

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Грищенко  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Ультразвуковий витратомір паливної системи літака»

Виконавець: \_\_\_\_\_ Монастирний Андрій Володимирович \_\_\_\_\_  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: \_\_\_\_\_ Лужбін Віктор Михайлович \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант розділу «Охорона  
навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по-батькові)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ В.В. Левківський \_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2023

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ю.В.Грищенко  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання кваліфікаційної роботи**

Монастирний Андрій Володимирович

1. Тема роботи: «Ультразвуковий витратомір паливної системи літака» затверджена наказом ректора від « 05 » 10 2023 р. № 2040/ст.
2. Термін виконання роботи: з 02 жовтня 2023 по 31 грудня 2023.
3. Вихідні дані роботи: Діаметр труби – 0,1 м, кут поширення ультразвукових хвиль в звукопроводі по відношенню до осі труби – 0,78539 рад, час затримки ультразвукових хвиль –  $28,8 \cdot 10^{-6}$ с, гранична відносна похибка за рахунок варіації температури  $-1,5 \cdot 10^{-2}$ .
4. Зміст пояснювальної записки: аналітичний огляд літературних джерел з тематики кваліфікаційної роботи. 1. Аналіз засобів вимірювання витрати і маси палива. 2. Основні принципи побудови ультразвукових витратомірів рідини. 3. Вибір конструкції та розробка вузлів ультразвукового витратоміру. 4. Аналіз метрологічних характеристик та розрахунок похибок ультразвукових витратомірів.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: 1. Види витратомірів. 2. Принцип дії витратоміра з розміщенням датчиків уздовж потоку. 3. Принцип дії витратоміра з розміщенням датчиків під кутом  $45^\circ$ . 4. Функціональна схема витратоміру. 5. Блок-схема алгоритму обчислення похибок.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури	02-16.10.2023	
2	Підготовка та написання 1 розділу	17-31.10.2023	
3	Підготовка та написання 2 розділу	01-15.11.2023	
4	Підготовка та написання 3 розділу	16-30.11.2023	
5	Підготовка та написання 4 розділу «Охорона навколишнього середовища»	01-07.12.2023	
6	Підготовка та написання 5 розділу «Охорона праці»	07-14.12.2023	
	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на роботу	15-16.12.2023	
7	Підготовка презентації та доповіді	17-20.12.2023	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього середовища			

8. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Лужбін В.М.

(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Монастирний А.В.

(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Ультразвуковий витратомір паливної системи літака»: 128 сторінок, 36 рис., 4 табл., 10 літературних джерела.

**Об'єкт дослідження:**ультразвуковий витратомір палива в трубопроводі

**Предмет дослідження:**дослідження похибки вимірювання при зміні температури.

**Мета роботи:**обґрунтування вибору ультразвукового способу вимірювання витрати палива; оцінка похибок вимірювання витрати палива в трубопроводі.

**Методи дослідження:**комп'ютерне програмування в детермінованій постановці.

**Ключові слова:** УЛЬТРАЗВУК, ВИТРАТОМІР, ПРИЙМАЧ-ПЕРЕДАВАЧ, ПАЛИВО, АЛГОРИТМ, ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b> .....	
<b>ВСТУП</b> .....	
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРІВ ВИТРАТИ І МАСИ ПАЛИВА</b> .....	
1.1. Поняття витрати і маси.....	
1.2. Витратомір змінного перепаду тиску.....	
1.3. Витратомір обтікання.....	
1.4. Тахометричні витратоміри.....	
1.5. Електромагнітні витратоміри.....	
1.6. Швидкісні витратоміри.....	
1.7. Коріолісові масові витратоміри.....	
<b>РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТА АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ПАЛИВА</b> .....	
2.1. Призначення і принцип дії ультразвукових витратомірів.....	
2.2. Вихреакустичний метод виміру витрати.....	
2.3. Ультразвуковий часоімпульсний витратомір з накладними датчиками.....	
2.4. Ультразвуковий доплерівський витратомір з накладними датчиками.....	
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА ВУЗЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ПАЛИВА</b> .....	
3.1. Принципи побудови і виміру витрати палива.....	
3.1.1. Плата аналогова.....	
3.1.2. Плата мікропроцесорна.....	
3.1.3. Плата живлення.....	
3.2. Аналіз структурних схем ультразвукових витратомірів.....	

- 3.3. Імпульсний ультразвуковий витратомір з індикацією без виділення інформації про напрям потоку.....
- 3.4. Синхронний квадратурний детектор і блок виділення інформації про напрям потоку.....
- 3.5. Формувач квадратурного сигналу.....
- 3.6. Обґрунтування вибору ультразвукового витратоміру палива.....
  - 3.6.1. Технічні характеристики витратоміру.....
  - 3.6.2. Принцип роботи вибраного витратоміру.....
  - 3.6.3. Опис функціональної схеми витратоміру.....
  - 3.6.4. Конструкція витратоміру.....

**РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРУ.....**

- 4.1. Аналіз джерел похибок вимірювання.....
- 4.2. Розрахунок методичної похибки виміру витрати.....
- 4.3. Програма розрахунку похибок.....
- 4.4. Блок - схема алгоритму обчислення похибки.....

**РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....**

- 5.1. Небезпечні та шкідливі фактори при обслуговуванні ультразвукового витратоміру.....
- 5.2. Технічні й організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....
  - 5.2.1. Освітлення робочої зони.....
  - 5.2.2. Нормалізація мікроклімату виробничих приміщень.....
  - 5.2.3. Забезпечення електробезпеки.....
- 5.3. Забезпечення пожежної і вибухової безпеки при обслуговуванні витратоміра.....

5.4. Інструкція працівника під час обслуговування ультразвукового витратоміра палива.....

**РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....**

6.1. Загальні відомості.....

6.2. Аналіз факторів основних джерел забруднення екологічної безпеки ультразвукового витратоміра палива.....

6.3. Еколого-економічне обґрунтування ефективності застосування ультразвукового витратоміра палива літака.....

**ВИСНОВКИ.....**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....**

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

<b>ЕДІ</b>	Електронний обмін даними
<b>АТ</b>	Авіаційна техніка
<b>БП</b>	Безпека польотів
<b>ВЧ</b>	Високі частоти
<b>НВЧ</b>	Надзвичайно високі частоти
<b>НЧ</b>	Низькі частоти
<b>ПС</b>	Повітряне судно
<b>РЛС</b>	Радіолокаційна станція
<b>СЧ</b>	Середні частоти
<b>ТО</b>	Технічне обслуговування
<b>ПВ</b>	п'єзоелектричний випромінювач
<b>ПП</b>	п'єзоприймач
<b>ЕП</b>	електроакустичні перетворювачі
<b>ПЕП</b>	Первинний ультразвуковий перетворювач
<b>ПЕА</b>	перетворювачів електроакустичних



## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

На практиці більшість витрат, пов'язаних з експлуатацією повітряних суден, складають витрати на паливо. У зв'язку з цим інформація про режими споживання палива, обсяги заправок і поточні запаси палива є безцінною і використовується для складання статистичної та оперативної звітності, визначення собівартості транспортних та інших видів робіт, а також для впровадження режимів економії споживаних нафтопродуктів.

Прилад, призначений для вимірювання миттєвої або середньої витрати рідини або газу за одиницю часу, називається витратоміром. В авіації витратоміри використовуються для вимірювання витрати палива в авіаційних двигунах і потоку повітря в двигунах і герметичних кабінах.

Витрата палива повинна вимірюватися з високою точністю. Потужність поршневих і турбогвинтових двигунів і тяга турбореактивних двигунів пропорційна витраті палива за одиницю часу. Для підтримки заданої швидкості польоту відхилення тяги двигуна не повинно перевищувати  $\pm 2 \%$ , тому похибка вимірювання миттєвої витрати палива також не повинна перевищувати  $\pm 2 \%$ . Майже аналогічні вимоги пред'являються і до точності вимірювання сумарної витрати палива.

Оскільки витратоміри палива інтегровані в паливопроводи, до них пред'являються жорсткі вимоги щодо гідравлічного опору при нормальній роботі і в разі відмови обладнання. У першому випадку падіння тиску на датчику витратоміра не повинно перевищувати  $0,20 \text{ кг/см}^2$ .

Вимірювання витрати і маси речовин (рідин, газів, сипучих, твердих, парів і т.д.) широко використовується в задачах обліку і звітності, а також при контролі, координації та управлінні технологічними процесами. У харчовій промисловості оптимальне управління багатьма технологічними процесами засноване на змішуванні

різних компонентів і сировини, що входять до складу цільового продукту, в строго визначених пропорціях.

Витрата речовини - це маса або об'єм речовини, що проходить через заданий переріз каналу витратоміра за одиницю часу. Розрізняють об'ємну та масову витрату залежно від одиниці, в якій вимірюється витрата. Об'ємна витрата вимірюється в м<sup>3</sup>/с, тоді як масова витрата вимірюється в кг/с.

Витрата речовини вимірюється за допомогою витратоміра, який є приладом або пристроєм для вимірювання витрати. Багато витратомірів призначені для вимірювання не тільки швидкості потоку, але й маси або об'єму речовини, що проходить через лічильник за довільно обраний проміжок часу. У цьому випадку їх називають дозованими витратомірами або просто лічильниками. Маса або об'єм речовини, що проходить через лічильник, визначається різницею між двома послідовними показаннями лічильного пристрою або інтегратора.

Сучасний стан авіаційної техніки, впровадження засобів обчислювальної техніки в авіаційну техніку і зростаючі вимоги до ефективності польотів зумовили необхідність перегляду структури авіаційної техніки і підвищення вимог до найбільш критичних параметрів авіаційних систем. В першу чергу це стосується систем вимірювання витрати палива: документ ІКАО містить рекомендації щодо подальшого вдосконалення систем вимірювання витрати палива для сучасних літаків і розробок для майбутніх літаків. Короткий аналіз досвіду експлуатації систем вимірювання витрати палива свідчить про те, що рівень надійності, похибок і витрат на обслуговування існуючого обладнання для вимірювання витрати палива потребує подальшого вдосконалення.

Вимірювання витрати палива має вирішальне значення для паливної економії. Швидкий розвиток електроніки та обчислювальної техніки виявився передумовою для широкої автоматизації процесів в ІТС, але реалізація цієї передумови значною мірою залежить від здатності обладнання отримувати інформацію про зареєстровані параметри і процеси. Однією з вимог для ефективного використання систем PWS є

підвищення точності контрольно-вимірювального обладнання, в тому числі витратомірів.

Метрологічні вимоги до останніх також стають більш жорсткими через зростання цін на нафтопродукти.

Щоб задовольнити ці вимоги, необхідно досліджувати, вивчати та застосовувати апаратні та методологічні методи підвищення точності вимірювання витрати.

В даний час існує ряд вимірювальних приладів, заснованих на різних фізичних принципах вимірювання витрати авіаційного палива. До недавнього часу найбільш поширеними і зрозумілими споживачам були вимірювальні пристрої на основі звужуючих пристроїв, тахометрії і методів змінного перепаду тиску на електромагнітах. Інші витратоміри, в тому числі ультразвукові, були менш поширені.

Залежно від принципу дії витратоміри можна розділити на такі основні групи, як витратоміри змінного перепаду тиску, витратоміри постійного перепаду тиску, тахометричні, електромагнітні, витратоміри змінного рівня, теплові, вихрові, акустичні, лазерні та турбінні витратоміри. Однак багато з них все ще перебувають на стадії розробки і ще не набули широкого застосування.

Ультразвукові витратоміри ще не набули широкого застосування. Однак ці прилади є досить перспективними. В даний час існує чотири напрямки розвитку таких приладів: а) визначення витрати за часом поширення ультразвукових коливань, б) визначення витрати за фазовим зсувом ультразвукових коливань, в) визначення витрати за частотою проходження ультразвукових коливань і г) визначення витрати за допомогою диференціального перемикачання двох приймальних ультразвукових перетворювачів. Згадані наступні чотири.

До переваг ультразвукових витратомірів відносяться: безконтактне вимірювання; висока точність вимірювання; відсутність втрати герметичності труби, коли витратомір потребує ремонту або діагностики; відсутність втрат тиску потоку; відсутність рухомих частин, що різко збільшує термін служби приладу; можливе використання в авіаційній промисловості завдяки іскробезпечному вибухозахищеному виконанню З

економічної точки зору, ультразвукові витратоміри вигідні для замовника при нетривалих періодах експлуатації.

**Об'єкт дослідження:** ультразвуковий витратомір палива в трубопроводі

**Предмет дослідження:** дослідження похибки вимірювання при зміні температури.

**Мета роботи:** обґрунтування вибору ультразвукового способу вимірювання витрати палива; оцінка похибок вимірювання витрати палива в трубопроводі.

**Методи дослідження:** комп'ютерне програмування в детермінованій постановці.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРІВ ВИТРАТИ І МАСИ ПАЛИВА

### 1.1 Поняття витрати і маси

Існує безліч методів вимірювання витрати палива. До числа найпоширеніших, широко використовуваних в авіаційній промисловості, належать такі:

- Об'ємний
- Гідродинамічний
- Метод постійного перепаду тиску
- Відцентровий
- Турбінний.
- Тепловий
- Ультразвуковий;
- Електромагнітний

Під час стендових випробувань авіаційних двигунів витрата палива є одним з основних параметрів для визначення ефективності двигуна. Для визначення питомого імпульсу двигуна, а також характеристик системи впуску і компресора необхідно вимірювати витрату повітря. Крім того, робота авіаційних двигунів залежить від підтримання постійних витрат оливи та охолоджувальної рідини. Велика різноманітність двигунів, їхніх вузлів і агрегатів, різні фізико-хімічні властивості робочих рідин (повітря, вода, гас, рідкий водень, кисень), параметри робочих рідин (тиск може змінюватися в сотні разів, температура може набувати будь-яких значень у діапазоні 70-1500 К) та умови вимірювання (сталий або несталый потік) є причиною,

яка зумовлює наявність різних типів витратомірів і різноманітних методів вимірювання.

