

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Володимир ЄРЕМЕНКО  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Метрологія та вимірювальна  
техніка»  
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна  
техніка»  
на тему: «Система вимірювання щільності та рівня нафтопродуктів у  
сховищах»**

Виконав :  
студент IV курсу, групи ВВ-71  
Даценко Максим Віталійович \_\_\_\_\_

Керівник:  
Професор, доктор технічних наук, професор  
Єременко Володимир Станіславович \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:  
Ст. викладач, к.т.н.  
Щербань Анастасія Павлівна \_\_\_\_\_

Рецензент:  
Доцент, кандидат технічних наук, доцент  
Баженов Віктор Григорович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній  
роботі немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Інформаційно-вимірювальних технологій**  
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна  
техніка»  
Освітньо-професійна програма «Метрологія та вимірювальна  
техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Володимир ЄРЕМЕНКО  
«\_\_\_» червня 2021р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт студенту**  
**Даценко Максиму Віталійовичу**

1. Тема роботи «Система вимірювання щільності та рівня нафтопродуктів у сховищах», керівник роботи Професор Єременко Володимир Станіславович, затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи 05.06.2021 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: Система повинна забезпечувати наступні показники: Діапазон вимірювання густини 600 – 1100 кг/куб. м; похибка вимірювання  $\pm 5\%$ ; діапазон вимірювання рівня 0 – 3,0 м; похибка вимірювання  $\pm 5$  мм; температурний діапазон від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

4. Зміст роботи: Провести огляд та аналіз існуючих технічних рішень. Обґрунтувати метод вимірювання, схемотехнічне рішення та конструкцію. Розробити структурну схему системи. Розробити функціональну схему системи. Розробити структури та алгоритм програмного забезпечення системи. Провести розрахунки показників точності.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) схема структурна – 1л; схема функціональна – 1л; плакат – 1л.

6. Дата видачі завдання 11.02.2021 р

# Календарний план

№ з/ п	Назва етапу виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту
1	Огляд та аналіз існуючих технічних рішень	22.04.2021
2	Аналіз та обґрунтування методу вимірювання	24.04.2021
3	Розробка структурних схем	08.05.2021
4	Розробка алгоритмів функціонування	12.05.2021
5	Розробка функціональної схеми	22.05.2021
6	Розрахунки показників точності системи	29.05.2021
7	Висновки	03.06.2021
8	Оформлення дипломного проєкту	05.06.2021

Студент  
Керівник

Даценко Максим  
Єременко Володимир

## Анотація

Даценко М. В. Система вимірювання густини та рівня нафтопродуктів в ємностях при зберіганні. 2021 – 64 с., 17 табл. та 10 рис. Керівник: Єременко Володимир Станіславович, доктор технічних наук, кафедра інформаційно – вимірювальних систем.

Представлені результати досліджень методів та засобів вимірювання густини та рівня нафтопродуктів при зберіганні їх у ємностях. Розроблена комплексна система вимірювання. Описаний алгоритм роботи системи вимірювання, структурна та функціональна схеми. Прораховані усі можливі види похибок при роботі системи вимірювання. Оформлений дипломний проєкт з результатами роботи системи вимірювання.

Результат роботи: Нові структурна та функціональна схеми системи вимірювання густини та рівня нафтопродукту. Новий алгоритм роботи системи, який дає змогу оцінити технічні можливості запропонованого методу вимірювання.

## **Annotation**

Datsenko M.V. System for measuring the density and level of petroleum products in storage tanks. 2021 - 64 p., 17 tablets. and 10 fig. Head: Eremenko Volodymyr Stanislavovych, Doctor of Technical Sciences, Department of Information and Measurement Systems.

The results of researches of methods and means of measurement of density and level of oil products at their storage in tanks are presented. A comprehensive measurement system has been developed. The algorithm of operation of the measuring system, structural and functional scheme is described. All possible types of errors in the operation of the measurement system are calculated. The diploma project with results of work of system of measurement is issued.

Result: New structural and functional schemes of the system for measuring the density and level of petroleum products. A new algorithm of the system, which allows to assess the technical capabilities of the proposed measurement method.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ  
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

***Приладобудівний факультет  
Інформаційно-вимірювальних  
технологій***

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
Володимир ЄРЕМЕНКО  
"\_\_\_" червня 2021 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

***на дипломний проєкт***

**«Система вимірювання щільності та рівня нафтопродуктів у  
сховищах»**

***ВВ7106.414151.001 ТЗ***

**УЗГОДЖЕНО:**

Керівник дипломного проєкту:

Професор Єременко В. С.

"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2021 р.

Дипломник:

студент групи ВВ-71

Даценко М. В.

"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2021 р.

Залікова книжка \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

# **1. Технічне завдання**

## **1.1 Основні пункти технічного завдання**

### **1.1.1 Найменування та галузь використання**

1.1 Ультразвуковий густиномір та рівнемір нафтопродуктів, далі УГН та УРН.

1.2 Галузь використання – приладобудування, нафтова промисловість, авіаційна промисловість.

### **1.1.2 Підстави для розробки**

Даний проєкт виконується на основі завдання на дипломне проєктування на тему «Система вимірювання густини ті рівня нафтопродуктів в ємностях при зберіганні» затвердженого кафедрою інформаційно-вимірювальної техніки від 05 червня 2021 р.

### **1.1.3 Мета розробки і призначення продукції**

3.1 Метою розробки є створення системи вимірювання.

3.2 Розробка вирішує наступні задачі: втілення сучасних цифрових технологій та відповідної елементної бази; втілення сучасних технологій виготовлення продукції; покращення метрологічних, експлуатаційних та техніко-економічних характеристик.

3.3 Призначення конструкції: УГН використовується для контролю щільності нафти та нафтопродуктів при зберіганні у бочках, цистернах. Визначення щільності нафти та нафтопродуктів ультразвуковим методом. УРН використовується для контролю рівня нафти та нафтопродуктів при зберіганні у бочках, цистернах. Визначення рівня нафти та нафтопродуктів ультразвуковим методом.

#### 1.1.4 Джерела розробки

Джерелами розробки є періодичні та друковані видання вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури, довідкові матеріали, державні стандарти, інформаційні ресурси мережі Internet, каталоги продукції провідних виробників, матеріали патентно-ліцензійного пошуку.

#### 1.1.5 Технічні вимоги

1.1.5.1 Вимоги до експлуатаційних, технічних і метрологічних характеристик системи вимірювання.

Система повинна забезпечувати наступні показники:

- діапазон вимірювання густини: 600 – 1100 кг/куб. м;
- похибка вимірювання  $\pm 5\%$ ;
- діапазон вимірювання рівня 0 – 3 м;
- похибка вимірювання  $\pm 5$  мм;
- температурний діапазон від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$

#### 1.1.5.2 Вимоги до кліматичного використання і транспортування

Нормальні умови використання відповідно до ГОСТ 15150-69 наведено в таблиці

Таблиця 1 - Нормальні умови експлуатації

Величина, що впливає	Номінальні
	значення та їх відхилення



Температура навколишнього середовища, °С	20±5
Відносна вологість, %	80±2
Атмосферний тиск, kPa	86...106,7

1.1.5.3 Робочі умови експлуатації наведено в таблиці.

Таблиця 2 - Робочі умови експлуатації

Величина, що впливає	Номінальні значення та їх відхилення
Температура навколишнього середовища:	
- нижнє значення, °С	-30
- верхнє значення, °С	+60
Відносна вологість при температурі навколишнього середовища 35 °С, %	90
Атмосферний тиск, kPa	80...106,7

УГН та УРН повинні зберігати зовнішній вигляд і свої параметри відповідно до вимог кліматичного виконання УХЛ категорії приміщення 4.2 за ГОСТ 15150-69.

Вимоги до транспортування наведено в таблиці.

Таблиця 3 - Граничні умови транспортування

Впливаюча величина	Номінальні значення та їх відхилення

Температура зовнішнього середовища,  - нижнє значення, °C  - верхнє значення, °C	  -40  +70
Відносна вологість при температурі 25 °C, %	100
Атмосферний тиск, kPa	70-106,7
Максимальне прискорення механічних ударів при частоті 80-120 ударів в хвилину	30 м/с <sup>2</sup>

Вимоги до зберігання наведено в таблиці.

Таблиця 4 - Умови зберігання

Впливаюча величина	Номінальні значення та їх відхилення
Температура зовнішнього середовища,  - нижнє значення, °C  - верхнє значення, °C	  0  +40
Відносна вологість при температурі 35 °C, %	90
Атмосферний тиск, kPa	84-106,7

#### 1.1.5.3 Вимоги до часу встановлення робочого режиму

Показники робочого режиму не встановлюються.

#### 1.1.5.4 Вимоги до електричної міцності і опору ізоляції

Вимоги до електричної міцності і опору ізоляції не встановлюються.

#### 1.1.5.5 Вимоги до конструкції

УГН та УРН повинні відповідати вимогам до конструкції наведеним в таблиці.

Таблиця 5 - Габарити та вага системи вимірювання.

Найменування	Розмір h·l·b, m	Вага, kg
Корпус приладу	0.195 x 0.18 x 0.45	≤ 2кг

#### 1.1.5.6 Вимоги до електроживлення

Живлення повинно здійснюватися від джерела постійного струму (акумулятора) постійного струму напругою 12 – 36 V.

#### 1.1.5.7 Вимоги до надійності

Вимоги надійності не встановлюються.

#### 1.1.5.8 Вимоги до безпеки монтажу, експлуатації і ремонту

Монтаж при виготовленні системи вимірювання повинні бути виконані за сучасними технологіями монтажу.

Система вимірювання повинна поставлятися зібраним і не повинен вимагати розбирання і ревізії при виконанні монтажних робіт.

#### 1.1.5.9 Вимоги до методів і засобів повірки

Вимірювач при виробництві підлягає метрологічній атестації, при експлуатації підлягає калібруванню.

## 1.2 Додаткові вимоги

Додаткові вимоги не встановлюються.

## 1.3 Стадії та етапи розробки

Таблиця 6 – Етапи розробки дипломного проєкту

№ з/ п	Назва етапу виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту
1	Огляд та аналіз існуючих технічних рішень	22.04.2021
2	Аналіз та обґрунтування методу вимірювання	24.04.2021
3	Розробка структурних схем	08.05.2021
4	Розробка алгоритмів функціонування	12.05.2021
5	Розробка функціональної схеми	22.05.2021
6	Розрахунки показників точності системи	29.05.2021
7	Висновки	03.06.2021
8	Оформлення дипломного проєкту	05.06.2021

## 2. Порядок приймання дипломного проєкту

Приймання дипломного проєкту виконується комісією затвердженою кафедрою інформаційно-вимірювальної техніки.

Склад документації, яка подається до приймання:

- пояснювальна записка з додатками;
- графічні документи (схема структурна, схема функціональна, схема принципова, алгоритм роботи системи вимірювання);

- технічне завдання;
- анотації (українською та іноземною мовами);
- титульні листи проекту та пояснювальної записки.

Вимоги технічного завдання можуть бути змінені за бажанням сторін. Всі зміни повинні бути оформлені письмово і затверджені сторонами.

