdUZuSC6qaj2T)
21. <https://arduino.ua/prod3710-yltrazvykovii-datchik-vidstani-us-015?srsltid=AfmBOoqTliV4YCP6py6sWLV6Vjtlh7tZOCvkV0eF6DIy0wqA-gPHnTFU>
22. <https://uamper.com/URM37-V5-%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9-%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%80?srsltid=AfmBOortWarR8FzW1Qkhul9HTdRFMnsKUMN36CkGW5m01wp6EL9HJkh0>
23. <https://forum.cxem.net/topic/159091-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C-%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D1%8F-rcw-0012/>

24. <https://myproject.com.ua/hc-sr04-ultrazvukovij-datchik-vidstani-ua.html>
25. <https://arduino.ua/prod5143-modyl-testirovaniya-datchika-hc-sr04?srsltid=AfmBOoqADveAQskhFrspzahGgkyPhVG-hle7XON1c18UQ4XXjJ3aBGvY>
26. <https://arduinokit.com.ua/ua/p2271652574-aktivnyj-zummer-plate.html?srsltid=AfmBOoqeMbjEq2Hsx8u7q6ILDNUvUHC4Kxjgdx9kInoXfMEEdedy1Ipxc>
27. <https://arduino.ua/prod1813-lcd-1602-simvolnii-displei-16x2-jeltii?srsltid=AfmBOorxU60v7AjQ4ZusvuCe0jkw33qysG3BWsnLKXHn2AnOCPrBHHSi>
28. [https://arduino.ua/prod166-arduino-nano-v3-0-avr-atmega328p-z-rozpayanimi-konektorami?srsltid=AfmBOopX3IVqHO9Til9VnIZD5wTCc1ZvUd5qq7V795cO44Tr\\_kOwuWRL](https://arduino.ua/prod166-arduino-nano-v3-0-avr-atmega328p-z-rozpayanimi-konektorami?srsltid=AfmBOopX3IVqHO9Til9VnIZD5wTCc1ZvUd5qq7V795cO44Tr_kOwuWRL)
29. <https://arduino.ua/prod5988-knopka-6x6x4mm>
30. Бергман, Л. Ультразвук та його застосування в науці та техніці. [Текст] / М. В. Григор'єв, Л. Д. Розенберг, 2-ге вид. : вид-во іноземної літератури, 2013 - 726 с.