Вибір методу вимірювання в основному визначається характеристиками робочої рідини і необхідною точністю вимірювання витрати.

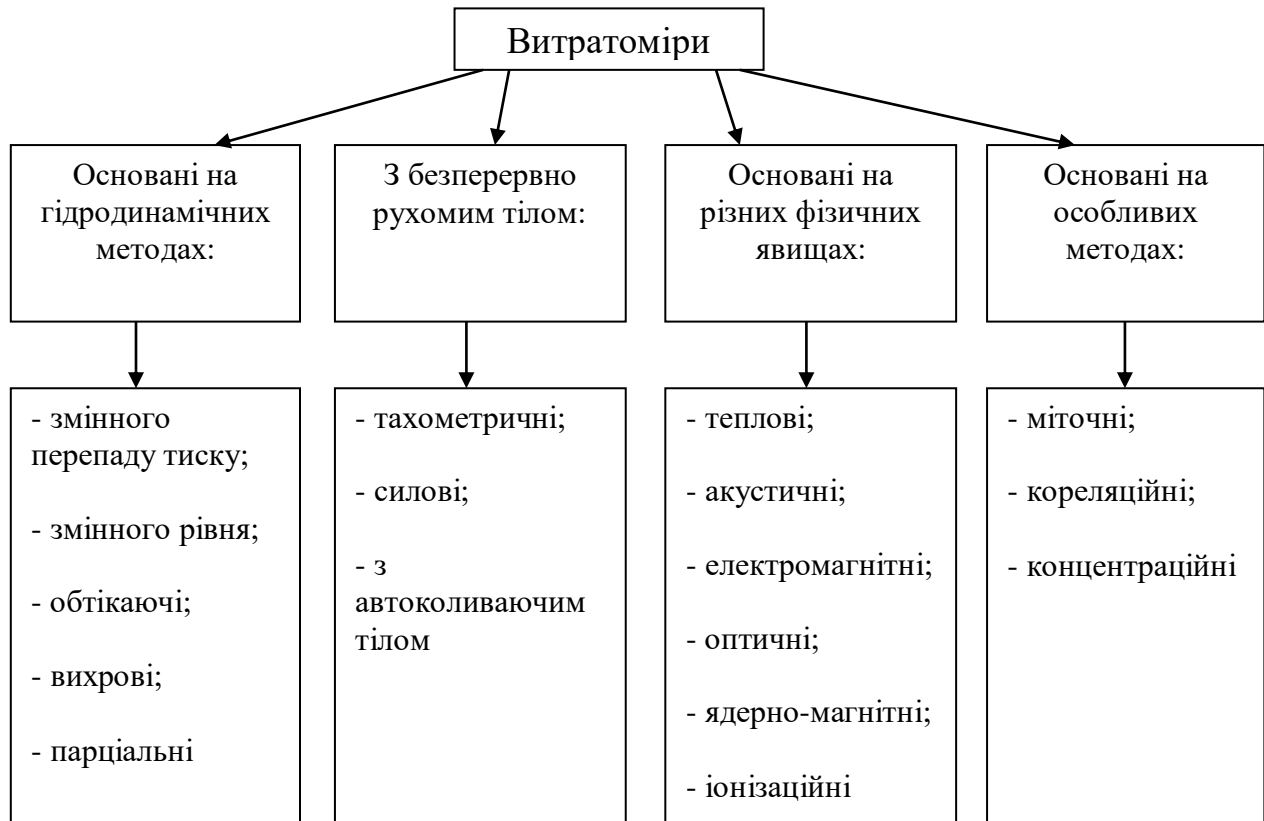


Рис.1.1. Класифікація витратомірів

## 1.2 Витратоміри змінного перепаду тиску

Одним із найпоширеніших засобів вимірювання витрати рідини або газу (пари) трубопроводом є витратомір змінного перепаду тиску, що складається з дроселя, диференціального манометра, пристрою для вимірювання параметрів вимірюваного середовища і сполучних ліній. До комплекту витратоміра входять також прямі ділянки трубопроводу до і після дроселя з місцевим опором.

Дросель витратоміра є первинним перетворювачем витрати, який призводить до звуження прохідного перерізу вимірювального середовища (рідини, газу або пари), утворюючи перепад (різницю) тиску, пропорційний витраті. Як стандартні (нормовані) звужувальні пристрої використовують вимірювальні діафрагми, сопла, сопла Вентурі та труби Вентурі. Як вимірювальні прилади використовують різні диференціальні манометри, оснащені пристроями, що показують, реєструють, інтегрують, сигналізують, сигналізують та іншими пристроями, що забезпечують одержання вимірювальної інформації про витрату у відповідній формі та вигляді.

Вимірювальна мембрана являє собою диск, установлений так, що його центр лежить на осі трубопроводу (рис. 1.2). Коли потік рідини або газу (пари) потрапляє в трубопровід із діафрагмою, він починає звужуватися перед діафрагмою. На певній відстані за діафрагмою під дією інерції потік звужується до мінімального перерізу, а потім поступово розширюється до повного перерізу трубопроводу. Перед і за діафрагмою утворюються вихрові зони. Через протитиск перед діафрагмою тиск струменя біля стінки спочатку збільшується. За діафрагмою тиск падає до мінімального значення, потім знову зростає, але не досягає попереднього значення, оскільки тертя і вихроутворення призводять до втрати тиску  $P_{\text{пот}}$ .

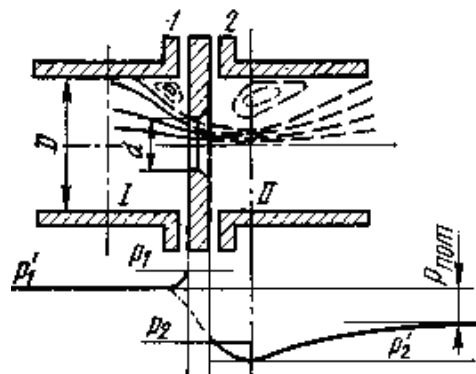


Рис. 1.2. Схема розподілу статичного тиску в потоці при установці в трубопроводі звужуючого пристрою – діафрагми

Таким чином, частина потенційної енергії тиску потоку перетворюється на кінетичну. У результаті середня швидкість потоку в звуженні збільшується, а статичний тиск у цій ділянці стає меншим за статичний тиск перед звуженням. Різниця між цими тисками (перепад тиску) є показником швидкості потоку рідини, газу та пари через звуження.

З рис. 1.2 видно, що тиск уздовж осі трубопроводу, позначений пунктирною лінією, незначно відрізняється від тиску вздовж стінки трубопроводу тільки в середині графіка. Статичний тиск до і після звужувального пристрою вимірюється через отвори 1 і 2.

### **1.3 Витратоміри обтікання**

Принцип дії витратомірів ґрунтується на залежному від витрати переміщенні проточного об'єкта, що сприймає динамічний тиск навколишнього потоку. Широко поширені витратоміри постійного перепаду тиску, які можуть бути як поплавкового, так і поршневого типу. Принцип дії витратомірів постійного перепаду тиску ґрунтується на залежному від витрати вертикальному переміщенні тіла (поплавка) в потоці, яке змінює площу прохідного пристрою таким чином, щоб перепад тиску з обох боків від поплавка залишався постійним.

У деяких витратомірах, які називаються компенсаційними, переміщення рідини вимірюється величиною тиску, який створює силу, що впливає на рідину, щоб врівноважити динамічний тиск потоку на рідину.

Витратоміри постійного перепаду тиску - ротаметри - використовуються для вимірювання витрати рівномірного потоку чистої, слабозабрудненої рідини або газу, що протікає трубопроводом і не схильний до великих коливань. Особливо широко вони застосовуються у виноробній, спиртовій, лікєро-горілчаній та інших галузях промисловості. Ротаметр (рис. 1.3) являє собою довгу конічну трубу 1, встановлену



вертикально, по якій під дією потоку, що рухається від низу до верху, переміщається поплавок 2.

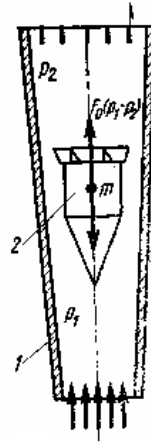


Рис. 1.3. Функціональна схема ротаметра

Поплавок переміщується доти, доки площа кільцевого отвору між поплавцем і внутрішньою поверхнею конусної труби не стане такою, що перепад тиску по обидва боки від поплавця дорівнюватиме розрахунковому тиску. У цьому разі сили, що діють на поплавок, врівноважуються, і поплавок встановлюється на висоті, що відповідає певній витраті.

Розглянемо сили, що діють на поплавок. Маса поплавка в робочому стані, тобто зануреного в постійний об'єм вимірюваного середовища (кг).

Поплавковий витратомір із постійним перепадом тиску (рис. 1.4) складається з поплавка 1 і конічного сідла 2, розташованого на корпусі приладу (відліковий пристрій на схемі не показано). Конічне сідло виконує ту саму роль, що й конічна трубка тахометра. Різниця полягає в тому, що довжина і діаметр сідла приблизно рівні, а довжина конічної трубки значно більша за діаметр у тахометрі.

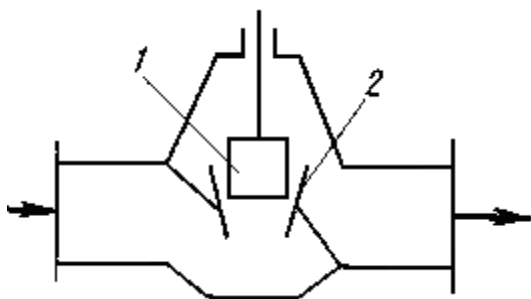


Рис. 1.4. Структурна схема поплавцевого витратоміру

У поршневому витратомірі (рис. 1.5) чутливим елементом є поршень 1, що переміщується в середині втулки 2.

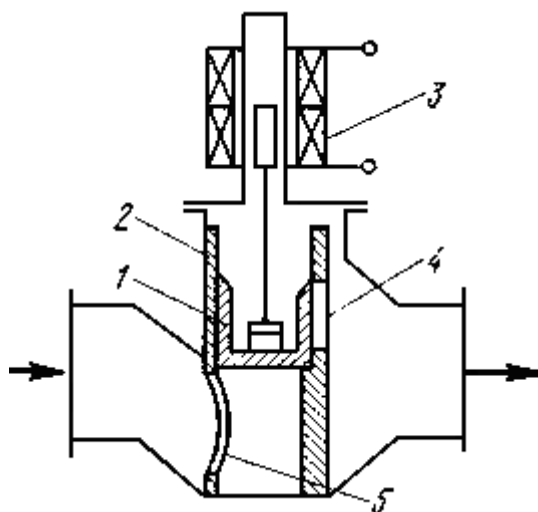


Рис. 1.5. Структурна схема поршневого витратоміру

Втулка має вхідний 5 і вихідний 4 отвори та діафрагму змінного перерізу. Поршень з'єднаний зі стрижнем датчика 3 за допомогою штока. Рідина, що протікає через витратомір, потрапляє на поршень і піднімає його. Це призводить до того, що отвір у вихідній діафрагмі відкривається в більшій чи меншій мірі. Рідина, що протікає через діафрагму, також заповнює простір над поршнем, створюючи силу реакції.

## 1.4 Тахометричні витратоміри

Ця група витратомірів широко використовується практично у всіх галузях харчової промисловості. Принцип дії заснований на тому, що швидкість переміщення тіла, чутливого елемента, розміщеного в потоці, залежить від швидкості потоку речовини, що протікає через витратомір. Існує багато типів тахометричних витратомірів, але на практиці для вимірювання витрати різних рідин і газів широко застосовуються турбінні, кулькові і камерні витратоміри.

Камерні витратоміри складаються з одного або декількох рухомих елементів, які вимірюють або перекривають фіксований об'єм рідини або газу під час руху рухомих елементів.

Існує багато конструкцій камерних витратомірів для рідин і газів. Еліптичний шестеренчастий витратомір рідини (рис. 1.6) складається з двох однакових еліптичних шестерень, які обертаються під дією перепаду тиску рідини, що протікає через корпус.

На праву шестерню діє крутний момент, який змушує її обертатися за годинниковою стрілкою, а ліву шестерню - проти годинникової стрілки. У цьому положенні ліва шестерня закінчує відрізати нову порцію рідини 2, а права виштовхує раніше відрізаний об'єм 1 з лічильника. Крутний момент в цей момент діє на обидві шестерні. У вихідному положенні ліва шестерня стає ведучою і розрізає об'єм 2; в положенні IV права шестерня закінчує розріз об'єму 3, а ліва виштовхує об'єм 2; в положенні V об'єм 3 повністю розрізаний, обидві шестерні завершують півоберта, і права шестерня знову стає ведучою шестернею. Те саме стосується другої половини обертання шестерні. Таким чином, за один повний оберт шестерні блокуються чотири дози. Вимірювання рідини базується на підрахунку обертів шестерні. Діапазон вимірювання 0,8-36 м<sup>3</sup>/год. Номінальний діаметр прохідного отвору 15-50 мм, клас точності 0,5 і 1,0.