### **3. Вимоги щодо технічного захисту інформації з обмеженим доступом**

8.1 Вимоги щодо технічного захисту інформації з обмеженим доступом не встановлюються.

Студент

Даценко Максим

Керівник

Єременко Володимир

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

**Пояснювальна записка**  
до дипломного проєкту  
**на тему: «Система вимірювання щільності та рівня нафтопродуктів у  
сховищах»**

Київ – 2021 року

## Зміст

Вступ .....	18
1. Аналіз методів і засобів вимірювання щільності нафтопродуктів .....	19
1.1 Класифікація густиномірів .....	19
1.2 Ультразвуковий (акустичний) метод вимірювання щільності .....	21
1.3 Вібраційний метод вимірювання щільності .....	24
1.4 Гідростатичний метод вимірювання щільності .....	27
1.5 Ємнісний метод вимірювання щільності .....	29
1.6 Об'ємно-ваговий метод вимірювання щільності .....	32
1.7 Поплавково-ваговий метод вимірювання щільності .....	35
1.8 Оптичний метод вимірювання щільності .....	37
1.9 Радіоізотопний метод вимірювання щільності .....	39
2. Оцінка ефективності застосування ультразвукового вимірювача щільності нафти та нафтопродуктів .....	40
3. Розробка структурної схеми .....	43
4. Залежність поширення ультразвуку від температури та щільності в середовищі .....	45
5. Алгоритм роботи системи вимірювання .....	51

					<i>ВВ7106.414151.001 ПЗ</i>		
<i>Зам.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив.</i>	<i>Даценко М. В.</i>				Система вимірювання щільності та рівня Пояснювальна записка		
<i>Перевірив.</i>	<i>Щербань А.П.</i>						
<i>Реценз.</i>	<i>Баженов В.Г.</i>						
<i>Н. Контр.</i>	<i>Щербань А.П.</i>						
<i>Затвердив</i>	<i>Еременко В. С.</i>						
					<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
					<i>ПБФ, ВВ-71</i>		



6. Функціональна схема системи вимірювання .....	52
7. Принцип роботи цифрового вимірювача часового інтервалу.....	55
8. Аналіз похибок вимірювання .....	56
8.1 Похибки цифрового вимірювача часового інтервалу.....	56
8.2 Похибки системи вимірювання.....	59
9. Розрахунок похибок системи вимірювання .....	60
Висновок .....	63
Перелік джерел посилань .....	64

## Вступ

Оперативний контроль параметрів рідких середовищ, що знаходяться в резервуарах підприємств, що займаються виробництвом, транспортуванням і зберіганням рідкої продукції є найважливішим завданням в області вимірювальної техніки. Завдання організації моніторингу резервуарів з паливом, гасом, бензином, технічною водою та іншими рідинами актуальна для авіаційної промисловості, оскільки безпосередньо пов'язана із забезпеченням безпеки і ефективним використанням енергоресурсів в аеропортах. Більш складним завданням є контроль параметрів багат шарових рідин, дана задача стоїть в багатьох галузях промисловості, де можливо розшарування продукту, наприклад, при зберіганні нафти знизу резервуара, осідає підтоварна вода. Незважаючи на сучасний розвиток методів вимірювань, нині недостатньо уваги приділено комплексним методам контролю відразу декількох параметрів багат шарових рідин, які дозволяють зменшити кількість застосовуваних датчиків, що дозволить спростити монтаж і обслуговування пристроїв, а також підвищити надійність, і зробити експлуатацію більш вигідною.

В даний час відомі ультразвукові методи контролю щільності і в'язкості рідких середовищ, існують також методи спільного вимірювання рівня, щільності і в'язкості. основною метою проведених досліджень є підвищення точності і достовірності вимірювань.

## 1. Аналіз методів і засобів вимірювання щільності нафтопродуктів

### 1.1 Класифікація густиномірів

Прилади [4], які призначені для вимірювання щільності речовин, називають густиномірами. Слід зазначити, що роль і значення густиномірів з року в рік постійно зростає. Крім того, подальше вдосконалення використовуваних вимірювальних і обчислювальних технологій змінює і вимоги, що пред'являються до густиномірів.

Перерахуємо основні вимоги, що пред'являються до густиномірів:

- висока точність;
- висока швидкодія;
- висока надійність;
- однозначність показань;
- багатофункціональність;
- працездатність в складних експлуатаційних умовах;
- довговічність;
- низька вартість.

Слід зазначити, що існуючі в даний час методи і засоби вимірювання щільності нафти і нафтопродуктів мають також ряд недоліків. Тому виникає необхідність проаналізувати їх і вибрати з числа існуючих метод, який є найбільш актуальним та перспективним.

В основу класифікації сучасних густиномірів можна покласти чотири основних ознаки:

- метод вимірювання;
- різновид реалізації методу;
- кошти, які реалізують метод;
- особливості конструкції.

За методом вимірювання усі існуючі густиноміри підрозділяються на наступні типи (рис. 1):

- ультразвуковий (акустичний);
- вібраційний;
- гідродинамічний;
- гідростатичний;
- ємнісний;
- об'ємно-ваговий;
- поплавково-ваговий;
- оптичний;
- радіоізотопний.



Рис. 1 - Класифікація густиномірів за методом вимірювання

## 1.2 Ультразвуковий (акустичний) метод вимірювання щільності

В основі ультразвукового (акустичного) методу [4] вимірювання щільності лежить залежність значення щільності речовини від швидкості поширення ультразвуку в цій речовині. Важливо відзначити, що застосування для вимірювання щільності речовини ультразвуком є в даний час новим і одним з перспективних напрямків розвитку сучасних густиномірів.

Акустичні густиноміри є засобами вимірювань, у яких вихідний сигнал несе вимірювальну інформацію, залежить від акустичних властивостей контролюваного рідкого середовища.

Звукові коливання з частотою 20 кГц (і вище), які створюються електроакустичним вібратором (випромінювачем), проходять через контролюване рідке середовище і реєструються приймачем, який розташований на певній відстані від випромінювача.

Швидкість поширення  $C$  поздовжніх акустичних коливань в речовині можна визначити по наступній формулі:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}}, \quad (1.1)$$

де:

$K$  - модуль всебічного стиску, Па;

$\rho$  - щільність речовини, кг / м<sup>3</sup>;

$\chi$  - коефіцієнт стиснення, м<sup>2</sup> / Н.

Таким чином, за швидкістю поширення ультразвуку можна судити про щільність контролюваної речовини.

Тобто, використовуючи п'єзоелектричний перетворювач, який акустично контактує з вимірюваним рідким середовищем, можна отримати вихідний сигнал у вигляді напруги, що є функцією акустичного опору, а, отже, і мірою щільності.

Слід зауважити, що поширення ультразвукових хвиль у будь-якій речовині також супроводжується таким процесом як поглинання звукової енергії, яке характеризується в свою чергу коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ . При цьому інтенсивність ультразвуку  $I$  при проходженні відстані  $d$  зменшується згідно закону:

$$I = I_0 e^{-2\alpha d}, \quad (1.2)$$

де:

$I_0$  - початкова інтенсивність ультразвуку, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - коефіцієнт поглинання, м<sup>-1</sup>;

$d$  - відстань, м.

Ультразвукові густиноміри за різновидністю реалізації методу поділяються на три типи: швидкісні, імпедансні і імпедансно-швидкісні густиноміри.

Швидкісні ультразвукові густиноміри використовують в основному для контролю щільності однорідних речовин, сумішей речовин і газів, а також бінарних розчинів.

Імпедансні густиноміри вимірюють щільність бінарних розчинів, сумішей рідин або газів, однорідних твердих і газоподібних речовин.

Принцип дії імпедансно-швидкісних густиномірів поєднує імпедансний і швидкісний способи вимірювання. Такі густиноміри є в даний час найбільш

перспективними завдяки безконтактності вимірювання і широкої номенклатури контрольованих речовин.

Перевагами ультразвукового методу вимірювання щільності є:

- висока чутливість методу;
- його безконтактність;
- можливість проведення досліджень в потоковому режимі;
- його безінерційність;
- його незалежність від властивостей досліджуваного середовища.

Недоліками даного методу є:

- складність його технічної реалізації;
- необхідність видалення бульбашок газу з контрольованого рідкого середовища.

Серед ультразвукових густиномірів можна виділити прилади наступних компаній: Геотрон (Росія), «TOBIAS Associates» (США), «Cole Mills Limited» (США), Flixim (Німеччина), Haffmans BV (Нідерланди).

У Китаї виробництвом ультразвукових густиномірів займається компанія WESS GLOBAL, INC. У таблиці 1 представлені основні технічні характеристики густиноміра ENV200.

					BB7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

Таблиця 7 - Технічні характеристики густиноміра ENV200

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 2000
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	2
Умови експлуатації: - Споживаний струм, НЕ більше, мА - Діапазон температури навколишнього повітря, °C	20 -20 ... + 70
Інтерфейс	RS232
Середній термін служби, років	10

### 1.3 Вібраційний метод вимірювання щільності

За основу принципу роботи вібраційного густиноміру [4] взята залежність параметрів пружних коливань, які повідомляються трубці (судині) з досліджуваним рідким середовищем або вміщеної в неї тіла, з одного боку, і щільністю рідкої речовини - з іншого боку. Мірою щільності в цьому випадку може бути або амплітуда коливань при постійній частоті, або частота власних коливань резонатора.

Датчик вібраційного густиноміра представляє собою тонкостінний циліндр зі стали. Усередині циліндра розташована електронна автоколивальна система, яка повідомляє циліндру безперервні коливання. Коливання циліндра передаються рідкому середовищу, яке його оточує. Причому частота даних коливань більша, чим менша щільність контрольованого рідкого середовища.

Частоту коливань резонатора можна визначити за наступною формулою:

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi} * \sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot l^3}}, \quad (1.3)$$



де:

$\lambda$ - постійна, що залежить від умов закріплення трубки;

$E$  - модуль пружності матеріалу трубки;

$I$  - момент інерції поперечного перерізу;

$m$  - маса трубки;

$l$  - довжина трубки.

У вібраційних густиномірів чутливі елементи можуть бути виконані у вигляді циліндрів, трубок або пластин, які закріплені в нерухомих підставах. Чутливий елемент вимірювального перетворювача знаходиться в автоколебательному режимі руху спеціальною системою збудження, яка складається з двох розташованих хрест на хрест котушок.

В якості основних переваг вібраційних густиномірів необхідно відзначити:

- висока чутливість;
- висока точність;
- висока надійність;
- можливість проводити вимірювання при високих тисках для різноманітних середовищ;
- безпосереднє перетворення вимірюваної щільності рідкого середовища в частоту вихідного сигналу.

До недоліків вібраційних густиномірів можна віднести:

- нелінійність шкали;

					ВВ7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

- необхідність застосування спеціальних засобів по усуненню впливу температури і тиску навколишнього рідкого середовища на параметри резонатора.

Виробництвом вібраційних густиномірів займаються такі компанії: «АТОМ» (Росія), П'єзоелектрик (Росія), Термекс (Росія), TOBIAS Associates (США), AFT (США), Mettler-Toledo (Швейцарія), Lemis Baltic (Латвія).

У Китаї виробництвом вібраційних густиномірів займається компанія Hangzhou Shuanghong Automation Equipment Co., Ltd. У таблиці 2 представлені основні технічні характеристики густиноміру SHFDT.

Таблиця 8 - Технічні характеристики густиноміра SHFDT

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 3000
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	1
Умови експлуатації:	
- Споживаний струм, НЕ більш, мА	20
- Діапазон температури навколишнього повітря, °С	-40 ... + 85
- Вологість навколишнього повітря, НЕ більш, %	0-90
Інтерфейс	RS232 , RS485
Середній термін служби, років	10

## 1.4 Гідростатичний метод вимірювання щільності

Принцип дії гідростатичних густиномірів [4] заснований на вимірюванні тиску стовпа рідкого середовища постійної висоти. При цьому значення тиску буде пропорційне щільності рідини.

Необхідно відзначити, що в цьому випадку немає особливої необхідності забезпечувати постійний рівень рідкого середовища в резервуарі. В якості вимірювального пристрою вистачить використовувати диференціальний манометр. При такому варіанті підключення дифманометр вимірює різницю тисків  $\Delta p$ , які створюються двома стовпами рідкого середовища  $H_1$  і  $H_2$ . Відзначимо, що різниця  $\Delta H$  стовпів рідкого середовища в цьому випадку постійна при будь-якому рівні рідини в резервуарі, і перепад тисків буде залежити тільки від щільності контрольованої рідини.

Диференціальний гідростатичний густиномір в своєму складі містить два вимірювальних датчика тиску, які встановлені по вертикалі на певній відстані один від одного і підключені до диференціального манометру.

Важливо зауважити, що використання в якості вимірювального пристрою диференціального манометра в гідростатичних густиномірах дозволяє застосовувати подібного типу густиноміри в резервуарах з надлишковим тиском, так як в цьому випадку тиск надає однаковий вплив на обидві камери диференціального манометра і не дає впливу на результат вимірювання щільності.

Гідростатичні густиноміри можна розділити на дві групи:

- вимірювальні прилади, які безпосередньо вимірюють значення тиску стовпа рідкого середовища;

- вимірювальні прилади, які вимірюють значення тиску стовпа рідкого середовища непрямим методом. В цьому випадку, наприклад, може бути використаний п'єзометричний метод.

Перевага гідростатичних густиномірів полягає в тому, що в рідке середовище не занурюються рухливі частини вимірювального приладу. Такі густиноміри можна використовувати для вимірювання щільності в'язких рідин і рідких середовищ, які насичені газом. Крім того, такий тип густиномірів можна використовувати як для відкритих, так і для закритих резервуарів.

Зауважимо, що пружинні датчики щільності є різновидом гідростатичних густиномірів. У пружинних густиномірів зміна щільності вимірюваного рідкого середовища викликає деформацію пружних чутливих елементів, які розміщуються в контрольованому рідкому середовищі.

У Китаї виробництвом гідростатичних густиномірів займається компанія JINAN JIECHUANG AUTOMATION INSTRUMENT посилення CO, Ltd. В таблиці 3 представлені основні технічні характеристики густиноміра JCL21.

Таблиця 9 - Технічні характеристики густиноміра JCL21

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 3000
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	2
Умови експлуатації:	
-Споживана ток, НЕ більш, мА	20
-Діапазон температури навколишнього повітря, °C	-25 ... +85
- Вологість навколишнього повітря, НЕ більш, %	0 - 90
Інтерфейс	RS485
Середній термін служби, років	4

## 1.5 Ємнісний метод вимірювання щільності

Ємнісний метод [4] вимірювання щільності заснований на вимірюванні значення ємності конденсатора, що складається з вимірювальних електродів, занурених у контрольовану рідину і безпосередньо самим рідким середовищем, контроль параметрів якого здійснюють.

Діелектрична проникність є параметром матеріалу, який характеризує здатність даного матеріалу утворювати електричну ємність. Діелектрична проникність показує у скільки разів, збільшиться ємність конденсатора в порівнянні з вакуумом, якщо між пластинами конденсатора помістити даний матеріал, не змінюючи при цьому габарити конденсатора.

Запишемо математичний вираз, що визначає опір ділянки речовини що міститься між пластинами конденсатора:

$$R = \frac{\rho}{l}, \quad (1.4)$$

де:

$R$  - опір ділянки середовища;

$\rho$  - щільність вимірюваного середовища;

$l$  - приведена довжина конденсатора.

Запишемо математичний вираз, що визначає ємність конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon * l, \quad (1.5)$$

де:

$C$  - ємність ділянки середовища;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

$\epsilon_0$  - електрична постійна;

$\epsilon$  - діелектрична проникність речовини що міститься між пластинами конденсатора.

Тоді:

$$C * R = \epsilon_0 * \epsilon * \rho, \quad (1.6)$$

Звідки:

$$C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon * \rho}{R}, \quad (1.7)$$

Таким чином, ємність конденсатора залежить від діелектричної проникності і щільності контрольованого середовища.

Важливо зауважити, що густиноміри даного типу можна використовувати для вимірювання як неелектропровідних, так і електропровідних рідких середовищ. Якщо рідке середовище є електропровідним, то в цьому випадку застосовують первинні вимірювальні перетворювачі з одним вимірювальним електродом, який покривають шаром ізоляції. Другим вимірювальним електродом в цьому випадку є контрольоване рідке середовище. Крім того, свідчення таких густиномірів залежать від діелектричної проникності контрольованого середовища, яке може змінюватися при зміні температури. Зауважимо, що істотно зменшити вплив температури на показання можна за допомогою застосування компенсаційних ємностей.

Перерахуємо переваги ємнісних густиномірів:

- висока надійність;
- простота, зручність монтажу та обслуговування;

- можливість проводити вимірювання в широкому діапазоні тиску для різноманітних середовищ;
- можливість проводити вимірювання в широкому діапазоні температур для різноманітних середовищ;
- придатні для вимірювання щільності як агресивних, так неагресивних рідких середовищ;
- потенційно висока точність вимірювань.

До недоліків ємнісних густиномірів відносять:

- висока чутливість до зміни електричних властивостей контрольованого рідкого середовища;
- налипання контрольованого рідкого середовища на вимірювальні елементи первинного перетворювача;
- поява, внаслідок хімічної активності рідкого середовища, на вимірювальних елементах первинного перетворювача електропровідної плівки.

Серед сучасних вимірювальних приладів цього типу можна вказати густиноміри наступних компаній: «АТОМ» (Росія), «Геотрон» (Росія), TOBIAS Associates (США).

У Китаї виробництвом ємнісних густиномірів займається компанія Sengxi. У таблиці 4 представлені основні технічні характеристики густиноміра FWC & D-A1.

					ВВ7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Таблиця 10 - Технічні характеристики густиноміра FWC & D-A1

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 1000
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	1
Умови експлуатації:	
- Споживаний струм, НЕ більш, мА	20
- Діапазон температури навколишнього повітря, °С	-40 ... +65
Інтерфейс	RS485
Середній термін служби, років	12

### 1.6 Об'ємно-ваговий метод вимірювання щільності

Об'ємно-ваговий метод [4] заснований на безперервному зважуванні деякого постійного обсягу контрольованого рідкого середовища, що протікає по трубі (каналу). Щільність даного рідкого середовища потім розраховують по відомому співвідношенню:

$$\Delta G = 0.25 * \pi * d^2 * (\pi * R + 2 * L) * (\rho - \rho_0) * g, \quad (1.8)$$

де:

$d$  - внутрішній діаметр труби;

$R$  - радіус вигину труби;

$\rho_0$  - початкове значення щільності рідкого середовища;

$\rho$  - поточне значення щільності рідкого середовища.

Таким чином, зміна щільності рідкого середовища призводить до відповідної зміни ваги речовини.



За різновидом реалізації даний метод вимірювання щільності підрозділяється на кілька варіантів: п'єзометричний, об'ємометричний, пікнометричний, адсорбційний і дилатометричний.

Для технічної реалізації зазначених вище способів об'ємно-вагового методу вимірювання щільності рідких середовищ використовують відповідно наступні вимірювальні засоби: п'єзометри, об'ємоміра, ареопікнометри і мікропікнометри, адсорбційні густиноміри і дилатометри.

Для дослідження залежності значень щільності рідкого середовища від значень тиску і температури використовують п'єзометри. Відзначимо, що в даний час існують два різновиди п'єзометрів: постійного і змінного обсягу. У п'єзометрах першого типу вимірюють масу рідкого середовища, а обсяг п'єзометра весь час залишається постійним. При цьому маса рідини є змінною величиною, яка залежить від значень температури і тиску контрольованої речовини. Для другого типу п'єзометрів виміряна маса контрольованого рідкого середовища є постійною величиною, а обсяг змінюється зі зміною значень температури і тиску.

Робота сучасних моделей пікнометричних густиномірів заснована на безперервному зважуванні обсягу зразка рідкого середовища, що протікає по каналу. Необхідно відзначити, що в даний час існує декілька різновидів пікнометрів. Застосування зазначених засобів вимірювання визначається властивостями досліджуваного рідкої речовини, її кількістю і значенням необхідної точності при вимірюванні щільності.

Однією з різновидів сучасного пікнометра є ареопікнометри. Відзначимо, що ареопікнометри використовують для вимірювання щільності рідких середовищ малих обсягів.

Дилатометри представляють собою калібрований посуд з вузькою горловиною, на якому розміщується кільцева мітка. Форма у такого посуду може

бути або циліндричної, або ковба подібної форми. Контрольоване рідке середовище з відомим значенням маси в процесі виконання вимірювань наповнює такий посуд. Обсяг речовини в цьому випадку визначають шляхом вимірювання значення висоти рівня рідкого середовища до мітки на горловині з допомогою катетометру. Шукане значення щільності рідини потім визначають по формулі.

Основними перевагами об'ємно-вагового методу є:

- незалежність показань від властивостей рідкого середовища;
- незалежність показань від швидкості протікання рідкого середовища;
- можливість застосування для в'язучих рідких речовин;
- можливість проводити вимірювання при підвищеному значенні тиску;
- відсутність осадження на вимірювальному перетворювачі твердих частинок, які присутні в потоці контрольованого рідкого середовища;

До недоліків об'ємно-вагового методу відносять:

- обов'язковою умовою проведення вимірювань є відсутність газових включень (бульбашок) в потоці контрольованого рідкого середовища.

Густиноміри, в яких реалізований даний метод вимірювання, виробляють такі компанії як: Склоприлад (Росія), Elcometer Limited (Великобританія), Simax (Чехія), Euro Sistem Srl (Італія), Spectro (США).

У Китаї виробництвом об'ємно-вагових густиномірів займається компанія Bei Shi De. У таблиці 5 представлені основні технічні характеристики густиноміра 3Н-2000ТD.

					BB7106.414151.001 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 11 - Технічні характеристики густиноміра ЗН-2000TD

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 9999
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	0,0001
Умови експлуатації: - Споживаний струм, НЕ більш, мА - Діапазон температури навколишнього повітря, °С	20 0 ... +40
Інтерфейс	RS485
Середній термін служби, років	12

### 1.7 Попларково-ваговий метод вимірювання щільності

В даний час найбільш простими засобами вимірювання щільності, які використовуються у рідких середовищах, є ареометри.