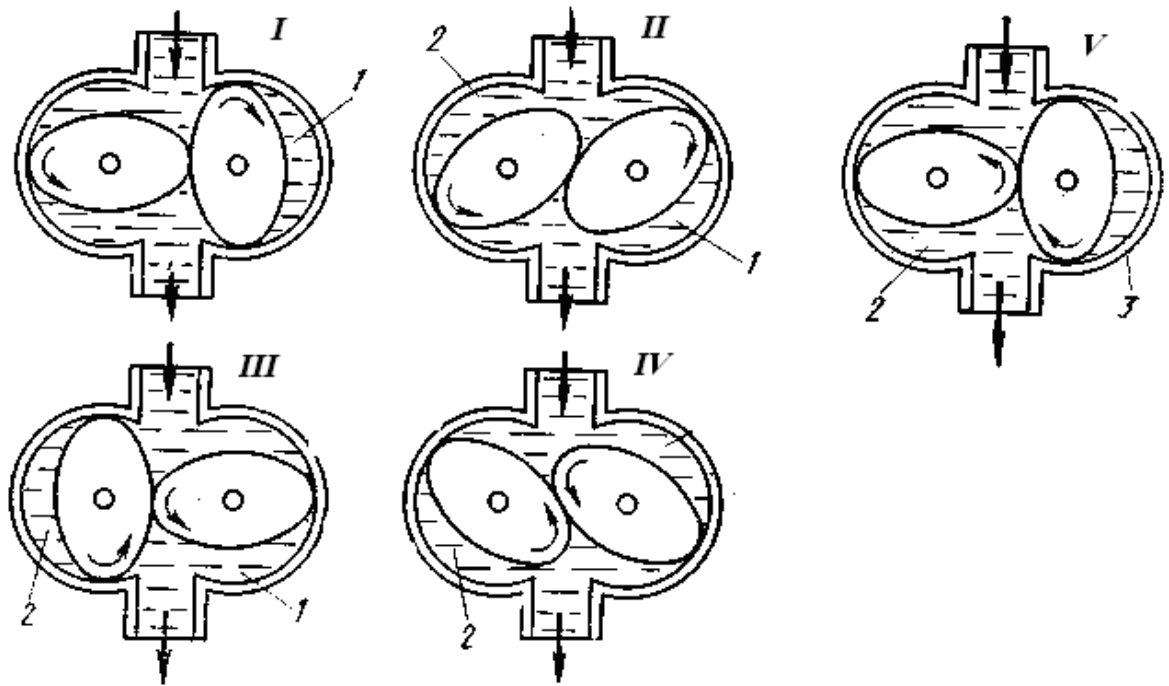


Рис. 1.6. Схема роботи витратоміру з овальними шестернями

## 1.5 Електромагнітні витратоміри

Електромагнітні (індуктивні) витратоміри призначені для вимірювання витрати різних рідких середовищ, в тому числі паперової маси, що містять дрібнодисперсні неферромагнітні частинки, з електропровідністю не менше  $5-10 \text{ } \Omega/\text{м}$  і протікають в герметичному і повністю заповненому трубопроводі.

Електромагнітні витратоміри виготовляються у вигляді двох окремих блоків: вимірювального перетворювача витрати і вимірювального блоку, який є передавальним перетворювачем, що перетворює сигнал, отриманий від вимірювального перетворювача, в стандартний формат, придатний для подальшого використання.

Вимірювальний перетворювач витрати електромагнітного витратоміра (рис. 1.7) складається з немагнітної частини 3 трубопроводу зі струмопровідними електродами 4 та електромагнітного ярма 2 з обмоткою збудження 1, що охоплює трубопровід. Коли струмопровідна рідина протікає через немагнітний трубопровід 3 і проходить через

однорідне магнітне поле, створене електромагнітом 2, в рідині виникає електрорушійна сила, яка знімається електродами 4. Ця електрорушійна сила ЕРС  $E$  прямо пропорційна середній швидкості потоку:

$$E = Blv_{\text{cp}}, \quad (1.1)$$

де  $B$  – електромагнітна індукція в проміжку між полюсами магніта, Т;

$l$  – відстань між електродами, м;

$v_{\text{cp}}$  – середня швидкість потоку, м/с.

Оскільки площа поперечного перерізу труби постійна, значення ЕРС, що зчитується з електродів, можна виразити через об'ємну швидкість потоку:

$$E = BQ_0 l D_y \quad (1.2)$$

де  $D_y$  – внутрішній (умовний) діаметр труби, рівний відстані між електродами, м.

Сигнал, пропорційний витраті, надходить на вимірювальний блок (не показаний на рисунку 1.7), де він стандартизується, а потім надсилається на прилад або інший вимірювальний пристрій.

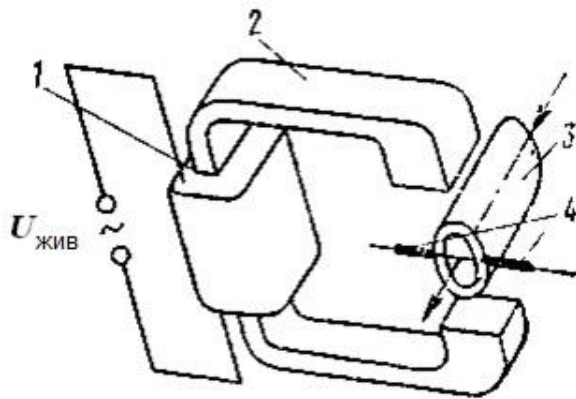


Рис. 1.7. Структурна схема вимірювального перетворювача електромагнітного витратоміру

Індуктивний витратомір призначений для номінальних діаметрів від 10 до 300 мм і може вимірювати в діапазоні від 0,32 до 2500 м<sup>3</sup>/год. Клас точності 1.

## 1.6 Швидкісні витратоміри

Принцип дії високошвидкісних витратомірів заснований на тому, що швидкість обертання крильчатки (турбіни), розміщеної в потоці рідини, залежить від швидкості потоку.

У ненавантаженої крильчатки швидкість обертання точно пропорційна швидкості потоку. Тому у високошвидкісних витратомірах вимірювання швидкості потоку, а отже і витрати, зводиться до вимірювання швидкості обертання крильчатки.

На рисунку 1.8 показано залежність швидкості обертання крильчатки від об'ємної витрати палива за одиницю часу для всіх витратомірів. Як видно, залежність є лінійною. Якщо замість частоти обертання вимірювати кут повороту валу крильчатки, то виходить величина, пропорційна сумарній витраті за час обертання крильчатки.

Оскільки швидкість обертання крильчатки залежить не тільки від швидкості потоку, але і від в'язкості рідини, зміни в рідині (наприклад, через зміну температури або класу рідини) призведуть до зміни вимірюваного значення. Шкала витратоміра зазвичай відображається в об'ємних одиницях витрати, таких як л/год (миттєва витрата).

Оскільки крильчатка повинна бути розвантажена, щоб отримати показання без спотворень, сигнал, отриманий від чутливого елемента, дуже малий. Тому дуже складно підібрати покажчик витратоміра. Зазвичай сигнал з чутливого елемента витратоміра перетворюється в електричний сигнал. Для цього крильчатку можна з'єднати з постійним магнітом або електромеханічним вимикачем, який виконує роль ротора спеціального тахогенератора. У першому випадку напруга тахогенератора пропорційна кількості обертів пропелера. Вимірювання цієї напруги дає значення,

пропорційне миттєвій швидкості потоку. Для визначення повної швидкості потоку напруга тахогенератора повинна бути подана на інтегратор. У другому випадку кількість імпульсів струму пропорційна кількості обертів гвинта. Якщо кількість імпульсів вимірюється під час роботи пристрою, можна отримати загальну витрату. За допомогою спеціальної схеми також можна визначити миттєву витрату.

Як індикатори миттєвої витрати використовуються магнітоелектричні витратоміри, а як індикатори повної витрати - лічильники електромагнітних імпульсів. Швидкість обертання крильчатки з достатньою точністю пропорційна витраті рідини:

$$n = k'V, \quad (1.3)$$

де  $n$  – число об/хв;

$V$  – швидкість рідини;

$k'$  – коефіцієнт пропорційності.

Якщо сигнал крильчатки перетворюється в електричний сигнал за допомогою тахогенератора, та напруга на затисках тахогенератора:

$$u = k''n = k'k''V, \quad (1.4)$$

Миттєву об'ємну витрату палива знаходимо із співвідношення:

$$\bar{V} = SV = \frac{S}{k'k''}u, \quad (1.5)$$

де  $S$  – площа трубопроводу.

Отже, миттєва об'ємна витрата  $\bar{V}$  пропорційний напрузі тахогенератора. Сумарна витрата:

$$G = \frac{S}{k'k''} \int_0^t u dt, \quad (1.6)$$

Коли сигнал крильчатки перетворюється тахогенератором в електричний сигнал, напруга на клемі тахогенератора збільшується:

$$nI = kIn \quad (1.7)$$

або, з урахуванням виразу (1.3):

$$nI = k'k''V, \quad (1.8)$$

Миттєва об'ємна витрата:

$$\bar{V} = \frac{S}{k'k''} n_1, \quad (1.9)$$

Таким чином, вимірювання миттєвої об'ємної витрати зводиться до вимірювання кількості електричних імпульсів за одиницю часу. Для визначення загальної витрати  $G$  підсумовується загальна кількість імпульсів за час роботи приладу. Якщо відома загальна кількість імпульсів в момент часу  $t$ , тобто загальна витрата  $N$ , то отримуємо рівняння (1.10):

$$G = \frac{S}{k'k''} N, \quad (1.10)$$

До складу витратоміра авіаційного палива РТС-16 входять датчик, показчик і тиратронний вимикач. На рисунку 1.7 наведено електрокінетичну схему приладу, а на рисунку 1.8 - принципову електричну схему.

Принцип дії витратоміра заснований на тому, що швидкість обертання крильчатки однозначно залежить від витрати палива через датчик. Швидкість обертання крильчатки перетворюється редуктором і магнітною муфтою в пропорційну кількість імпульсів в імпульсному механізмі, а контактна система імпульсного механізму посиляє імпульс на сітку тиратрона за кожні 30 обертів крильчатки.



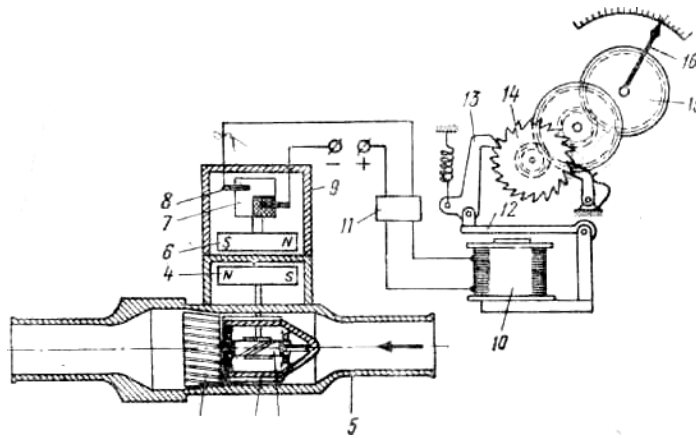


Рис. 1.8. Електрокінематична схема витратоміру РТС – 16

1 - крильчатка; 2 - направляючий апарат; 3 - черв'ячний редуктор; 4 - ведений магніт; 5 - корпус датчика; 6 - ведений магніт; 7 - переривник; 8 - щіткові контакти, 9 - кожух; 10 - реле показчика, 11 - тиратронний переривник, 12 - якір реле; 13 - собачка, 14 - храпове колесо. 15 - редуктор; 16 - стрілка показчика

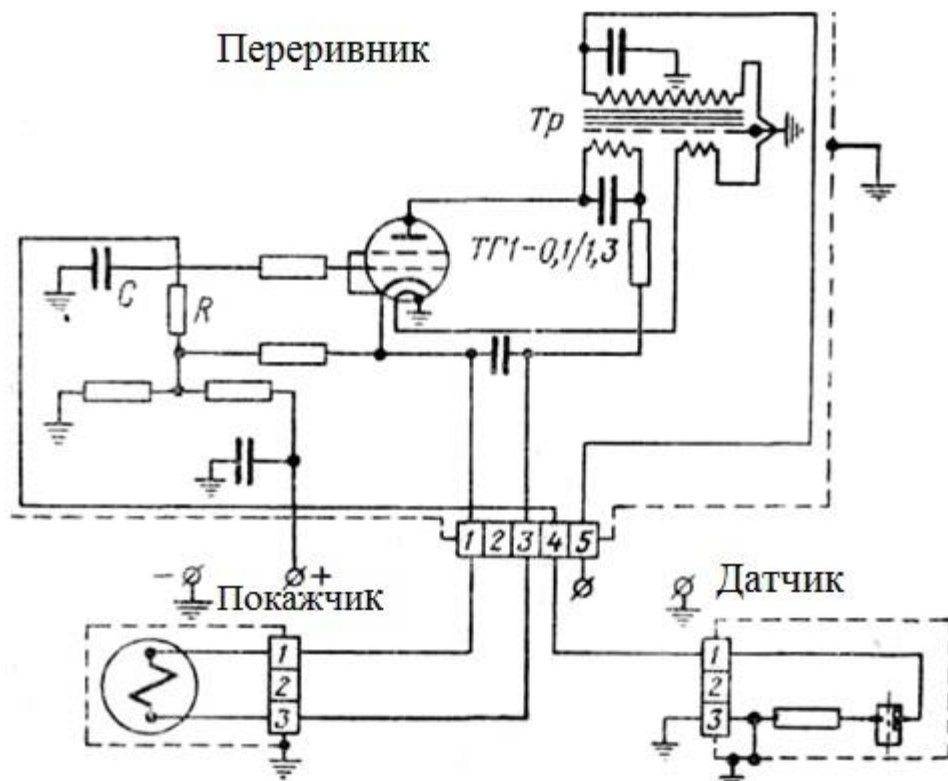


Рис. 1.9. Принципова електрична схема витратоміру РТС – 16

В анодний ланцюг тиратрона ввімкнено вказівне реле (рис. 1.9). Тиратрон живиться змінним струмом напругою 48 В і частотою 400 Гц через мережу електроживлення. Автоматичний вимикач тиратрона діє як селективний пристрій по відношенню до корисного імпульсу датчика.

Коли в мережу подається нульовий потенціал, тобто коли контакти імпульсного механізму датчика розімкнуті, тиратрон запалюється і імпульс подається на показчик. Коли контакти імпульсного механізму замкнуті, в мережу подається негативна напруга близько 5 В, як показано на рисунку 1.8, в цей час тиратрон гасне і таким чином живиться реле вказівника. Таким чином, кількість спрацьовувань вказівного реле пропорційна швидкості обертання гвинта, а отже, і витраті палива. Індикаторне реле показує залишок палива в групі баків літака, пропускаючи індикаторну голку через редуктор.