В основі даного методу вимірювання покладено закон Архімеда. Згідно цього методу спочатку вимірюють значення виштовхувальної сили, яка діє на занурений в контрольоване рідке середовище, поплавок. Потім розраховують значення щільності рідкого середовища, використовуючи наступне співвідношення:

$$F(x) = \rho_0 * g \int_{h-x}^h S(x) dx + \rho * g \int_0^x S(x) dx, \quad (1.9)$$

де:

$\rho_0$  - щільність газового середовища над рідиною;

$g$  - прискорення вільного падіння;

$\rho$  - щільність рідкого середовища, в яке занурений поплавок;

$S$  - площа перетину поплавка.

Існують два різновиди технічної реалізації поплавково-вагових густиномірів (ареометрів): з повністю або частково зануреним поплавцем. У вимірювальних приладах першого типу (з повністю зануреним поплавцем) вимірюють діючу на поплавок виштовхуючу силу, значення якої буде пропорційне значенню щільності нафтопродуктів. Мірою щільності нафтопродуктів в вимірювальних приладах другого типу є значення глибини занурення поплавка, що має певну форму і постійну масу.

Ареометри постійної маси (з плаваючим поплавцем) застосовують для визначення щільності однорідних і чистих рідин. Ареометри даного типу представлені безліччю різновидів в залежності від конструктивного виконання і форми поплавця. Головний недолік у таких ареометрів є низька точність вимірювання. Крім того, у ареометрів даного типу існує проблема забруднення поплавка, яка вирішується шляхом ультразвукового впливу на поплавок або використання примусової вібрації поплавка. Однак таке технічне рішення проблеми забруднення поплавка призводить до значного ускладнення структури побудови засоби вимірювання.

Незважаючи на необхідність виконання попередньої підготовки проби, ареометри постійного об'єму (з повністю зануреним поплавцем) мають більш рівномірну шкалу, ніж ареометри постійної маси і мають меншу похибку вимірювання.

Сучасні прилади даного типу випускають ряд компаній: Атом (Росія), ТОВ «Союзцветметавтоматика» (Росія), TOBIAS Associates (США), Lemis Baltic (Латвія).

У Китаї виробництвом поплавочно-вагових густиномірів займається компанія Beijing Instrument Connaught Electronic Technology Co., Ltd. У таблиці 6 представлені основні технічні характеристики густиноміра DH-300L.

					BB7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

Таблиця 12 - Технічні характеристики густиноміра DH-300L

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	1 - 99999
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	1
Умови експлуатації:	
- Споживаний струм, НЕ більш, мА	20
- Діапазон температури навколишнього повітря, °C	<100
Інтерфейс	RS232
Середній термін служби, років	7

### 1.8 Оптичний метод вимірювання щільності

Необхідно відзначити, що даний метод [4] вимірювання щільності рідкого середовища може бути реалізований на ефекті Фізо - Фрінелі або на ефекті Доплера. Ефект Фізо - Фрінелі полягає в захопленні світла рухливого рідкого середовища, а ефект Доплера полягає в розсіюванні світла рухомими частинками рідкого середовища.

Залежно від технічної реалізації даного методу розрізняють кілька різновидів засобів вимірювань:

- калориметричні густиноміри;
- нефелометричні густиноміри;
- поляриметричні густиноміри;
- Рефрактометричні густиноміри.

Калориметр представляє собою прилад, призначений для вимірювання кількості теплоти, що виділяється або поглинається у будь-якому фізичному або хімічному процесі.

Нефелометр є оптичним приладом, який дозволяє виміряти ступінь каламутності рідкого середовища по інтенсивності розсіювання рідиною світла.

Поляриметр представляє собою прилад, який дозволяє вимірювати кут обертання площини поляризації, викликаній оптичною активністю рідкого середовища.

Рефрактометр являє собою прилад, який дозволяє вимірювати показник заломлення світла в рідкому середовищі.

Густиноміри принцип роботи, яких заснований на оптичному методі, випускають такі компанії як Spectro (США), Euro Sistem Srl (Італія).

У Китаї виробництвом оптичних густиномірів займається компанія Yite Nuo Electronic Technology Co., Ltd. У таблиці 7 представлені основні технічні характеристики густиноміра DM8.

Таблиця 13 - Технічні характеристики густиноміра DM8

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	0 - 9999
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	0,1
Умови експлуатації:	
-Діапазон температури навколишнього повітря, °C	+15 ... +100
Інтерфейс	RS232 , USB
Середній термін служби, років	20

## 1.9 Радіоізотопний метод вимірювання щільності

Радіоізотопний метод [4] заснований на вимірюванні ослаблення проникаючої радіації при проходженні через досліджуване рідке середовище.

Слід зазначити, що радіоізотопний метод вимірювання щільності застосовують для безперервних вимірювань. Радіоізотопні густиноміри є безконтактними засобами вимірювання щільності рідких середовищ і застосовуються для контролю дуже агресивних середовищ з високою в'язкістю або при перебуванні під високим тиском. Радіоізотопні густиноміри використовують тільки в тих випадках, коли інші типи густиномірів не застосовуються.

У радіоізотопних густиномірах рідких середовищ використовують бета-випромінювання або гамма-випромінювання. Бета-випромінювання являє собою потік позитронів або електронів. Гамма-випромінювання - це електромагнітні коливання, у яких дуже мала довжина хвилі. Важливо відзначити, що гамма-промені характеризуються більш проникаючою здатністю у порівнянні з бета-частинками. Проходження гамма-променів через рідку речовину супроводжується послабленням їх інтенсивності. З допомогою гамма-випромінювання виміряти значення щільності рідкої речовини можливо двома способами.

Найважливішою перевагою радіоізотопних густиномірів є можливість виконувати вимірювання щільності рідких речовин розташованих в важкодоступних місцях.

Недоліками такого типу густиномірів є залежність показань від фізичних властивостей досліджуваного зразка і складність технічної реалізації.

У Китаї виробництвом радіоізотопних густиномірів займається компанія Haiming Technology Co., Ltd. У таблиці 8 представлені основні технічні характеристики густиноміра HDS-DN.

Таблиця 14 - Технічні характеристики густиноміра HDS-DN

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювання щільності, кг/м <sup>3</sup>	400 - 4000
Абсолютна похибка вимірювання, кг/м <sup>3</sup>	4
Умови експлуатації:	
- Споживаний струм, НЕ більш, мА	20
- Діапазон температури навколишнього повітря, °C	0 ... +45
Інтерфейс	RS485
Середній термін служби, років	20

## 2. Оцінка ефективності застосування ультразвукового вимірювача щільності нафти та нафтопродуктів

Швидкість поширення ультразвуку в рідинах може бути розрахована на підставі їх фізико-хімічної будови, однак аналіз літературних даних виявляє мінливість вуглеводневого сполучення нафти і нафтопродуктів. Тому, не дивлячись на всі переваги, теоретичний розрахунок швидкості поширення ультразвуку в нафті і нафтопродуктах затруднений і практично неможливий.

Для розрахунку значень швидкості звуку представляється можливим встановлення емпіричної залежності для нафти і нафтопродуктів. Зміна швидкості звуку при зміні температури в основному визначається температурною залежністю стисливості рідини. У всіх органічних рідинах, до яких відносяться вуглеводень, стисливість значно збільшується при підвищенні температури, що викликає зменшення швидкості звуку за лінійним законом:



$$V = V_0 + \alpha_1 * \Delta t, \quad (2.1)$$

де:

$V_0$  - початкова швидкість звуку

$\alpha_1$  - температурний коефіцієнт

$\Delta t$  - зміна температури

У нафти і більшості нафтопродуктів спостерігається також лінійна залежність щільності від температури і для них справедливе співвідношення:

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{t_2 - t_1} = \alpha, \quad (2.2)$$

де:

$\rho_1$  та  $\rho_2$  - щільності нафти при температурах  $t_1$  і  $t_2$  відповідно

$\alpha$  - постійна для кожного нафтопродукту величина, що виражає залежність щільності від температури.

Для вивчення природи ультразвуку в нафті і нафтопродуктах дуже важливим є дослідження поширення ультразвукових хвиль не тільки в чистих вуглеводнях, таких як пентан, гексан, гептан, толуол і т.д., де спостерігається збільшення швидкості поширення ультразвуку зі збільшенням молекулярного ваги і, відповідно, щільності, а й в їх сумішах. Суміші поділяються на нормальні і суміші асоційованих компонентів. Для випадку, коли молекули хоча б одного з компонентів асоційовані, наприклад, за допомогою вуглеводних містків, які руйнуються при введенні другого компонента, характер залежності швидкості поширення ультразвуку і адіабатичній стисливості від концентрацій складової асоційованої суміші має досить складний характер і прогнозування їх поведінки при великій кількості компонентів в суміші завдання вельми складне.

Компоненти нормальної суміші підпорядковується відомому закону адитивності:

Для швидкості ультразвуку:

$$V_{\text{см}} = V_1 * V_{w1} + V_2 * (1 - V_{w1}), \quad (2.3)$$

де:

$V_1$  та  $V_2$  – швидкість ультразвуку першого та другого компоненту

$V_{\text{см}}$  - швидкість ультразвуку в суміші

$V_{w1}$  - вагова концентрація першої суміші

Для щільності:

$$\rho_{\text{см}} = C_1 * \rho_1 + C_2 * \rho_2, \quad (2.4)$$

де:

$C_1$  і  $C_2$ - середні концентрації компонентів в суміші

Оскільки нафту і нафтопродукти являють собою багатокомпонентну нормальну суміш вуглеводнів, для розрахунків можливе застосування закону адитивності з урахуванням того, що:

-У важких нафтопродуктах температурні залежності швидкості поширення ультразвуку і щільності виражені слабше, ніж в легких;

-Існує однозначна кореляція між положенням температурної залежності швидкості ультразвуку і щільності на відповідних графіках нафтопродуктів.

### 3. Розробка структурної схеми

Принцип роботи системи вимірювання наступний. На рис. 2 показано 3 канали вимірювання:

1 – вимірювання температури досліджуваного середовища

2 – вимірювання густини нафтопродукту

3 – вимірювання рівня нафтопродукту

Сама структурна схема має наступний вигляд:

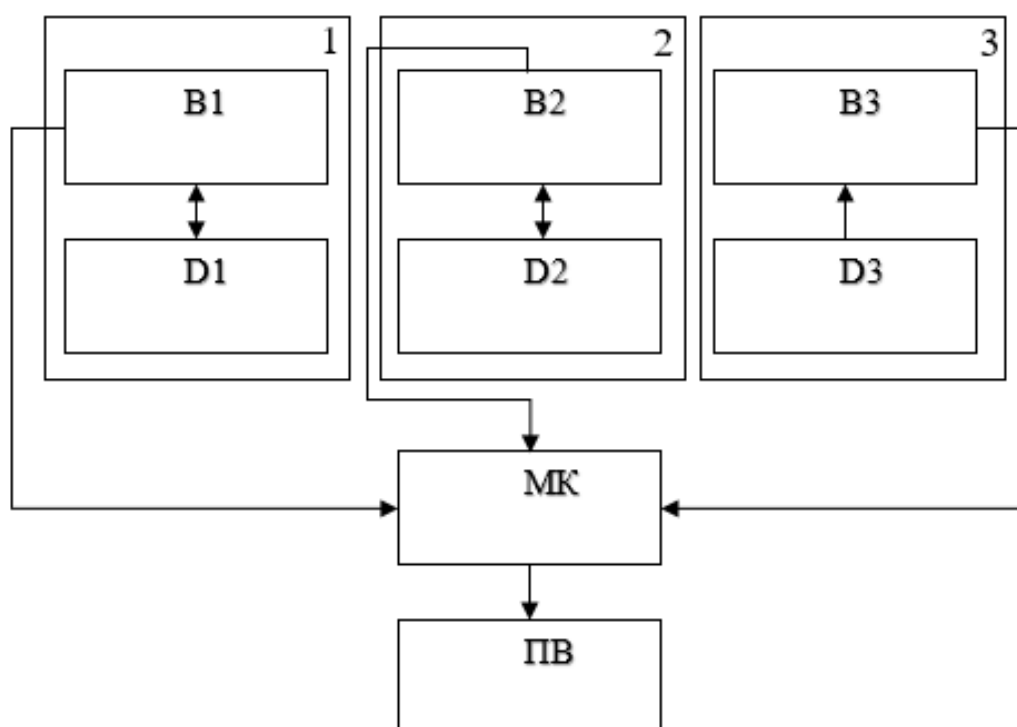


Рис.2 Структурна схема вимірювача

B1 – електроакустичний передавальний датчик (1)

D1 – електроакустичний приймаючий датчик (1)

B2 – електроакустичний передавальний датчик (2)

D2 – електроакустичний приймаючий датчик (2)

ВЗ – електроакустичний передавальний датчик (З)

DЗ – електроакустичний приймаючий датчик (З)

МК – мікрокомп'ютер

ПВ – панель виводу

Ультразвукові коливання створюються і приймаються електроакустичними перетворювачами В1-ВЗ та D1-D3. Усі ці датчики підключені до мікрокомп'ютера МК, який і робить сумісну обробку усіх вимірювань і далі усі результати вимірювань виводяться на панель виводу інформації ПВ.

Порядок вимірювання наступний:

Спочатку проводиться вимір температури нафтопродукту резистивним датчиком температури. Далі двома електроакустичними датчиками, які встановлені уздовж контрольованої зони, проводиться вимірювання швидкості проходження ультразвуку в нафті. Маючи усі ці данні можна ввести температурну поправку та дізнатися густину нафти при певній температурі (20°C). Далі двома такими ж ультразвуковими датчиками проходить вимірювання рівня нафти. Єдина різниця в тому, що датчики розташовані поперек контрольованого середовища, оскільки імпульс, який виходить з передавального датчика, відбивається від дна резервуара та надходить до другого, приймального датчика. Далі усі данні надходять до мікрокомп'ютера, який і виконує усі обчислення та виводить результати вимірювання на панель виводу.

#### 4. Залежність поширення ультразвуку від температури та щільності в середовищі

Залежність швидкості поширення ультразвуку від щільності для досліджуваної рідини формують шляхом порівняння отриманого в результаті вимірювання значення швидкості і розрахункових значень, визначення двох найменших абсолютних відхилень і побудови теоретичної залежності швидкості від щільності вже для досліджуваної рідини за величинами цих відхилень.

Таблиця – 15 Відомі дані для розрахунку густини

Рідина	V(T)=aT+b		$\rho(T) = aT + b$		$\rho(V) = aV + b$	
	a	b	a	b	a	b
Бензин AI-92	-4,4892	2525,5	-0,8025	996,3	0,1788	544,6
Бензин AI-80	-4,5617	2492,5	-0,8351	962,6	0,1831	506,2
66% 80 + 33% 92	-4,8238	2531,2	-0,897	996,5	0,1947	504,2
50% 80 + 50% 92	-4,5625	2528,9	-0,8705	969,9	0,1901	516,4
33% 80 + 66% 92	-4,4583	2504,1	-0,8126	988,1	0,1826	531,1

Таблиця – 16 Розрахунок густини

Рідина	Розрахунок при $T^{\circ} = 280K$	Розбіжність	Нові коефіцієнти	Значення густини
100% 80	T=280  V=1215.224			$\rho=728,7075$  (По своїй кривій)
За AI-92	V=1265.524	d1=53.3	a'=0,1831	$\rho=728,7075$
За AI-80	V=1215.224	d2=0	b'=506,2	(За теор залеж.)
66% 80 + 33% 92	T=280  V=1236,536			P=744,9536  (По своїй кривій)

3а AI-92	V=1268,524	d1=31,988	a'=0,181381	$\rho=745,8379$
3а AI-80	V=1215.224	d2=21,312	b'=521,5542	(За теор. залеж.)
50% 80 + 50% 92	T=280			$\rho=753,2266$
	V=1245,8			(По своїй кривій)
3а AI-92	V=1268.524	d1=22,724	a'=0,180633	$\rho=753,2614$
3а AI-80	V=1215.224	d2=30,576	b'=5228,2285	(За теор залеж.)
33% 80 +66% 92	T=280			$\rho=760,4047$
	V=1255.776			(По своїй кривій)
3а AI-92	V=1268,524	d1=12,748	a'=0,179828	$\rho=761,24$
3а AI-80	V=1215.224	d2=40,552	b'=535,4157	(За теор залеж.)
100% 92	T=280			$\rho=771,4121$
	V=1268,524			(По своїй кривій)
3а AI-92	V=1268.524	d1=0	a'=0,1788	$\rho=771,4121$
3а AI-80	V=1215.224	d2=53,3	b'=544,6	(За теор залеж.)

На підставі обчисленої швидкості поширення ультразвуку  $V_{\text{вим}}$  і температури контрольованої рідини  $T_{\text{вим}}$  вибирають дві прилеглі залежності швидкості поширення ультразвуку від температури з сімейства попередньо встановлених калібрувальних залежностей. Вибір прилеглих залежностей виробляють підстановкою виміряної температури  $T_{\text{вим}}$  в кожен з попередньо встановлених калібрувальних залежностей швидкості поширення ультразвуку від температури  $V(T)$  для всього класу рідин, обчисленням розрахункового значення швидкості поширення ультразвуку  $V_i$  для кожної залежності за формулою:

$$V_i = k_i * T_{\text{вим}} + q_i, \quad (4.1)$$

де:

$k_i$  і  $q_i$  - постійні коефіцієнти для кожної рідини з усього класу

Та визначенням абсолютних відхилень:

$$\Delta V_i = |V_{\text{вим}} - V_i|, \quad (4.2)$$

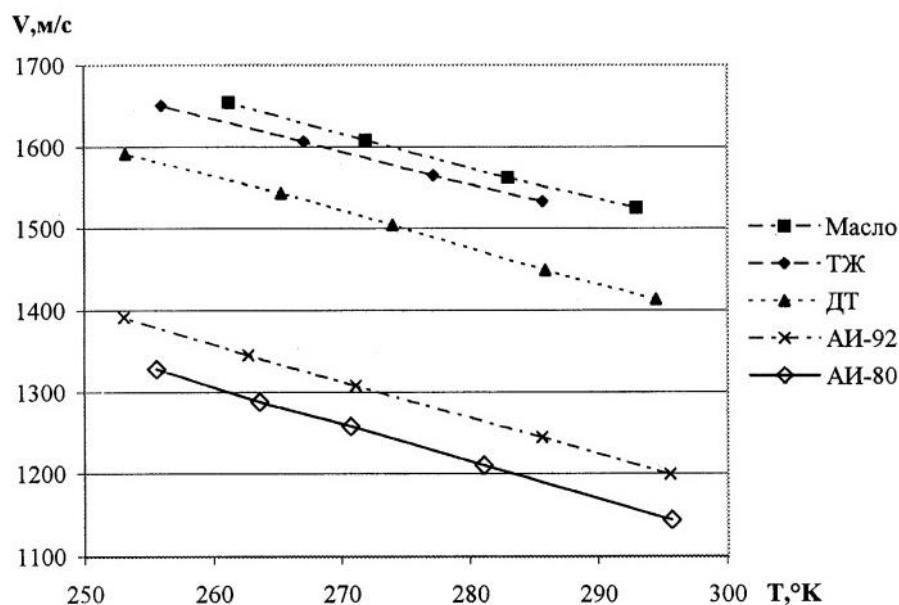


Рис. 3 Залежності швидкості поширення ультразвуку від температури

На рис. 3 наведено приклади залежності швидкості поширення ультразвуку від температури для класу нафтопродуктів, що включає моторне масло, гальмівну рідину, дизельне паливо, бензин АИ-92 і бензин АИ-80. Два найменших відхилення  $\Delta V_i$  і  $\Delta V_{i+1}$  визначають прилеглі залежності  $V_1(T)$  і  $V_2(T)$  з сімейства попередньо встановлених залежностей. У разі рівності нулю одного з відхилень, наприклад  $\Delta V_i$ , (точний збіг попередньо встановленої залежності  $V(T)$  з аналогічною залежністю досліджуваної рідини) виконують перерахунок виміряної швидкості поширення ультразвуку  $V_{\text{вим}}$  в щільність  $\rho$  по співвідношенню:

$$\rho = a_i * V_{\text{вим}} + b_i, \quad (4.3)$$

де:

$a_i$  і  $b_i$  - постійні коефіцієнти перерахунку для виділеної рідини

На рис. 4 наведено приклади залежності швидкості поширення ультразвуку від щільності для класу нафтопродуктів, згаданого вище, за якими проводять перерахунок швидкості поширення ультразвуку в щільність рідини.