Основними елементами датчика приладу (рис. 1.8 і 1.10) є крильчатка 1 з напрямним пристроєм 2, черв'ячний редуктор 3 і провідний магніт 4 з магнітною муфтою, встановлені в корпусі датчика 5. Обертання крильчатки передається через черв'ячний редуктор з передавальним числом 1:30 до ведучого магніту і, таким чином, до веденого магніту 6. На валу веденого магніту встановлений імпульсний механізм з переривником 7, по якому ковзають щіткові контакти 8 з платиново-іридієвого сплаву. Імпульсний механізм перетворює частоту обертання робочого колеса в електричні імпульси, кількість яких пропорційна частоті обертання робочого колеса. Імпульсний механізм розміщений у брызкозахищеному металевому корпусі 9 разом з веденим магнітом. Напруга подається через 3-контактний штекерний роз'єм.

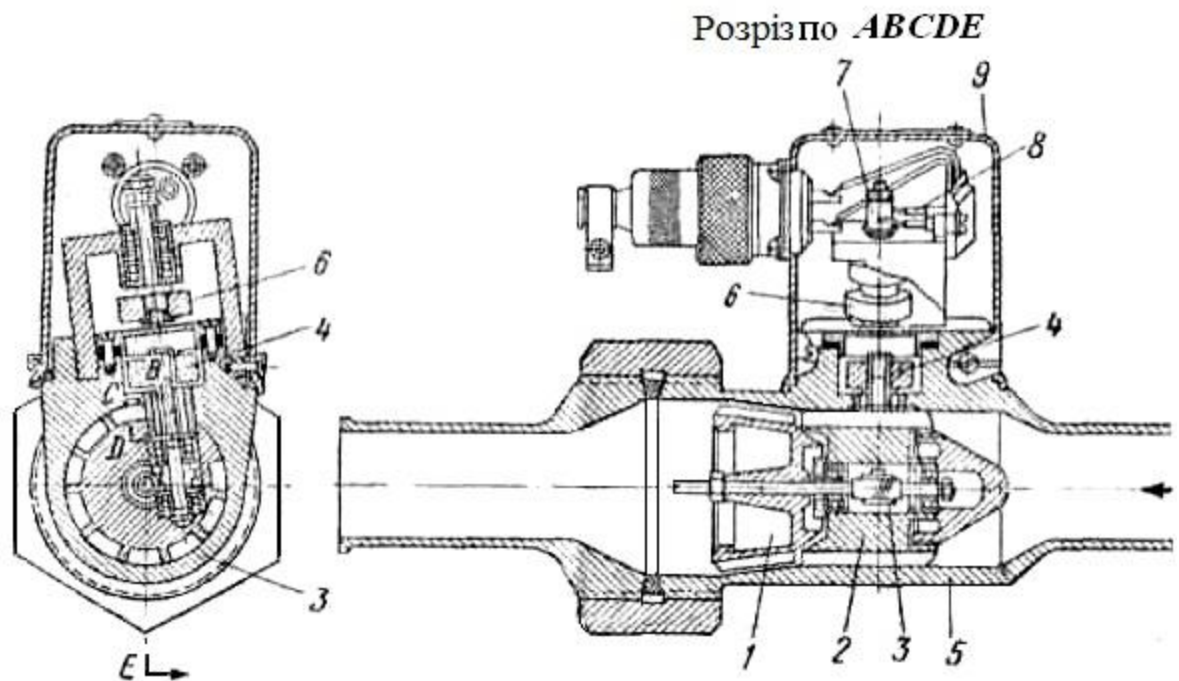


Рис. 1.10. Конструкція датчика витратоміру РТС – 16

1 - крильчатка; 2 - направляючий апарат; 3 - черв'ячний редуктор; 4 - провідний магніт; 5 - корпус датчика; 6 - ведений магніт; 7 - переривник реле; 8 - щіткові контакти; 9 - кожух

## 1.7 Коріолісові масові витратоміри

Перші коріолісові масові витратоміри були розроблені в 1970-х роках. Ці витратоміри вимірювали масову витрату шляхом штучного додання рідині обертального руху і реєстрації крутного моменту, який при цьому виникає.

Принцип дії полягає в тому, що під час коливального руху трубки в системі виникає інерційна сила (сила Коріоліса). Під дією цієї сили трубка починає згинатися, що фіксується датчиком.

Трубка може бути вигнутою або прямою. Деякі конструкції допускають самозаповнення за вертикального встановлення. Якщо витратомір складається з двох паралельних трубок, то потік розділяється на два потоки на вході і об'єднується в один на виході; якщо використовується одна трубка (або дві послідовно з'єднані трубки), то потік у витратомірі не розділяється.

В обох випадках коливання трубок здійснюються за допомогою електромагнітного приводу. Електромагнітний привід складається з котушки, підключеної до однієї трубки, і магніту, підключеного до іншої трубки. На котушки подається змінний струм, що змушує магніти періодично притягуватися і відштовхуватися один від одного.

Розглянемо це явище детальніше. На провідник зі струмом, що протікає по ньому, який являє собою котушку в магнітному полі (магніт), діє магнітна індукція поля силою в ампер, що дорівнює силі струму на векторний елемент довжини провідника:

$$dF = I[dl, B], \quad (1.11)$$

де  $dF$  – елементарна сила Ампера,

$I$  – сила струму,

$dl$  – елемент довжини провідника,

$B$  – індукція магнітного поля.

Магніти та котушки жорстко закріплені на різних трубках, тому сили тягнуть трубки одна від одної та одна до одної. Оскільки напрямок сили має змінюватися, необхідною умовою є протікання через котушку змінного струму.

Датчики можуть визначати положення, швидкість і прискорення трубок. У разі використання електромагнітного датчика магніти в датчику та котушці під час коливань трубки змінюють положення відносно один одного, що призводить до зміни магнітного поля котушки. Таким чином, синусоїдальна напруга на котушці і є рух трубки.

Принцип дії електромагнітних датчиків ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, відкритому Фарадеєм у 1821 році, що полягає у виникненні індукційного струму під час руху котушки в постійному магнітному полі або під час руху магніту (осердя) всередині нерухомої котушки (рис. 1.11). Індукований струм підпорядковується закону Ленца, який свідчить, що власне магнітне поле має напрямок, протилежний зміні магнітного потоку. Закон Фарадея: електрорушійна сила контуру прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_m$  через поверхню контуру:

$$E_{\text{инд}} = - d\Phi_m / dt, \quad (1.12)$$

За відсутності потоку (у разі двотрубного витратоміра) і наявності вібрації різниця у вимірних значеннях двох датчиків  $V_1$  і  $V_2$  буде відсутня. Якщо потік рідини є і привід вібрує, то сили Коріоліса спричиняють вторинні згинальні коливання, внаслідок чого виникає невелика різниця фаз відносного руху трубок. Це фіксується датчиками у двох точках. Прогин трубки під дією сил Коріоліса виникає тільки за одночасної наявності потоку рідини і вібрації трубки. Вібрація без потоку або потік без вібрації нічого не показують на приладі.

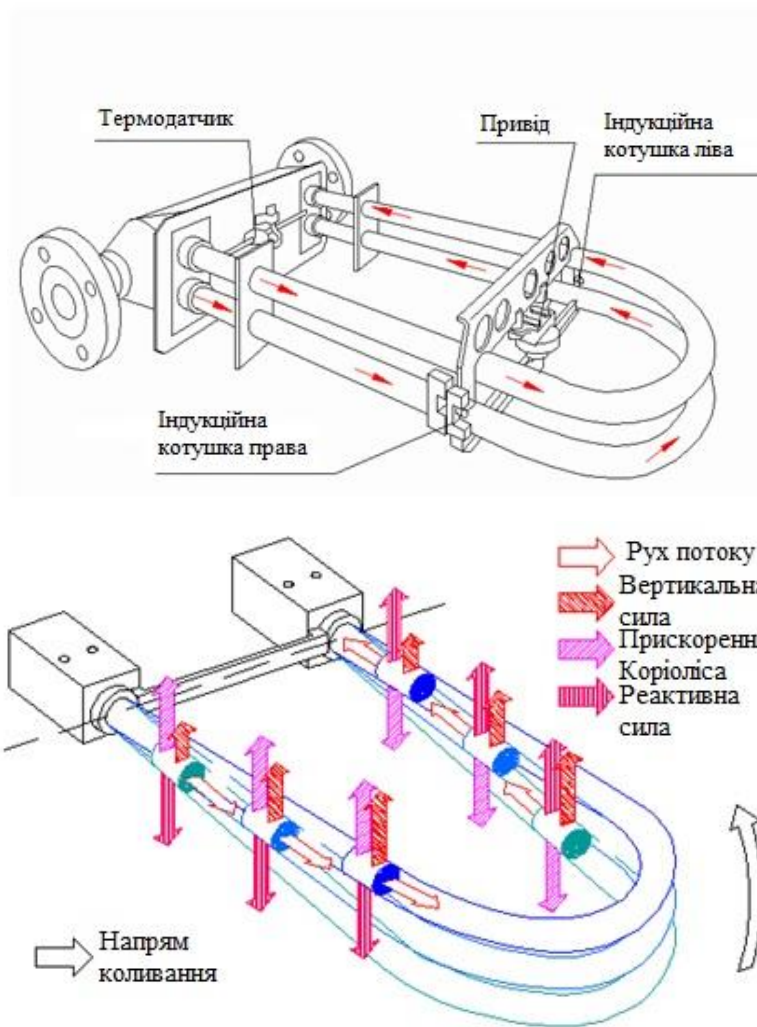


Рис. 1.11. Принцип роботи коріолісового витратоміру

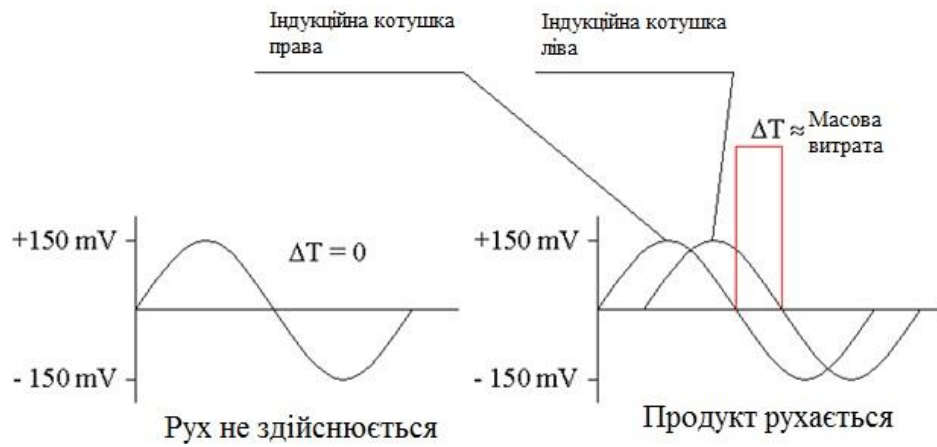


Рис. 1.12. Вимір масової витрати

При одночасному знятті сигналів відбувається зміщення по фазі на  $\Delta T$ . Це відносно запізнювання прямо пропорційно масовій витраті.

Власна резонансна частота двотрубної конструкції залежить від геометрії, матеріалу конструкції і маси всієї конструкції (маси трубки і маси рідини в трубці). Маса труби постійна. Маса рідини дорівнює її густині ( $D$ ), помноженій на її об'єм (також постійний), тому частоту можна визначити за густиною поточної рідини. Таким чином, густину рідини можна визначити, вимірявши резонансну частоту трубки (зауважимо, що густину рідини можна визначити і за відсутності потоку, якщо трубка заповнена рідиною і коливається).

Товщина стінок трубок у різних моделях значно різниться, але навіть у цьому випадку товщина стінок навіть найміцніших трубок менша за товщину стінок трубопроводу. Крім того, у багатьох конструкціях використовуються труби меншого діаметра, що різко збільшує швидкість потоку (з 1,5-3 м/с до понад 7,6 м/с).

Конструкції з великою товщиною стінок трубок і високою швидкістю потоку вимагають застосування спеціальних матеріалів через небезпеку ерозії. Коріолісові витратоміри повинні виготовлятися зі спеціальних матеріалів, щоб уникнути корозії і запобігти точковій корозії. У трубопроводах зазвичай використовують вуглецеву та нержавіючу сталь, оскільки невелика кількість піттингової корозії допустима. У витратомірах навіть невелика кількість точкової корозії є неприпустимою, оскільки стінки тонкі й точкова корозія може спричинити концентрацію напружень у конструкції та призвести до її руйнування. Тому стандартні таблиці корозії (засновані на критерії втрати ваги) не підходять для вибору матеріалів для коріолісових витратомірів, і виробники повинні це враховувати.

Наприклад, формула для визначення масового потоку масового коріолісового витратоміра RotaMASS має такий вигляд:

$$M = S_k \cdot \frac{A_c}{A_e} \cdot \frac{1}{f_v}, \quad (1.13)$$

де  $M$  – масова витрата;

$A_c$  – амплітуда коливань трубок при дії сили Коріоліса;

$A_e$  – амплітуда вимушених коливань;

$A_c / A_e$  – фаза;

$S_k$  – постійна приладу (калібрувальна константа);

$$S_k = S_k (200^0 \text{ C})1+S_{kt} *(T-200^0 \text{ C}), \quad (1.14)$$

де  $S_k (200^0 \text{ C})$  – постійна приладу при  $200^0 \text{ C}$ .

$f_V$  – частота коливань, що змушують

$S_{kt}$  – поправочний коефіцієнт на температуру (константа, залежна від матеріалу)

Рівняння для щільності сенсора :

$$\rho = KD \cdot \left( \left( \frac{f_l(20^0 \text{ C})}{f_V(20^0 \text{ C})} \right)^2 - 1 \right), \quad (1.15)$$

де  $\rho$  – щільність

$f_l(20)$  – частота сили, що змушує, при порожніх трубках і температурі  $200^0 \text{ C}$ .

$f_V(20)$  – частота сили, що змушує, при заповнених трубках і температурі  $200^0 \text{ C}$ .