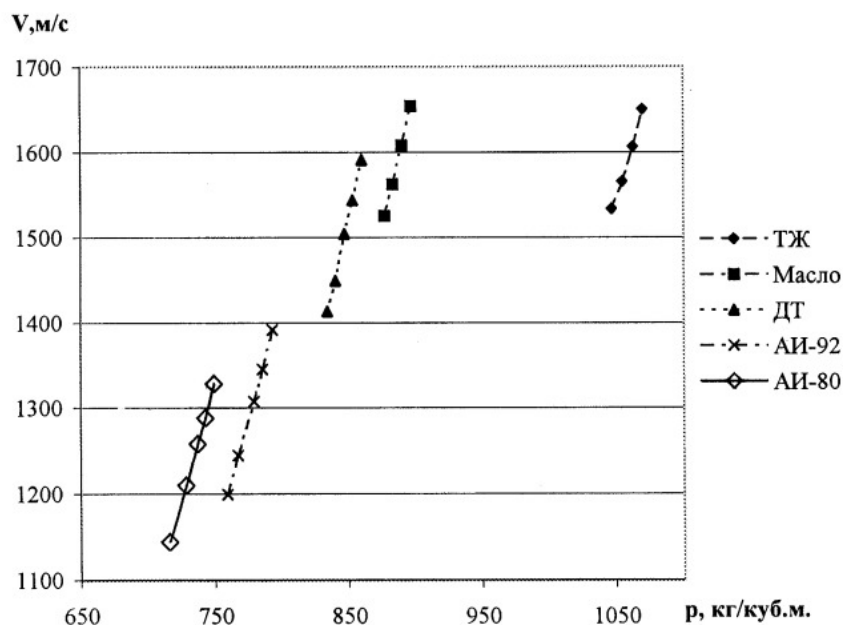


Рис. 4 Залежності швидкості поширення ультразвуку від щільності

У разі нерівності нулю жодного з двох відхилень (досліджувана рідина має залежність  $V(T)$ , не збігається з попередньо встановленими), як показано на рис. 5, перерахунок швидкості поширення ультразвуку в щільність рідини виробляють по теоретично встановленої залежності:

$$\rho = \left( a_1 * \frac{\Delta v_2}{\Delta v_1 + \Delta v_2} + a_2 * \frac{\Delta v_1}{\Delta v_1 + \Delta v_2} \right) * V_{\text{вим}} + \left( b_1 * \frac{\Delta v_2}{\Delta v_1 + \Delta v_2} + b_2 * \frac{\Delta v_1}{\Delta v_1 + \Delta v_2} \right), \quad (4.4)$$

де:

$a_1, a_2$  і  $b_1, b_2$  - постійні коефіцієнти перерахунку для двох сусідніх залежностей  $V_1(T)$  і  $V_2(T)$



$\Delta v_1$  і  $\Delta v_2$  - абсолютні значення відхилень швидкостей, розрахованих по попередньо встановленим залежностям  $V_1(T)$  і  $V_2(T)$  і вимірної швидкості  $V_{\text{вим}}$

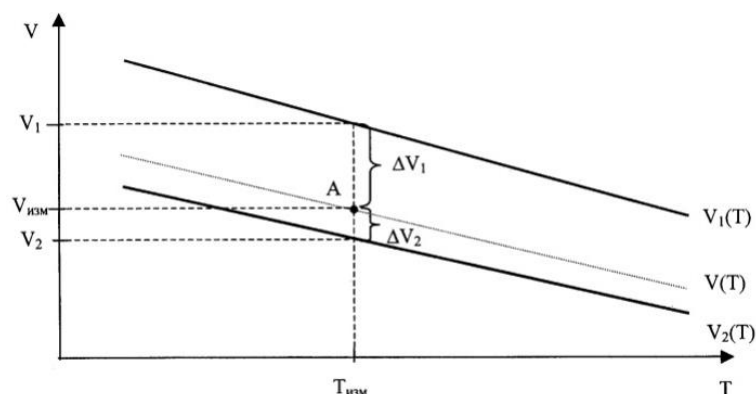


Рис. 5 Нерівність нулю жодного з двох відхилень

Як приклад на рис. 6 представлені залежності швидкості поширення ультразвуку від температури для бензинів АІ-80, АІ-92 і їх сумішей, залежно  $V(T)$  яких знаходяться між аналогічними залежностями бензинів і видалення від відповідної кривої знаходиться в зворотній залежності від вкладу даного типу бензину в суміш бензинів.

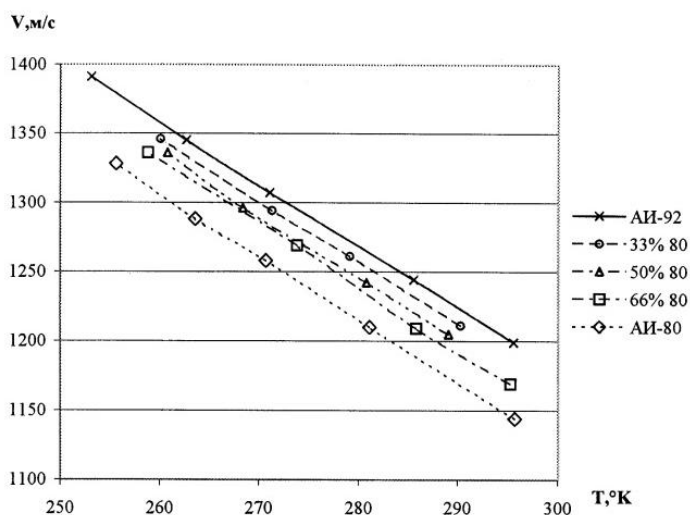


Рис. 6 Залежності швидкості поширення ультразвуку від температури для бензинів АІ-80, АІ-92 і їх сумішей

На рис. 7 представлені залежності швидкості поширення ультразвуку від щільності для бензинів АІ-80, АІ-92 і їх сумішей, за якими виконується перерахунок швидкості поширення ультразвуку в щільність рідини. Залежно  $V$  ( $\rho$ ) сумішей бензинів знаходяться також між аналогічними залежностями бензинів АІ-80 і АІ-92 і видалення від відповідної кривої також знаходиться в зворотній залежності від вкладу даного типу бензину в суміш бензинів.

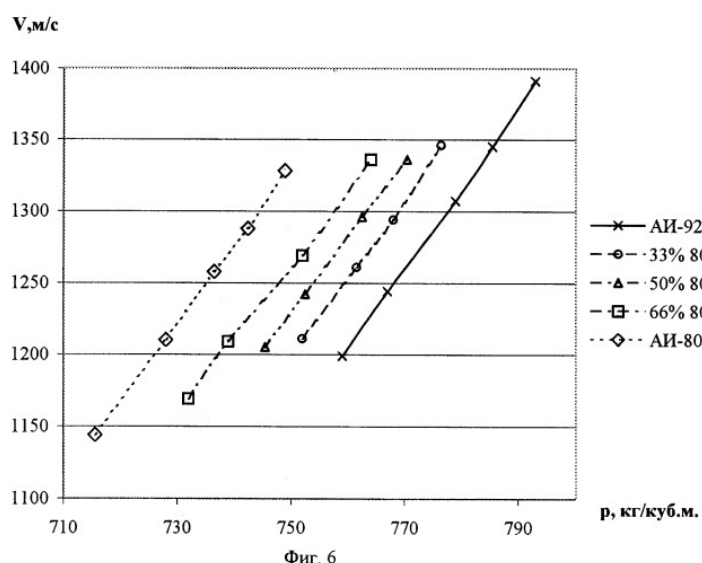


Рис. 7 Залежності швидкості поширення ультразвуку від щільності для бензинів АІ-80, АІ-92 і їх сумішей

В таблиці 10 наведено приклад розрахунку щільності деяких сумішей бензинів, вироблений за заздалегідь встановленим залежностям і по залежностям, теоретично встановленим в результаті вимірювань. Похибка визначення щільності при такому способі не перевищує 1 кг / м<sup>3</sup>.

Схожий характер залежностей швидкості поширення ультразвуку від температури в промисловому діапазоні, незначно відрізняються коефіцієнтами нахилу, дозволяє виробляти автоматичну ідентифікацію контрольованої рідини з класу рідин зі схожими фізико-хімічними властивостями, формувати теоретичні залежності швидкості поширення ультразвуку від щільності для сумішей рідин з цього ж класу і обчислювати їх щільність.

## 5. Алгоритм роботи системи вимірювання

На рисунку 8 наочно продемонстровано алгоритм роботи системи вимірювання густини та рівня досліджуваного нафтопродукту:

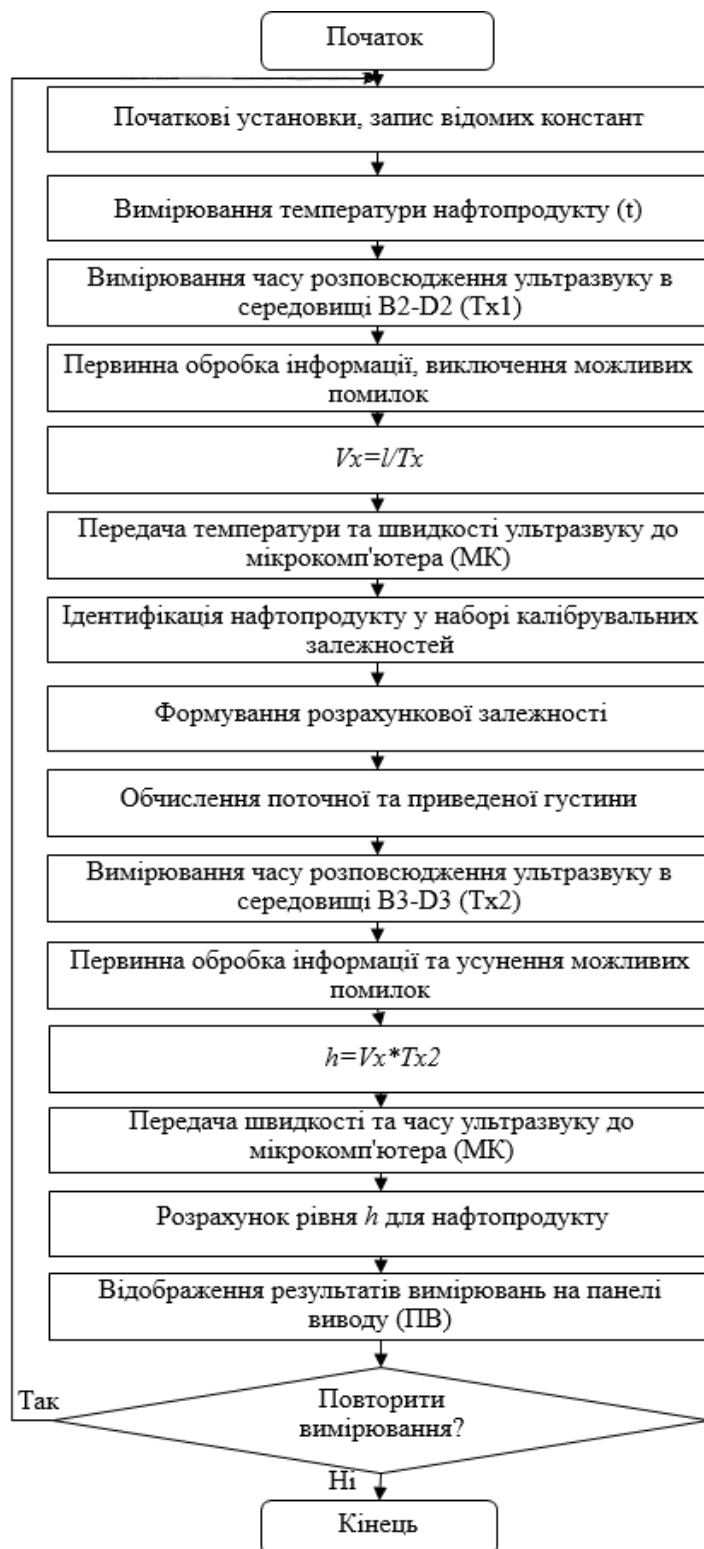


Рис.8 Алгоритм роботи системи вимірювання густини та рівня НП

## 6. Функціональна схема системи вимірювання

Принцип роботи системи вимірювання наступний:

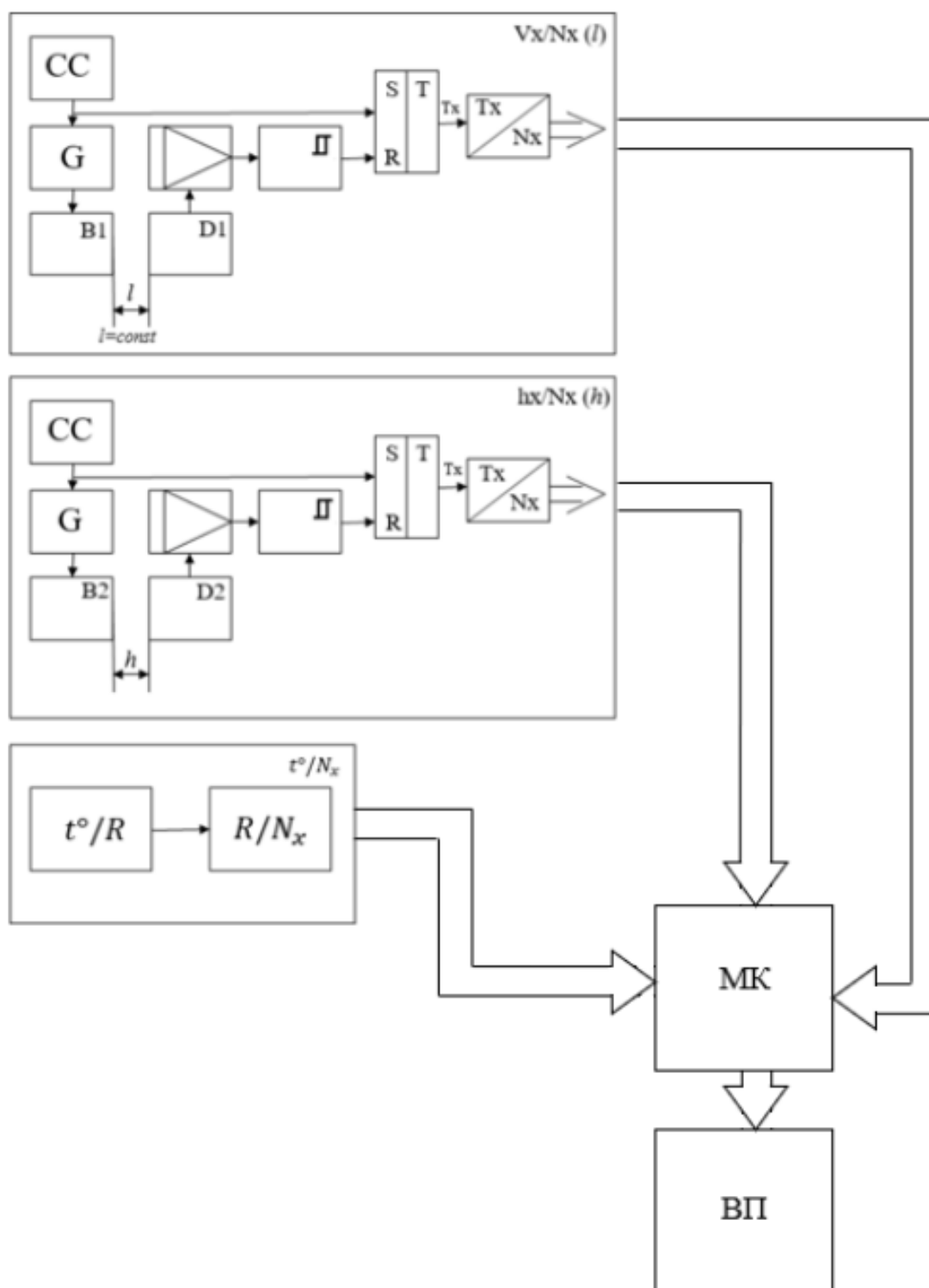


Рис. 9 Функціональна схема вимірювання

На рис. 9 демонструється функціональна схема вимірювання. Усього 3 канали:

$V_x/N_x(l)$  – канал вимірювання швидкості ультразвуку в нафтопродукті

$h_x/N_x(h)$  – канал вимірювання рівня нафтопродукту

$t^\circ/N_x$  – канал вимірювання температури нафтопродукту

Схема синхронізації подає імпульс на генератор, а він вже в свою чергу збуджує випромінюючий датчик. Цей імпульс приймає інший електроакустичний датчик та потребує підсилення, оскільки після проходження імпульсу через контрольоване середовище, до приймаючого датчика доходить дуже слабкий сигнал в mV (відстань між випромінюючим та приймаючим датчиками  $l=const$ ). Після підсилювача сигналу, імпульс надходить до тригера Шмітта який виділяє фронт і далі поступає на RS-тригер. Перший імпульс який надходить з схеми синхронізації на генератор ставить тригер в одиницю, а другий з схеми синхронізації скидає його. На виході ми отримуємо імпульс інтервалом  $T_x$ , який надходить до вимірювача часового інтервалу, а саме перетворювач  $T_x/N_x$ . На цьому етапі ми маємо можливість розрахувати швидкість проходження ультразвуку, чим і займається мікрокомп'ютер:

$$V_x = \frac{l}{T_x}, \quad (6.1)$$

де:

$V_x$  – швидкість імпульсу в середовищі

$l$  – відстань між 2-ма датчиками

$T_x$  – час

Після знаходження швидкості, ми можемо розрахувати саму густину нафтопродукту за формулою:

$$\rho = F(V_x), \quad (6.2)$$

де:

$\rho$  – густина нафтопродукту

$F$  – функціонал (табл. знач.)

$V_x$  – швидкість ультразвуку

Алгоритм роботи вимірювача рівня нафтопродукту аналогічний з вимірюванням густини. Єдина різниця у розташуванні електроакустичних датчиків у контрольованому середовищі та при вимірюванні густини береться до уваги температура контрольованого середовища, а саме нафтопродукту, яка вимірюється резистивним датчиком температури. При вимірюванні рівня нафтопродукту, температура рідини вже відома і швидкість проходження ультразвуку враховується вже з температурною поправкою. Формула розрахунку рівня нафтопродукту в ємності має наступний вигляд:

$$h = V_x * T_{x2}, \quad (6.3)$$

де:

$h$  – рівень нафтопродукту

$V_x$  – швидкість імпульсу в середовищі

$T_{x2}$  – час

## 7. Принцип роботи цифрового вимірювача часового інтервалу

При ультразвуковому методі вимірювання рівня або густини нафти нам в будь-якому випадку необхідно дізнатися час проходження ультразвукового сигналу в серидовищі. Завдяки цій інформації ми зможемо визначити швидкість ультразвуку в серидовищі та в подальшому дізнатися як густину, так і рівень нафтопродукту. Тому в даній роботі необхідне використання цифрового вимірювача часового інтервалу.

Періодомір призначений для вимірювання тривалості періоду коливань гармонічних сигналів та тривалості імпульсів різної форми. Складається він з RS-триггеру, генератора квантуючих імпульсів (ГКІ), ключа К, лічильника, регістру, цифрового відлікового пристрою (ЦВП), пристрою керування (ПК).

Структурну схему періодоміру наведено на рис. 10.

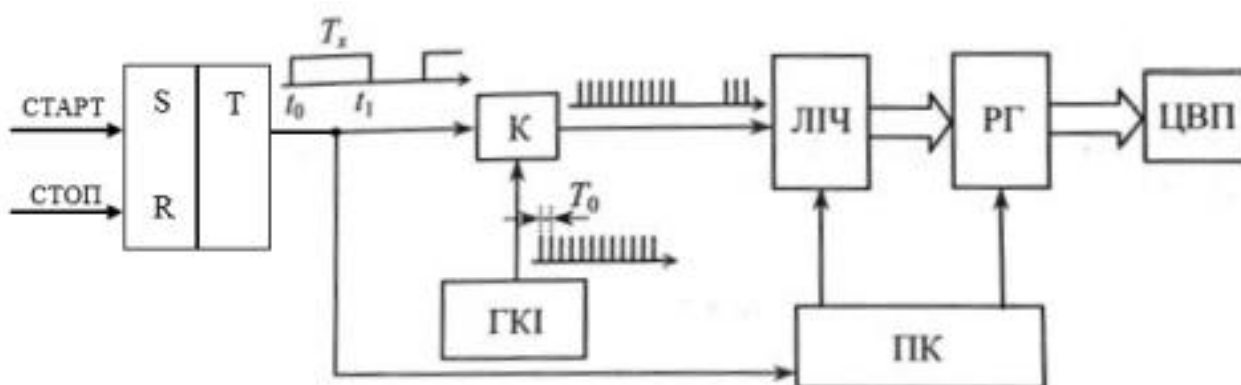


Рис. 10 - Структурна схема періодоміра

Принцип дії цифрового вимірювача часового інтервалу полягає в підрахунку кількості квантуючих імпульсів, що пройшли на лічильник за час вимірюваного періоду. Досліджуваний періодичний сигнал подається на RS-тригер, на виході якого отримуємо імпульси, тривалість яких дорівнює  $T_x$ .

Ці імпульси надходять на ключ К і відкривають його на проміжок часу  $T_x$ . Через відкритий ключ на лічильник надходять імпульси з ГКІ, період яких

дорівнює  $T_0$  ( $T_0 \ll T_x$ ). Отже, кількість квантуючих імпульсів, які пройшли на лічильник за час  $T_x$  дорівнює:

$$N_x = \frac{T_x}{T_0}, \quad (7.1)$$

де:

$N_x$  – кількість квантуючих імпульсів

$T_x$  – проміжок часу

$T_0$  – період

Згідно цього виразу, значення  $T_0$  обирається так, щоб числовий результат вимірювання, який відображається на відліковому пристрої, було подане у одиницях часу.

Підрахована лічильником кількість імпульсів записується в регістр, де зберігається до наступного запису й одночасно відображається на цифровому відліковому пристрої. Після закінчення одного циклу запису лічильник встановлюється в нульовий стан і підраховує наступну кількість імпульсів. Імпульси запису в регістр та імпульси встановлення лічильника в нульовий стан генерується пристроєм керування, який синхронізовано з RS-тригером.

## 8. Аналіз похибок вимірювання

### 8.1 Похибки цифрового вимірювача часового інтервалу

Сумарна похибка вимірювача визначається нестабільністю частоти ГКІ, похибкою квантування часового інтервалу  $T_x$ , похибкою RS-тригера та похибкою від випадкового шуму.



Максимальне значення відносної похибки квантування (у відсотках) цифрового вимірювача:

$$\gamma_k = \frac{100 * T_0}{T_x}, \quad (8.1.1)$$

Похибка від квантування збільшується зі зменшенням періоду досліджуваного сигналу.

Верхня межа вимірювання:

$$T_{x\text{ном}} = N_{\text{ном}} * T_0, \quad (8.1.2)$$

Нижня межа вимірювання:

$$T_{x\text{min}} = \frac{100 * T_0}{\gamma_k}, \quad (8.1.3)$$

Похибка від нестабільності частоти ГКІ у відсотках:

$$\gamma(T_0) = \pm \frac{\Delta T_0}{T_0} * 100, \quad (8.1.4)$$

де:

$\Delta T_0$  - максимальне відхилення періоду ГКІ від номінального значення

Зменшення похибки від квантування можна досягти як зменшенням періоду квантуючих імпульсів, так і збільшенням кількості вимірюваних періодів:

$$\gamma_k = \frac{T_0}{k T_x} * 100, \quad (8.1.5)$$

де:

$k$  – кількість вимірюваних періодів  $T_x$

Похибка RS-тригера (похибка перетворення періоду  $T_x$  в інтервал часу  $T'_x$ ) залежить від дрейфу нуля RS-тригера та від наявності у вимірюваному сигналі випадкового шуму.