$KD$  – калібрувальна постійна для щільності

$f_V(20) = f_V(1+F_{KT}*(T-200^0 \text{ C}))$  – температурна поправка для частоти коливань, що змушують

$F_{KT}$  – температурний поправочний коефіцієнт, залежний від матеріалу і розміру трубок.

Ще одним компонентом коріолісової системи вимірювання витрати є перетворювач сигналу і контролер, встановлений на приладовій панелі в операційному



залі. Перетворювач перетворює низькорівневий сигнал датчика в аналоговий сигнал 4-20 мА і частотний вихідний сигнал.

Частотний канал дає інформацію про швидкість потоку, а аналоговий сигнал запрограмований на вимірювання щільності.

Крім маси і щільності продукту, контролер отримує сигнал про температуру продукту. Контролер виводить дані через персональний комп'ютер на принтер для автоматичного друку.

Результатом обробки сигналів датчиків є:

- масова витрата;
- щільність;
- об'ємна витрата;
- температура.

Відносна похибка вимірювань таких масових витратомірів не перевищує  $\pm 0,15\%$ .

Межі відносної похибки для методів вимірювань маси нафти і нафтопродуктів в одиницях зважування згідно з ГОСТ 26976-86 "Нафта і нафтопродукти" мають бути не більшими за  $\pm 0,15\%$ .

Для прямих методів:

$\pm 0,5\%$  при вимірюванні маси нафтопродуктів масою до 100 т.

Об'ємний масодинамічний метод:

$\pm 0,5\%$  - при вимірюванні маси нафтопродуктів понад 100 т;

$\pm 0,8\%$  - при вимірюванні маси нафтопродуктів до 100 т;

Об'ємно-масовий статичний метод.

$\pm 0,5\%$  - при вимірюванні маси нафти і нафтопродуктів понад 100 т;

$\pm 0,8\%$  - при вимірюванні маси нафтопродуктів до 100 т;

гідростатичний метод:

$\pm 0,5\%$  - під час вимірювання маси нафти і нафтопродуктів понад 100 т;  $\pm 0,8\%$  -

під час вимірювання маси нафтопродуктів понад 100 т; Гідростатичний метод;

$\pm 0,8\%$  - при вимірюванні маси нафтопродуктів до 100 т.

Економічна ефективність встановлення масових витратомірів на станціях зважування нафти і нафтопродуктів, що відвантажуються трубопроводами, досягається за рахунок зниження відносної похибки вимірювання маси продукту.

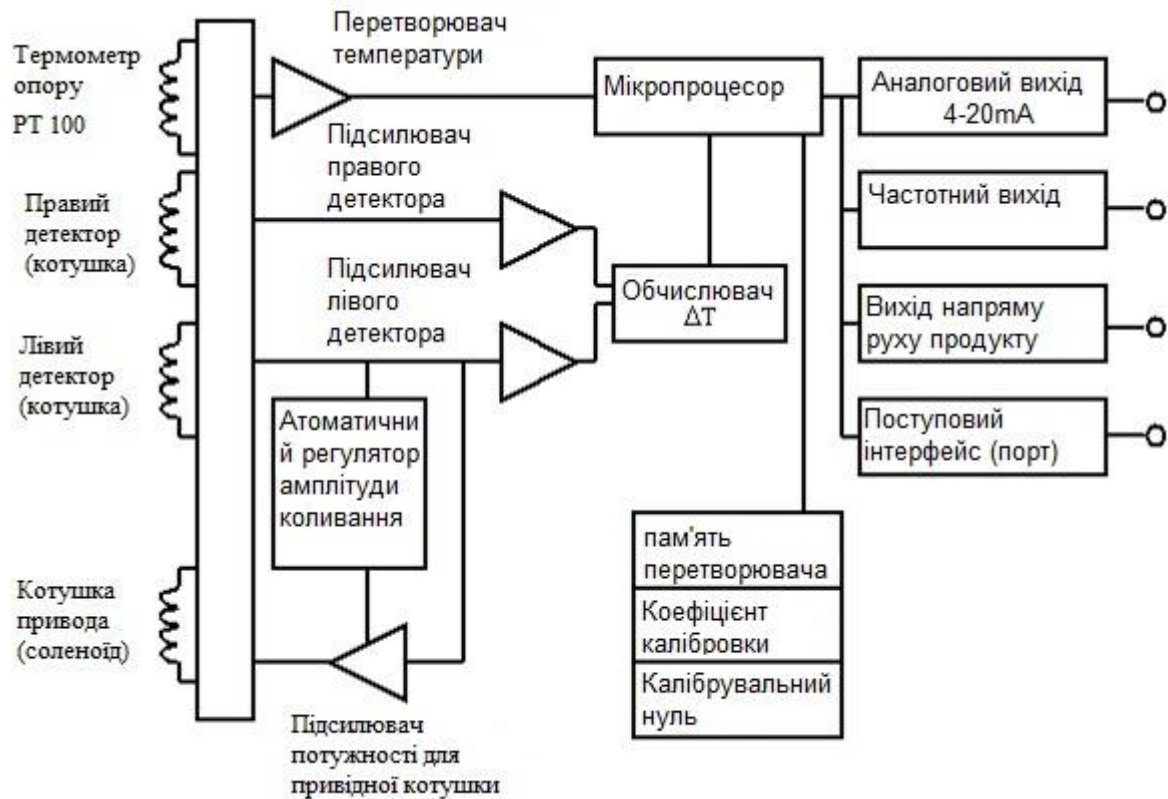


Рис. 1.13. Структурна схема виміру масової витрати

### Висновки:

В даний час автоматизація обладнання для вимірювання витрати, маси та об'єму палива в основному охоплюється існуючими приладами та засобами. Існує також ряд приладів і засобів, призначених для вимірювання витрати палива, для яких при їх розробці були враховані специфічні особливості. Зокрема, широко використовуються автоматизовані системи вимірювання витрати палива на основі доплерівських, ультразвукових, вихроакустичних і лазерних методів. Існують також спеціалізовані прилади для вимірювання витрати, маси та об'єму палива, повністю автоматичні та з вбудованими засобами контролю продуктивності.

Всі види обладнання можуть працювати коректно лише за умови дотримання правил експлуатації. Основними правилами експлуатації є: відсутність коливань тиску, сильних вібрацій і ударів в трубопроводі; підтримання температури і тиску вимірюваного середовища в допустимих межах; плавна зміна швидкості потоку при запуску приладу, щоб уникнути динамічних ударів потоку; відповідність щільності і в'язкості вимірюваного середовища калібрувальному середовищу.

З появою широкого спектру електронних підкладок старі базові підкладки модернізуються і замінюються інтегрованими мікроелектронними підкладками, які значно підвищують надійність і зменшують похибки вимірювань, а також час процесу вимірювання.

Основним завданням завжди є застосування принципів вимірювання та методів перетворення, які найкраще підходять для процесу вимірювання в реальних умовах експлуатації та мають найменшу похибку вимірювання.

Для вирішення проблеми вдосконалення та автоматизації процесу вимірювання витрати палива розглянуто новий метод контролю параметрів витрати палива за допомогою ультразвуку.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ВИБІР ТА АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ПАЛИВА**

## 2.1 Призначення і принцип дії ультразвукових витратомірів

За принципом дії ультразвуку витратоміри умовно можна розділити на 3 групи. Робота першої групи заснована на вимірюванні швидкості поширення ультразвуку в рухомому середовищі, що дорівнює векторній сумі швидкості  $C$  в нерухомому середовищі і швидкості  $V$  руху середовища, для вивчення похибки, викликані зміною  $c$  під впливом різних факторів, визначення величини швидкості  $v$  шляхом вимірювання напрямку потоку і швидкості поширення ультразвуку щодо нього, і вони можуть виконуватися одночасно по одному і тому ж акустичному каналу або по черзі по одному і тому ж акустичному каналу. У першому випадку (рис.2.1) у каналі 1 вимірюється векторна сума швидкостей (в акустичній базі датчика 2), а в каналі 3 вимірюється різниця швидкостей. Результати вимірювань обробляються в блоці 4, і з його виходу надходить сигнал, пропорційний необхідній швидкості потоку  $v$ .

При використанні одного каналу, при використанні 2-х різних робочих частот, також можливе одночасне вимірювання суми і різниці швидкостей, але еквівалентна акустична база в цьому випадку однакова і повинна бути вирівняна всередині електричного каналу шляхом введення регульованого елемента затримки. Вимірювання швидкості поширення результуючої ультразвукової хвилі може бути виконано будь-яким відомим способом вимірювання швидкості ультразвукової хвилі, наприклад, фазовим, імпульсним або їх комбінацією.

Робота витратомірів 2-ї групи заснована на вимірюванні величини "зносу" ультразвукового променя контрольованим потоком середовища.

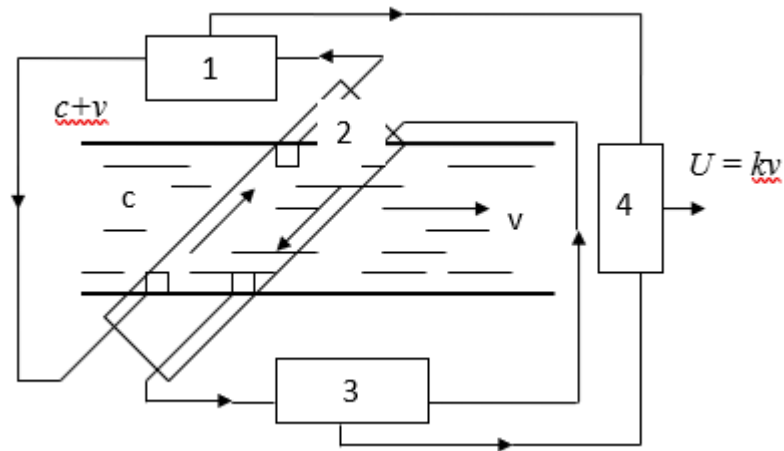


Рис. 2.1. Блок схема ультразвукового витратоміру з векторним складанням швидкостей  
 1 - канал сумарної швидкості; 2 - датчик витратоміру; 3 - канал різницевої швидкості; 4 - блок обробки результатів виміру

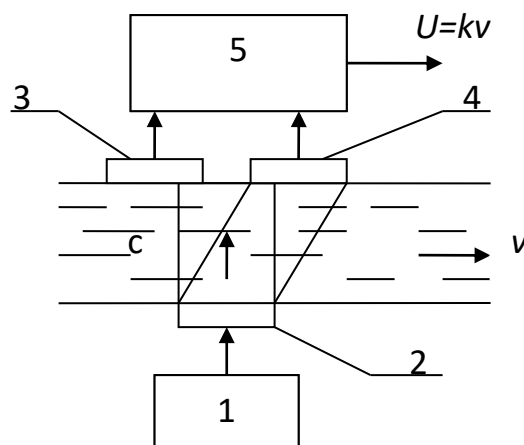


Рис. 2.2. Блок схема ультразвукового витратоміру з "зносом" ультразвукового пучка  
 1 - генератор зондуючих імпульсів; 2 - випромінюючий перетворювач; 3 і 4 - приймальні перетворювачі; 5 - диференціальний підсилювач

Напрямок поширення ультразвуку в цьому випадку перпендикулярно швидкості потоку середовища (рис.2.2). Генератор 1 зондуючого імпульсу робочої частоти

збуджує світловипромінюючий перетворювач 2. Ці приймальні перетворювачі 3 і 4 мають однакові характеристики і мають положення і орієнтацію таким чином, що вихідна напруга  $U$  при  $v=0$  є однаковим. Ця напруга подається на вхід диференціального підсилювача 5, і його вихід пропорційний різниці в цій напрузі, так що він пропорційний витраті середовища. Нижня межа діапазону вимірюваної швидкості потоку становить 0,2-0,5 м/сек для першої групи витратомірів і десятки м/сек для другої групи витратомірів.

Третя група витратомірів використовується для вимірювання витрати при моніторингу руху різнорідних середовищ. Принцип роботи цих витратомірів заснований на використанні ефекту доплера. Ультразвукова вібрація, що посиляється в напрямку потоку, розсіюється частинками середовища, частково відбивається частинками середовища, частково відбивається випромінюючим перетворювачем, поруч з яким розміщений другий приймаючий перетворювач. Прийнятий сигнал відрізняється від переданого на частоті і має величину, відмінну від переданої на частоті, і величина зсуву частоти  $f$  пропорційна швидкості середовища  $v$ , тобто.  $F=2fv / c$ , де  $f$  - частота, а  $c$  - швидкість поширення сигналу. ультразвукові хвилі в середовищі. Цей метод вимірювання кровотоку, зокрема, використовується в медицині та фізіології для визначення швидкості кровотоку у великих кровоносних судинах. Ці вимірювання можуть бути виконані безконтактно шляхом введення ультразвуку під кутом до контрольної області судини. Щоб обчислити справжнє значення швидкості, необхідно враховувати величину цього кута, оскільки зсув частоти визначається проекцією вектора швидкості в напрямку вузького проходу. При вимірюванні витрати доплерівським методом слід зазначити, що має місце весь спектр частот, і його походження обумовлено складним характером розподілу швидкостей в зоні зондування. За результатами спектрального аналізу вихідного сигналу доплерівського витратоміра можна отримати інформацію про розподіл швидкостей і бажаному середньому витраті. Діапазон вимірюваних значень швидкості для таких витратомірів може становити від 0,01 до 100 м/с.

Похибка вимірювання витрати ультразвуковим витратоміром досягає 2-5%, і основною причиною похибки є коливання швидкості ультразвуку в контрольованій частині потоку через зміну температури або складу рідини. Перевагами ультразвукових витратомірів є відсутність рухомих елементів в датчиках витратомірів, простота забезпечення вибухозахищених умов, збереження практично повних ділянок трубопроводу і, отже, дуже малий перепад тиску в місці розташування датчика. Ультразвукові витратоміри мають низьку інерційність і можуть використовуватися для контролю пульсуючого витрати. Основним недоліком витратомірів, що відносяться до перших 2 груп, є зниження точності і надійності при виділенні відкладень і вільних бульбашок на ділянці трубопроводу, що контактує з п'єзоелектричним перетворювачем.