Абсолютна та відносна похибки RS-тригера, зумовлені дрейфом нуля, дорівнюють:

$$\Delta t(V_{\text{др}}) = T_x - T'_x = \frac{\Delta U_{\text{др}} T_x}{2\pi U_m} = \frac{V_{\text{др}} T_x^2}{2\pi U_m}, \quad (8.1.6)$$

$$\gamma_{\Delta t} = \frac{\Delta t(V_{\text{др}})}{T_x} = \frac{V_{\text{др}} T_x}{2\pi U_m}, \quad (8.1.7)$$

де:

$V_{\text{др}}$  – швидкість дрейфу нуля

$U_m$  – амплітуда вхідного сигналу

$\Delta U_{\text{др}}$  – абсолютне значення дрейфу нуля за вимірюваний інтервал часу  $T$

Похибку від наявності на вході приладу шуму із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_m$  можна охарактеризувати середньоквадратичним відхиленням інтервалу часу  $T'_x$  від тривалості періоду  $T_x$  до досліджуваного сигналу, яке з'являється внаслідок дії шуму. Абсолютне і відносне значення цієї похибки відповідно дорівнюють:

$$\Delta t(\sigma_m) = \frac{\sqrt{2}\sigma_m T_x}{2\pi U_m} = \frac{T_x}{\sqrt{2\pi} \frac{U_m}{\sigma_m}}, \quad (8.1.8)$$

$$\gamma(\sigma_m) = \frac{\sigma_m}{\sqrt{2\pi} U_m}, \quad (8.1.9)$$

Складова похибки  $\gamma(\sigma_m)$  не залежить від частоти, але збільшується зі зменшенням відношення сигнал/шум і тому є основною при високому рівні шумів.

Сумарне середньоквадратичне значення відносної похибки вимірювання періоду з урахуванням усіх розглянутих складових дорівнює:

$$\gamma_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{T_0^2}{6T_x^2} + \frac{V_{\text{дп}}^2 T_x^2}{12\pi U_m^2} + \frac{\sigma_m^2}{2\pi U_m^2} + \frac{\Delta T_0^2}{12T_0}}, \quad (8.1.10)$$

## 8.2 Похибки системи вимірювання

Рівняння вимірювання швидкості ультразвуку в нафтопродукті:

$$V = \frac{l}{T_{x1}}, \quad (8.2.1)$$

Рівняння вимірювання рівня нафтопродукту:

$$h = V * T_{x2}, \quad (8.2.2)$$

Рівняння вимірювання щільності нафтопродукту:

$$\rho = V_{\text{ар}} + \Delta b, \quad (8.2.3)$$

Похибка вимірювання швидкості ультразвуку:

$$\delta_v = \sqrt{\left(\frac{1}{T_{x1}} * \delta_l\right)^2 + \left(\frac{l}{T_{x1}^2} * \delta_{T_{x1}}\right)^2}, \quad (8.2.4)$$

Похибка вимірювання щільності нафтопродукту:

$$\delta_\rho \Rightarrow \Delta V = V_{\text{max}} - V_{\text{min}}, \quad (8.2.5)$$

Похибка вимірювання рівня нафтопродукту:

$$\delta_h = \sqrt{(T_{x2} * \delta_V)^2 + (V * \delta_{T_{x2}})^2}, \quad (8.2.6)$$

## 9. Розрахунок похибок системи вимірювання

При розрахунку похибок вимірювання нам необхідно скласти таблицю з усіма константами та відомими даними:

Таблиця 17 – Відомі дані та константи для розрахунків

Назва	Числове значення	Одиниці вимірювання
$\delta l$	$\pm 0.001$	м
$l$	0.5	м
$U_{max}$	5	В
$V_{др}$	$100 * 10^{-6}$	В/с
$\sigma_m$	$1 * 10^{-3}$	В
$\Delta l$	0.001	м
$\delta_F$	0.005	-

Виконаємо розрахунок похибок системи вимірювання:

Похибка від нестабільності частоти дорівнює:

$$\gamma(T_0) = 10^{-5}$$

$$T_{x1} = \frac{l}{V_{cp}} = \frac{0.5}{1268.524} = 0.00039 = 0,39 * 10^{-3}$$

Максимальне значення відносної похибки квантування (у відсотках) цифрового періодоміра:

$$\gamma_k = 10^{-4}$$

$$T_0 = 0.4 * 10^{-7}$$

Абсолютна та відносна похибки RS-тригера, зумовлені дрейфом нуля, дорівнюють:

$$\Delta t(V_{\text{др}}) = T_x - T'_x = \frac{\Delta U_{\text{др}} T_x}{2\pi U_m} = \frac{V_{\text{др}} T_x^2}{2\pi U_m} = 4.84 * 10^{-13}$$

$$\gamma_{\Delta t} = \frac{\Delta t(V_{\text{др}})}{T_x} = \frac{V_{\text{др}} T_x}{2\pi U_m} = 1.24 * 10^{-9}$$

Абсолютне та відносне значення похибки від наявності на вході приладу шуму дорівнює:

$$\Delta t(\sigma_m) = \frac{\sqrt{2}\sigma_m T_x}{2\pi U_m} = \frac{T_x}{\sqrt{2\pi} \frac{U_m}{\sigma_m}} = 1.75 * 10^{-8}$$

$$\gamma(\sigma_m) = \frac{\sigma_m}{\sqrt{2\pi} U_m} = 4.51 * 10^{-5}$$

Сумарне середньоквадратичне значення відносної похибки вимірювання періоду дорівнює:

$$\gamma_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{T_0^2}{6T_x^2} + \frac{V_{\text{др}}^2 T_x^2}{12\pi U_m^2} + \frac{\sigma_m^2}{2\pi U_m^2} + \frac{\Delta T_0^2}{12T_0}} = 9.01 * 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{сум}} = \gamma_{\text{сум}} * T_{x1} = 3,51 * 10^{-8}$$

СКВ (за нормальним законом):

$$\sigma_{\text{сум}T_x} = \frac{\Delta_{\text{сум}}}{2} = 1,757 * 10^{-8}$$

Похибка вимірювання швидкості ультразвуку:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{1}{T_x} * \sigma_l\right)^2 + \left(\frac{1}{T_x^2} * \sigma_{T_x}\right)^2} = 2.566$$

$$\sigma_l = 0.001$$

					ВВ7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		61

$$\Delta V = \sigma_v * 2 = 5.132$$

$$h = V * T_{x2}$$

$$\Delta V \rightarrow \sigma_V$$

Час проходження ультразвуку в середовищі:

$$T_{x2} = \frac{h_{max}}{V_{cp}} = 0.0023 = 2.3 * 10^{-3}$$

$$T_{x2} \rightarrow \Delta_{\text{сум}} = \gamma_{\text{сум}} * T_{x2} = 2.072 * 10^{-7}$$

$$\sigma_{\text{сумТх}} = 1,036 * 10^{-7}$$

Виміряна швидкість ультразвуку:

$$V_{\text{вим}} = 1304,347$$

$$\Delta h = 2 * h = 6$$

Похибка вимірювання рівня нафтопродукту:

$$\sigma_h = \sqrt{(T_{x2} * \sigma_v)^2 + (V * \sigma_{\text{сумТх}})^2} = 0,0059$$

Похибка вимірювання щільності нафтопродукту:

$$\gamma_\rho = \gamma_V + \gamma_F = 0.004 + 0.005 = 0.009$$

$$\gamma_V = \frac{\Delta V}{V_{\text{изм}}} = \frac{5,132}{1304,347} = 0,0039$$

## Висновок

У даному дипломному проєкті було розглянуто комплексний метод ультразвукового вимірювання густини та рівня нафтопродуктів при їх зберіганні в ємностях. В ході його виконання було описано алгоритм вимірювання системи, також складені функціональна і структурна схема системи вимірювання. Були розглянуті існуючі методи вимірювання густини та рівня нафтопродуктів. Охарактеризовані принцип та порядок використання даних методів. Прораховані похибки при використанні комплексного ультразвукового методу вимірювання густини та рівня. Також пораховані похибки періодоміра, який використовується при вимірюванні.

Результатом даного проєкту є повне описання комплексного методу вимірювання та створення унікальних схем та алгоритму системи вимірювання густини та рівня нафтопродукту при зберіганні.

					ВВ7106.414151.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		63

## Перелік джерел посилань

1. Прецизійні ультразвукові вимірювачі рівня рідини в закритих резервуарах/Мікросистеми, електроніка та акустика – Богушевич В. К.; Замаренова Л. Н.; Котов Г. М.; Скіпа М. І. – Том №24, №1(108),2019 – ст. 61-69;
2. <https://findpatent.ru/patent/222/2221234.html> - Ультразвуковий метод вимірювання густини рідини;
3. Система вимірювання густини нафтопродуктів в трубопроводі. А. І. Чепрасов; Н. В. Шаверін – Автоматизація, телемеханізація та зв'язок у нафтопромисловості – 2001р. № 3-4;
4. Аналіз методів і засобів вимірювання щільності нафтопродуктів/ Автоматика та інформаційно- вимірювальна техніка - І. І. Білінський; К. В. Огородник; Н. А. Яремішена – наукові праці ВНТУ, 2016р., №2;
5. Аналіз нафти та нафтопродукту - Ю. Г. Кірсанов, М. Г. Шишов, А. П. Коняєва – 2016р. ст. 4-87;
6. <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/afriso/pribory-i-instrumenty/17827/62086.pdf> – Пристрої для вимірювання рівня – ст. 1-30;
7. Магнітострикційні перетворювачі рівня і щільності палива для систем моніторингу наземних транспортних засобів/ Технічні науки. Інформатика, обчислювальна техніка - Є. С. Дьомін - ст. 24-36;
8. Метод комплексного контролю рівня, щільності і в'язкості багат шарових рідин в резервуарах на основі ультразвукового зондування/ Праці МАІ випуск №108 – Бормінський С. А. – 2019р, ст. 1-23;
9. Методи обчислень рівня і щільності палива наземних транспортних засобів при асиметричних вимірах/ Вісник ІрГТУ №2 (109) – Є. С. Дьомін – 2016р, ст 107-115;
10. Дослідження цифрового періодоміра/ Цифрові вимірювальні прилади – В. П. Бабак; В. С. Еременко; Ю. В. Куц; В. М. Мокійчук – 2006р. ст. 71-74;
11. Теоретичні основи ІВТ – П. П. Орнатський – 1983р. 455 ст;



12. Акустичні перетворювачі властивостей середовищ в техніці – Н. І. Бражніков; В. А. Белевітін; Є. В. Бражнікова – 2011р. 206 ст;

					ВВ7106.414151.001 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		