Резонанс виникає, коли частота періодичного зовнішнього впливу наближається до однієї з частот власних коливань в системі, характер вимірювання витратоміром збільшення амплітуди вимушених коливань в коливальній системі багато в чому залежить від характеристик коливальної системи.1 найпростіший спосіб для витратоміра-це коли система з параметрами, які не залежать від стану самої системи, піддається періодичній експлуатації. Простим прикладом системи з такими ступенями свободи є маса  $m$ , підвішена на пружині і знаходиться під впливом гармонійних сил тертя (аналогічне рівняння справедливо для коливальних систем у вигляді електричних ланцюгів).

Рішення цього рівняння, що відповідає сталим вимушеним коливанням, має вигляд:

$$x = \frac{F_0}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{b^2}{m^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^4}}} \cos(\omega t + \varphi) = \frac{F_0}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \omega_0^2}}} \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

де  $\omega_0$  – власна частота системи.

Ультразвуковий випромінювач-це пристрій, який використовується для збудження ультразвукових коливань і хвиль у газоподібних, рідких і твердих середовищах. Ультразвуковий випромінювач перетворює енергію звукового поля в інший тип енергії.

Електроакустичні перетворювачі найбільш широко використовуються в якості ультразвукових випромінювачів. У більшості ультразвукових випромінювачів цього типу, а саме п'єзоелектричних перетворювачах, магнітострикційних перетворювачах, електродинамічних випромінювачах, електромагнітних і електростатичних випромінювачах, Електрична енергія перетворюється в енергію коливань твердого тіла (випромінюючі пластини, гістограми і т.д.), яке випромінює звукові хвилі в навколишнє середовище. Всі ці перетворювачі зазвичай є лінійними, і в результаті вібрація випромінюючої системи відтворює збудливий електричний сигнал.

Резонансні явища використовуються в перетворювачах, призначених для випромінювання монохроматичних хвиль.<sup>1</sup> Вони працюють при одному з власних коливань механічної вібраційної системи, частота якого регулюється електричним генератором, збудливим перетворювачем. Електроакустичні перетворювачі без твердотільної емісійної системи використовуються відносно рідко як ультразвукові випромінювачі; до них відносяться, наприклад, ультразвукові випромінювачі, засновані на розряді в рідині або електричному потоці рідини.

Іншим досить поширеним типом перетворення енергії, що використовується в ультразвукових випромінювачах, є перетворення кінетичної енергії струменя газу або рідини в енергію акустичних коливань. Таке перетворення відбувається, коли струмінь періодично переривається і коли вона взаємодіє з різними типами твердих перешкод. Механізм формування звуку в таких ультразвукових випромінювачах може бути пов'язаний з генерацією автоколивань в середовищах, таких як генератори Хартмана, або з збудженням коливань в твердотільних емісійних системах, таких як пластинчасті гідродинамічні свистки або мембранні газокільцеві випромінювачі. Форма випромінюваного сигналу і його спектр визначаються для даного типу ультразвукового



випромінювача режимом закінчення струменя і геометричними конструктивними параметрами.

Основними характеристиками ультразвукових випромінювачів є частотний спектр, потужність випромінюваного звуку і спрямованість випромінювання. У разі одночастотного випромінювання основною характеристикою є робоча частота ультразвукового випромінювача і його смуга частот, межа якої визначається зменшенням потужності випромінювання в 2 рази в порівнянні з її значенням на максимальній частоті випромінювання. Для резонансного електроакустичного перетворювача робочою частотою є власна частота  $F_0$  перетворювача, а смуга пропускання  $\Delta f$  визначається його коефіцієнтом добротності, тобто.  $\Delta f = f_0 / Q$ . ультразвукові випромінювачі-електроакустичні перетворювачі характеризуються чутливістю, електроакустичної ефективністю і власним електричним опором.

Чутливість ультразвукового випромінювача-це відношення звукового тиску на максимумі характеристик спрямованості на певній відстані від випромінювача (в більшості випадків на відстані 1 м) до електричної напруги на ньому або протікає в ньому струму. Ця функція застосовується до ультразвукових випромінювачів, що використовуються в системах звукової сигналізації та інших подібних пристроях.

Наприклад, для технологічних випромінювачів, що використовуються в процесах очищення, коагуляції та хімічних процесах, основною характеристикою є потужність.

Поряд із загальною потужністю випромінювання, що оцінюється у ватах (кВт, МВт), ультразвуковий випромінювач характеризується питомою потужністю, тобто середньою потужністю на одиницю площі випромінюваної поверхні, або середньою інтенсивністю випромінювання в ближньому полі, що оцінюється в Вт/см<sup>2</sup> або Вт/м<sup>2</sup>.

Ефективність електроакустичних перетворювачів, що випромінюють акустичну енергію в озвучується середовищі, характеризується значенням їх коефіцієнта електроакустичної ефективності, який являє собою відношення випромінюваної акустичної потужності до споживаної потужності. В акустичній електроніці коефіцієнт

електричних втрат, рівний відношенню потужності до акустичної потужності (в дБ), використовується для оцінки ефективності ультразвукового випромінювача.

Ефективність ультразвукових інструментів, що використовуються при ультразвуковому зварюванні, механічній обробці і т.д., характеризується коефіцієнтом корисної дії, який являє собою відношення квадрата амплітуди вібропереміщення на робочому кінці концентратора до потужності, споживаної перетворювачем. У деяких випадках для характеристики перетворення енергії ультразвукового випромінювача використовується ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Ультразвукові випромінювачі-електроакустичні перетворювачі використовуються в широкому спектрі областей ультразвукової техніки з широким діапазоном частот. Електродинамічні випромінювачі використовуються для випромінювання газоподібних середовищ з частотами від десяти Гц до десяти кГц з ККД  $\sim 10\%$ ; потужність не перевищує десяти ВАТ. Вони використовуються для подачі рідини на низьких звукових частотах. П'єзоелектричні перетворювачі є найбільш широко використовуваним типом ультразвукових випромінювачів у техніці. У п'єзоелектричних елементах у вигляді пластин, стрижнів і кілець вони використовуються в діапазоні частот від одиниць кГц до десятків МГц для таких цілей, як ультразвукова технологія, дефектоскопія, різні контрольні та вимірювальні застосування ультразвуку, гідролокатора і т.д. на частотах нижче  $\sim 1$  кГц використовуються п'єзоелементи, які вібрують вигином. ККД п'єзоелектричного ультразвукового випромінювача становить 40-70%, питома потужність досягає 10 Вт/см<sup>2</sup>. Їх динамічний діапазон обмежений зверху нагріванням через електричну та механічну міцність, а також власні втрати.

Магнітострикційні перетворювачі використовуються в гідроакустичній обробці як резонансні ультразвукові випромінювачі в ультразвуковій технології в діапазоні 10-100 кГц. Їх основними перевагами є висока механічна міцність і надійність. ККД таких перетворювачів становить  $\sim 50\%$ , питома випромінювана потужність може досягати 20 Вт/см<sup>2</sup> і більше. Основною причиною обмеження потужності є не лінійність

характеристик через магнітне насичення. Різні типи п'єзоелектричних перетворювачів використовуються для випромінювання в тверді середовища з частотами від 10 МГц до 70 ГГц. Зіставляючи їх з акустичної та електричної сторони, можна отримати дуже широкий діапазон частот. Ці ультразвукові випромінювачі використовуються в акустичній електроніці. Для випромінювання ультразвукових хвиль використовується так зване збудження від поверхні п'єзоелектричних і магнітострикційних кристалів, розташованих в мікрохвильовому резонаторі електромагнітних коливань.

Ультразвукові випромінювачі на газових елементах забезпечують більш ефективне випромінювання газових середовищ, ніж електроакустичні перетворювачі. Однак їх режим роботи нестабільний, а спектр зазвичай дуже складний. Такий ультразвуковий випромінювач не може створювати монохроматичний сигнал або відтворювати сигнал заданої форми. ККД газових кільцевих випромінювачів, що працюють в режимі дозвукового струменевого закінчення (scroll), досягає 30% при потужності випромінювання в одиницях ВАТ. Ультразвукові випромінювачі з надзвуковим режимом витоку (генератор Хартмана) мають інтенсивність випромінювання до 4-5 Вт/см<sup>2</sup>, але їх ККД становить всього 5-6%. Сирени можуть випромінювати акустичну потужність від сотень ват до десятків кВт з ефективністю понад 50% на частотах від декількох кГц до десятків кГц. Всі ці випромінювачі використовуються для впливу ультразвукових датчиків на технічні процеси, що протікають в газових середовищах, а також для сигналізації. Для ультразвукових технологічних процесів, які проводяться в рідинах, використовуються гідродинамічні випромінювачі, що працюють в діапазоні частот  $\sim$  кГц, і випромінювання, що забезпечує інтенсивність До Вт/см<sup>2</sup>. Їх недоліками з точки зору більш широкого використання, як і випромінювачів газового циклу, є низька стабільність режиму і немонохроматическое випромінювання.

Звукові випромінювачі-створюють звукові поля за допомогою різних пристроїв-випромінювачів. Звукове поле, створюване цим випромінювачем, багато в чому

залежить від реєстрації не тільки форми випромінювача і типу його вібрації, а також коефіцієнта звукопоглинання, а й зміни поляризації хвилі. Загасання ультразвуку в кристалах обумовлено декількома причинами: розсіюванням на мікродефектах, поглинанням дислокацій, взаємодією з тепловими коливаннями решітки ; в феромагнетиках і сегнетоелектриках-рухом доменної стінки ; в металах і напівпровідниках-взаємодією з електронами провідності; у парамагнітних кристалах-виникненням акустичного парамагнітного резонансу (квітень) і т.д. для ультразвукових досліджень в кристалах використовуються частоти від 106-107 Гц (при вивченні поглинання дислокацій) до 109-1011 Гц (при вивченні АПР). Ультразвукові дослідження надають інформацію про всі явища, які викликають ослаблення ультразвуку в кристалах, зокрема про неоднорідність і розмір кристалів, які викликають розсіювання і поглинання хвиль, динаміці меж доменів і поверхні фермової конструкції, яка характеризує електрони провідності в металах. Вивчення модуля пружності твердих тіл і їх залежності від механічного напруження (тобто вимірювання так званого модуля пружності 3-го порядку) дає інформацію про процес теплопровідності і теплоємності твердих тіл. вивчення гетерогенних неоднорідних середовищ дозволяє отримати інформацію про характерному розмірі неоднорідності.

Ультразвукові методи, засновані на вимірюванні швидкості звуку і загасання, широко використовуються в техніці для визначення властивостей і складу речовин і для контролю технологічних процесів. Пружні і міцнісні характеристики Металевих матеріалів, кераміки, бетону, ступінь чистоти матеріалу і наявність домішок визначаються швидкістю звуку. Вимірювання швидкості і поглинання в рідині дозволяє визначати концентрацію розчину, стежити за ходом хімічних реакцій та інших процесів, а також за ходом полімеризації. У газах вимірювання швидкості звуку надає інформацію про склад газової суміші. Для ультразвукового вимірювання твердих речовин використовується частота 104-108 Гц в рідинах, до 107 Гц в газах - вище 105 Гц; вибір діапазону частот визначає склад речовини і концентрацію домішок методом ультразвукового поглинання ультразвуку цих середовищ точність досягає високої і

процентної відсоток. Швидкість їх течії визначається зміною швидкості звуку або ефектом Доплера при русі рідин і газів. Для вивчення властивостей речовини також використовуються методи, при яких Параметри резонансної ультразвукової коливальної системи залежать від акустичного опору навантаження, тобто властивостей середовища, яка її навантажує. Це так звані імпедансні методи, використовувані в ультразвукових датчиках рівня, віскозиметрах, твердомірах і т. д. у всіх цих методах Вимірювання і контролю властивостей речовин використовуються дуже низькі інтенсивності ультразвуку; Ці методи вимагають мало часу для вимірювання, їх легко автоматизувати і вони дозволяють здійснювати телеметрію в агресивних і вибухонебезпечних середовищах і безперервний моніторинг речовин у важкодоступних місцях.

Велика група ультразвукових методів, що використовуються для отримання інформації, базується на відбитті та розсіюванні ультразвуку на кордонах між різними середовищами. Ці методи дозволяють здійснювати ультразвукове позиціонування сторонніх тіл або меж розділу середовищ. Методи виявлення об'єктів за допомогою ультразвуку використовуються в різних областях, таких як гідролокація, неруйнівний контроль виробів і матеріалів і медична діагностика. Вони аналізують положення об'єкта і його характеристики, ґрунтуючись на аналізі спеціально допустимого сигналу, відбитого від об'єкта методом пасивного і активного луни, найчастіше використовуються імпульсні ультразвукові сигнали, а відстань до об'єкта визначається за часом затримки відбитого сигналу. У той же час, чим коротше імпульс, тим вище роздільна здатність методу по відстані. Визначення напрямку на об'єкт забезпечується спрямованістю системи випромінювання і прийому, і чим більше при інших рівних умовах, тим коротше довжина хвилі звуку. При виборі несучої частоти в положенні Ехо-імпульсу необхідно враховувати суперечливі фактори, такі як збільшення роздільної здатності методу визначення напрямку і відстані зі збільшенням частоти і зменшення дальності виявлення в цих умовах через збільшення поглинання і розсіювання.

## 2.2 Вихреакустичний метод виміру витрати

Принцип дії перетворювача вихрового акустичного витратоміра заснований на ультразвуковому виявленні вихорів, що утворюються в потоці рідини, коли вона обтікає призму, розташовану поперек потоку.

Перетворювач складається з витратомірного елемента і електронного блоку. Основний корпус проточної частини включає в себе трапецієподібну призму (1), п'єзоелектричний випромінювач ПВ1, ПВ2 (2), п'єзоприймач ПП1, ПП2(3) і проточний корпус теплового датчика (7). Електронний блок оснащений мікропроцесорним адаптивним фільтром з генератором (4), фазовим детектором (5) і блоком формування вихідного сигналу (6) і зібраний на двох друкованих платах: приймачі і цифровій обробці.

Плата цифрової обробки має 2 зелені і червоний світлодіоди, які виконують функцію індикатора стану перетворювача. Зелений світлодіод вказує на нормальну роботу перетворювача, а частота миготіння відповідає частоті, з якою спостерігається імпульс вихідного сигналу перетворювача.

Червоний світлодіод загоряється при швидкості потоку менше 0,8 См/хв або хаотичному характері процесу утворення вихорів, особливо при попаданні стороннього тіла в обтічне тіло.

Рідина розташована на вході рідини в секцію для рідини. Коли потік рідини обтікає це тіло, за ним утворюється вихрова доріжка, і частота наступних за нею вихорів пропорційна швидкості потоку з більш високою точністю. За корпусом проточної частини корпусу проточної частини розташовані один навпроти одного 2 пари чашок, а ультразвукові п'єзоелектричні випромінювачі ПВ1, ПВ2 і

п'єзоприймачі ПП1, ПП2 підключаються до ПИ1, ПИ2 від генератора, де змінна напруга перетворюється в ультразвукові коливання. Після проходження через потік ці коливання виявляються фазомодульованими в результаті їх взаємодії з вихором. У ПП1 і ПП2 ультразвукова вібрація перетворюється в електричну вібрацію і подається на фазовий детектор.

2 пари п'єзоелементів "випромінювач-приймач" компенсують ефекти паразитизму (вібрація трубопроводу, пульсації тиску), що виникають в проточній частині.

У проточній частині встановлений термодатчик для збільшення динамічного діапазону перетворювача за рахунок вимірювання низької вартості, де характеристики перетворювача нелінійні і залежать від температури охолоджуючої рідини. Сигнал від нього автоматично вводиться в програму розрахунку витрати в області цього невеликого значення.

Різниця фаз між сигналами від першої пари і другої пари приймачів визначається на фазовому детекторі. На виході фазового детектора генерується напруга, а частота і амплітуда відповідають інтенсивності і частоті вихору, який є мірою витрати через пропорційність швидкості потоку.

Для видалення випадкових складових сигнал з фазового детектора подається на мікропроцесорний блок формування адаптивного вихідного сигналу. Для підвищення достовірності показань при обробці сигналу розраховується дисперсія періоду вихрових коливань. Таким чином, в результаті перетворення і програмної обробки модуль генерує імпульсний вихідний сигнал.

Проточна частина перетворювача витрати являє собою спеціально сконструйований порожнистий циліндр, в якому встановлений зварювальний стакан з проточним корпусом, термодатчиком і п'єзоелементом. Установка перетворювача в трубопровід здійснюється за допомогою патрубків і фланців. Геометрична форма труби на вході і виході компонента потоку забезпечує збереження метрологічних

характеристик і знижує вимоги до довжини прямолінійного ділянки трубопроводу до і після місця установки перетворювача.

Для проведення планового контролю корпус потоку легко знімається. Електронний блок розміщений в окремому корпусі, з'єднаному з проточною частиною трубчастим кронштейном, що складається з плати приймача і плати цифрової обробки, встановленої на клемній колодці. 2 світлодіода виводяться з плати цифрової обробки сигналів на клемну колодку. З'єднання електронної плати з п'єзоелектричним елементом здійснюється проводом, що проходить всередині трубчастого кронштейна.

На бічній стороні корпусу є штекер 2rmg22b10sh1e1b, який служить для підключення перетворювача до вторинного пристрою і джерела живлення, а також Болти заземлення. Футляр закривається кришкою і герметизується гумовими прокладками, що забезпечує герметичність футляра.

У конструкції електронного блоку з аналоговим вихідним сигналом, цифровим інтерфейсом на основі стандарту RS485 і опціями дисплейного модуля встановлені 3 плати, а 1 кришка корпусу має збільшений розмір і прозорий (скляний) торець для візуалізації показань рідкокристалічного індикатора.

Індикатори показують: час роботи обладнання (год), об'ємна витрата (м<sup>3</sup>/год), зібраний обсяг (м<sup>3</sup>), код самодіагностики. Ці значення вказані в 20-х роках. Опція аналогового виходу, RS485, може бути змінена за допомогою РК-індикатора періоду і може виконуватися в будь-якій комбінації. Перевірка виконується без використання методу заливки. Під час перевірки з компонента потоку витягується тіло потоку і вимірюється його характерний розмір.

Потім перетворювач проходить валідацію з використанням обладнання, доступного в центрі стандартів ГОСТ в будь-якому регіоні, або за допомогою портативного імітатора витрати безпосередньо на місці його експлуатації.



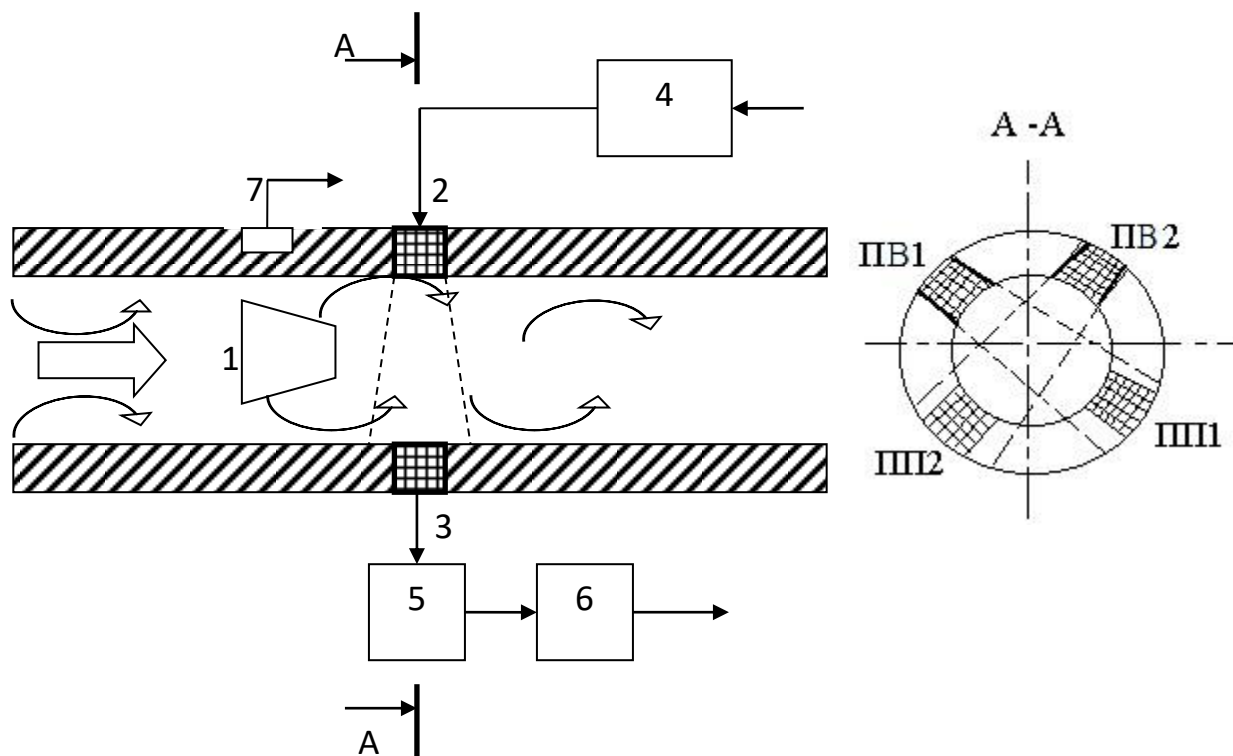


Рис. 2.3. Принцип виміру вихроакустичним методом

Принцип роботи вихрового витратоміра заснований на вихровому принципі Фон Калмана. Пластини, розміщені в корпусі, блокують потік і розділяють утворюються завихрення. Ці завихрення є причиною появи областей з коливаннями тиску, виявленими датчиком. Частота утворення вихорів прямо пропорційна швидкості рухомого середовища.

$$\text{Частота вихорів} = \frac{St * V}{d}, \quad (2.2)$$

де:  $St$  – число Стругала;

$V$  – швидкість середовища;

$d$  – ширина погано обтічного тіла.

Попередній підсилювач детекторного елемента перетворює синусоїдальний сигнал детекторного елемента в частоту імпульсів, пропорційну витраті. Ця частота далі перетворюється датчиком в стандартний вихідний сигнал.

Вихровий витратомір визначає ефективний обсяг при певному робочому тиску. Кількість газу сильно залежить від тиску і температури. Щільність є важливим параметром для розрахунку об'ємного і масового витрати.

Нормальний, робочий об'єм ( $V_N / V_B$ )

$$V_B (\text{м}^3 / \text{ч}) = \frac{V_N (\text{Нм}^3 / \text{ч}) * T_B (K)}{273.15K * P_B (\text{бар.абс.})}; V_N (\text{Нм}^3 / \text{ч}) = \frac{V_B (\text{м}^3 / \text{ч}) * P_B (\text{бар.абс.})}{T_B (K) * 1.013\text{бар}}. \quad (2.3)$$

Нормальна, робоча щільність ( $\rho_N, \rho_B$ )

$$\rho_B (\text{кг} / \text{м}^3) = \frac{\rho_N (\text{кг} / \text{Нм}^3) * \rho_B (\text{бар.абс.}) * 273.15K}{T_B (K)}; \rho_N (\text{кг} / \text{м}^3) = \frac{\rho_B (\text{кг} / \text{м}^3) * T_B (K)}{\rho_B (\text{бар.абс.}) * 273.15K}. \quad (2.4)$$

де  $T_B$  - робоча температура;

$P_B$  - робочий тиск.

Типова частота витратоміра використання вихрових сигналів, мікропроцесорної обробки сигналів і індивідуального калібрування забезпечує високу точність і надійність в найскладніших умовах експлуатації.

При високому рівні вібрації витратомір може видавати вихідний сигнал навіть при відсутності витрати. Вимірювач спроектований таким чином, щоб зменшити вплив вібрації.

Відсутність зношених рухомих частин, нечутливість до перевищення верхньої межі вимірювання витрати і простота подання інформації можуть забезпечити мінімальні витрати на введення в експлуатацію і технічне обслуговування.

## 2.3 Ультразвуковий часоімпульсний витратомір з накладними датчиками

Існує велика різноманітність пристроїв [6, 7] для вимірювання витрати. Однак найбільш ефективно це завдання вирішується за допомогою ультразвукових витратомірів з накладними датчиками, оскільки, по-перше, цілісність трубопроводу не порушується, а по-друге, в потік рідини не вносяться перешкоди.

В даний час найбільш широко використовуються 2 типи ультразвукових витратомірів:

- витратоміри, що використовують той факт, що швидкість поширення ультразвукових хвиль від рухомого середовища є векторною сумою

$$c = c_{ж} + V, \quad (2.5)$$

де  $c_{ж}$  — швидкість поширення ультразвуку в нерухомій рідині;

$V$  – швидкість течії рідини;

- витратоміри, засновані на ефекті Доплера, що має місце при віддзеркаленні ультразвукової хвилі від деякого відбивача або групи відбивачів, що рухаються в потоці рідини.

У витратомірах, що відносяться до першої групи, відхилення величини  $c$  від її значення в нерухомій рідині визначаються шляхом непрямих вимірів наступних величин [6, 7]:

- різниці часів  $\Delta t$  (часоімпульсний імпульсів по потоку і проти нього);
- різниці фаз  $\Delta \varphi$  (фазовий метод) між ультразвуковими коливаннями, що поширюються по потоку і проти нього;
- різниці частот  $\Delta f$  (частотний метод) двох автогенераторів, в якості елемента зворотного зв'язку яких використовується контрольоване середовище.

Сучасні витратоміри, як правило, реалізують часоімпульсний метод. На рис. 2.4 приведена структурна схема ультразвукового часоімпульсного витратоміру з накладними датчиками. Витратомір включає два електроакустичні перетворювачі (ЕП), монтованих із зовнішнього боку трубопроводу по Z схемі або V схемі, і електронний блок, виконаний на базі мікропроцесора 87С51GB фірми Intel. Цикл виміру, що ініціюється МікроЕОМ, починається з вибору одного з напрямів випромінювання ультразвукового імпульсу (наприклад, по потоку), що досягається установкою комутатора прийом-передача у відповідне положення. При цьому ЕП2 випромінює сигнал, а ЕП1 приймає його.

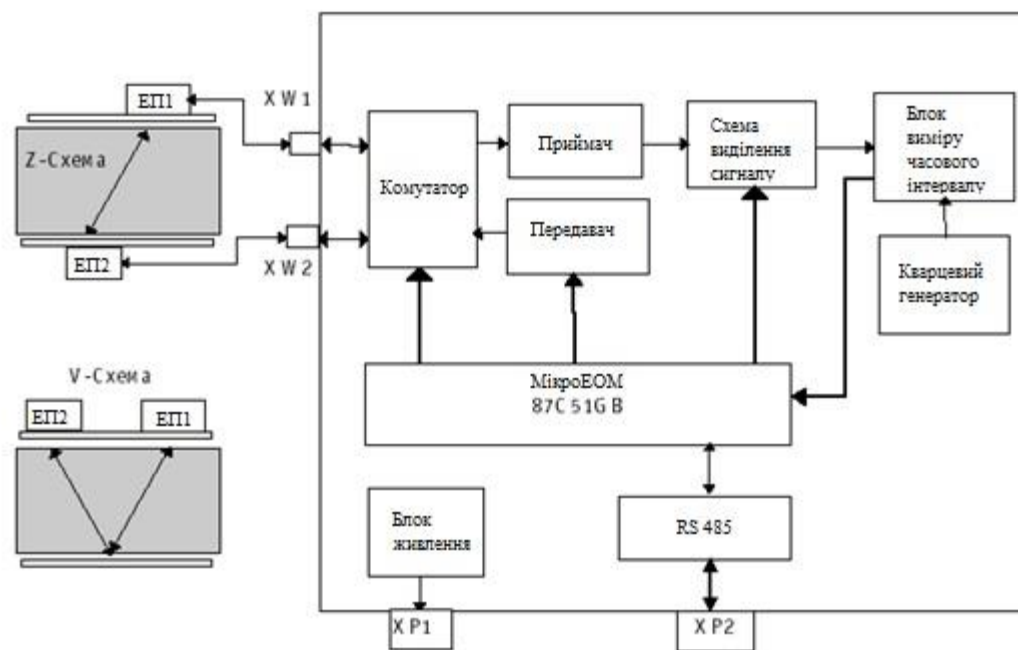


Рис. 2.4. Структурна схема ультразвукового часоімпульсного витратоміру

Отриманий сигнал передається через комутатор в схему ізоляції корисного сигналу, де він посилюється і фільтрується від перешкод. Тут ми визначаємо наявність або відсутність сигналу і уникаємо неправильних вимірювань, коли ультразвукова вібрація зникає, наприклад, при спорожненні трубопроводу. Час поширення сигналу

визначається в одиницях виміру часового інтервалу, з якого оцінка  $t_{\theta}$  надходить в мікроомах. Однак в команді Microeom напрямок випромінювання змінюється в протилежну сторону, описана процедура вимірювання часу поширення сигналу  $t_{\downarrow}$  повторюється, для поточної витрати цикл вимірювання закінчується, Microeom обчислює поточне значення витрати рідини відповідно до рівняння (2.10).

На малюнку 2.5 показаний принцип роботи ультразвукового імпульсного витратоміра. Час поширення сигналу вздовж потоку можна записати у вигляді:

$$t_{\uparrow} = 2(t_{\Pi} + t_{cr}) + \frac{D}{\cos \alpha_{ж} [c_{ж} + V \sin \alpha_{ж}]}, \quad (2.6)$$

Тут  $t_{\Pi}$  – час поширення ультразвуку в призмі електроакустичного перетворювача (ЕП);

$t_{cr}$  – час поширення ультразвуку в стінці трубопроводу;

$D$  – внутрішній діаметр трубопроводу;

$c_{ж}$  – швидкість поширення ультразвуку в нерухомій рідині;

$\alpha_{ж}$  – кут між вертикаллю і напрямом поширення ультразвуку в рідині;

$V$  – швидкість течії рідини.

Аналогічний час поширення сигналу проти потоку можна обчислити по формулі (2.7)

$$t_{\downarrow} = 2(t_{\Pi} + t_{cr}) + \frac{D}{\cos \alpha_{ж} [c_{ж} - V \sin \alpha_{ж}]}, \quad (2.7)$$

Дозволивши систему рівнянь (1) і (2) відносно  $V$ , отримаємо наступне співвідношення (2.8).

$$V = \frac{\frac{c_{ж}}{\sin \alpha_{ж}} (t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{t_{\downarrow} + t_{\uparrow} - 4(t_n + t_{ст})}, \quad (2.8)$$

У вираженні (2.8) входить відношення швидкості ультразвуку в рідині  $c_{ж}$  до синуса кута між вертикаллю і напрямом поширення коливань  $\alpha_{ж}$ , яке відповідно до закону Снеліуса [8] дорівнює (2.11)

$$\frac{c_{ж}}{\sin \alpha_{ж}} = \frac{c_{п}}{\sin \alpha_{п}} = f(\alpha_{п}, c_{п}) = const, \quad (2.9)$$

Тут  $c_{п}$  – швидкість ультразвуку в матеріалі призми ЕП;

$\alpha_{п}$  – кут між вертикаллю і напрямом введення ультразвукових коливань в стінку трубопроводу, який дорівнює куту призми ЕП.

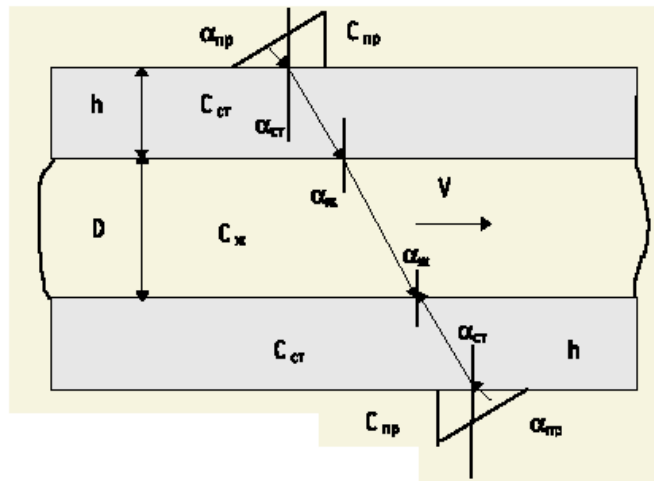


Рис. 2.5. Пояснення принципу роботи ультразвукового часоімпульсного витратоміру

З урахування (1.7) швидкість потоку можна записати у виді (2.10)

$$V = \frac{f(\alpha_{п}, c_{п})(t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{t_{\downarrow} + t_{\uparrow} - 4(t_n + t_{ст})}, \quad (2.10)$$

Відповідно помноживши (2.10) на площу поперечного перерізу трубопроводу, визначимо витрату  $Q$  як (2.11)

$$Q[\text{м}^3/\text{ч}] = 900 S_G \prod D^2 V, \quad (2.11)$$

Тут  $S_G$  – величина, обернено пропорційна до гідродинамічного коефіцієнта, залежного від профілю швидкостей.

Таким чином, вимірявши  $t_{\uparrow}$  та  $t_{\downarrow}$  і знаючи параметри призми ЕП і стінки трубопроводу, із співвідношення (2.11) можна визначити витрату рідини.

#### **2.4 Ультразвуковий доплерівський витратомір з накладними датчиками**

На малюнку 2.6 показана структурна схема ультразвукового доплерівського витратоміра з верхнім датчиком. Пристрій включає в себе 2 електронних компонента поза трубопроводу і електронний блок, утворений мікроомом на основі кварцового генератора, підсилювача потужності, ортогонального приймача, фазового детектора (FD), схеми оцінки центру ваги спектра прийнятого сигналу і мікропроцесора 87C51FB фірми Intel.

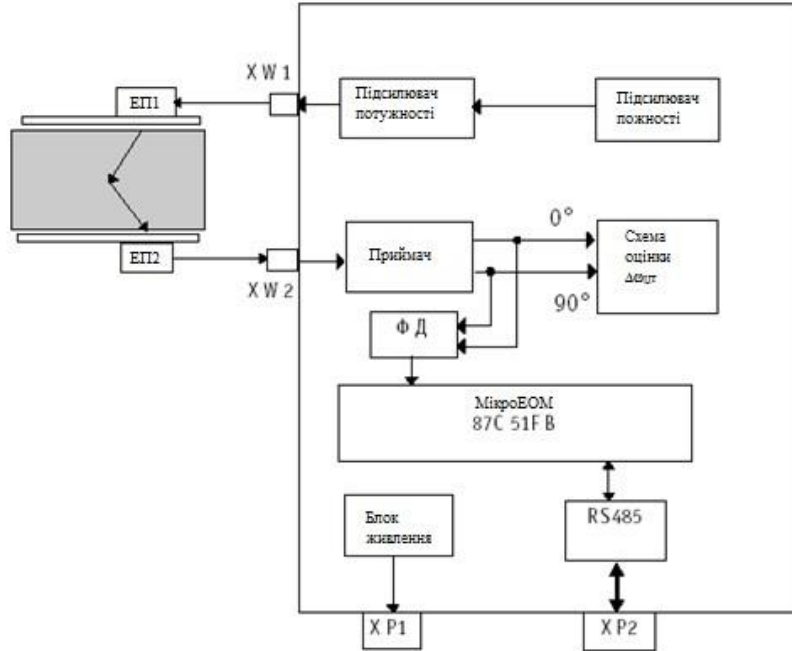


Рис. 2.6. Структурна схема ультразвукового доплерівського витратоміру

Пристрій реалізує принцип квадратурної демодуляції прийнятого сигналу і дозволяє визначати напрямок руху рідини. Збуджуваний безперервною вібрацією з частотою  $\omega_0$ , що надходить з виходу підсилювача потужності, EP1 створює ультразвукові хвилі, що випромінюються в керуючу середу під кутом до осі трубопроводу, на вхід приймального перетворювача EP2 надходить відбитий сигнал від неоднорідності потоку. Прийнята вібрація подається на приймач, на виході якого присвоюється сигнал ортогональної доплерівської частоти, з одного боку на FD, з іншого на вхід схеми оцінки спектрального центроїда. Числові значення  $\Delta \Omega_{ст}$  надходять в мікроЕОМ, де, згідно співвідношенням (9) і (6) обчислюється значення витрати. Загальна тривалість експлуатації таких пристроїв на сьогоднішній день становить понад 4000 днів. Тепер сигнал  $t \downarrow$  спрямований проти потоку. На цьому етапі цикл вимірювання завершений і поточне значення витрати рідини розраховується відповідно до рівняння (6).



Пояснення принципу роботи схема ультразвукового доплерівського витратоміру приведений на рис. 2.7. Відоме [7, 9], що, якщо точковий розсіювач (рис. 2.7), що рухається уздовж осі труби зі швидкістю  $V$ , опромінюється під кутом  $\alpha_{ж}$  до вертикалі сигналом з частотою  $\omega_0$ , то частота  $\omega_d$  прийнятого ехо-сигналу визначається співвідношенням:

$$\omega_d = \omega_0 \frac{1 - V \sin \alpha_{ж}}{c_{ж}} \frac{c_{ж}}{1 + V \sin \alpha_{ж}} \frac{1}{c_{ж}}, \quad (2.12)$$

Розклавши другий співмножник в (2.12) в статичній ряд і узявши різницю  $\Delta\omega = \omega_d - \omega_0$ , отримаємо так званий локаційний варіант формули ефекту Доплера:

$$\Delta\omega = 2\omega_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{V \sin \alpha_{ж}}{c_{ж}} \right)^n$$

Як правило,  $V \ll c_{ж}$ , тому можна обмежитися лінійним наближенням

$$\Delta\omega = 2 \frac{\omega_0 V \sin \alpha_{ж}}{c_{ж}}, \quad (2.13)$$

Через співвідношення (2.7) з вираження (2.11) витікає, що

$$V = \frac{\Delta\omega f(\alpha_{п}, c_{п})}{2\omega_0}, \quad (2.14)$$

, тобто величина доплерівського зрушення прямо пропорційна швидкості розсіювача  $V$ .

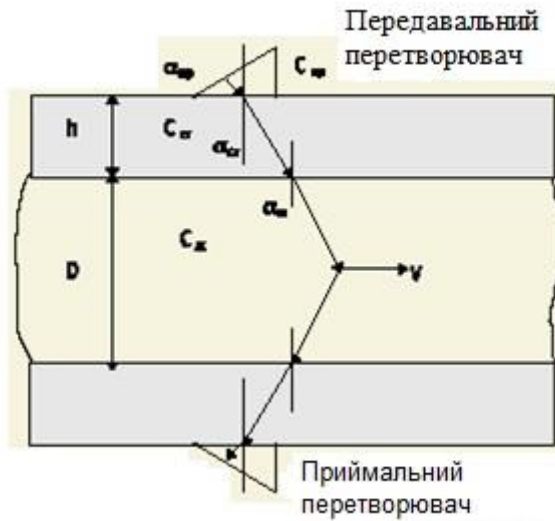


Рис. 2.7. Пояснення принципу роботи схеми ультразвукового доплерівського витратоміру

У реальних умовах набір розсіювачів різної природи, випадковим чином розташованих в просторі, бере участь у формуванні об'ємних розсіяних сигналів. У цьому випадку поняття "доплерівський зсув" замінюється поняттям "доплерівський спектр", де отримана енергія відображає розподіл в залежності від радіальної швидкості розсіювача. Для того щоб використовувати співвідношення (2.14) у фактичному розрахунку, досить мати на увазі центр ваги спектра відбитого сигналу зі значенням  $\Delta \Omega$ .

### Висновок:

З розглянутих 3-х груп акустичних витратомірів найчастіше використовуються пристрої з ультразвуковими коливаннями, спрямованими вгору по потоку. Ультразвукові витратоміри з зносом використовуються дуже рідко. Вони значно менш чутливі, ніж перші. Доплерівські пристрої в основному використовуються для вимірювання локальних швидкостей потоку. Довгохвильові акустичні витратоміри з'явилися недавно, і у них ще не було достатнього досвіду в їх застосуванні.

З трьох методів вимірювання різниці в часі проходження ультразвукових коливань уздовж потоку найбільш популярним є частотно-імпульсний метод з використанням одноканального перетворювача витрати. Він може забезпечити найвищу точність вимірювання, а зменшена похибка вимірювання може бути знижена до (0,5-1)%. Були створені пристрої з ще більш низькими похибками до  $\pm(0,1; 0,2)\%$ , що дозволяє використовувати такі пристрої в якості зразкових. Схема вимірювання 2-канального витратоміра проста, але точність низька. Фазові витратоміри мають переваги перед частотними витратомірами, коли необхідно вимірювати низькі швидкості до 0,02% або при вимірюванні забруднених середовищ.

При деформованому полі швидкостей можуть виникати великі додаткові похибки через недостатню довжини прямої частини трубопроводу. Для усунення помилок необхідно використовувати насадку або конфузор, перетворювач витрати, в якому профіль вирівнюється або акустична вібрація направляється не в діаметральній площині, а вздовж декількох шнурів.

Основною областю застосування ультразвукових витратомірів є вимірювання витрати різних рідин. Вони особливо підходять для вимірювання витрати непровідних і агресивних рідин, а також нафтопродуктів.

# РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА ВУЗЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ПАЛИВА

### 3.1 Принципи побудови і виміру витрати палива

Принцип роботи описаний на рис. 3.1. Ділянка трубопроводу з встановленими в ньому ПЕП1 і ПЕП2 утворює Первинний ультразвуковий перетворювач витрати - УПВ. ПЕП1 і ПЕП2 працюють поперемінно в режимі приймач-випромінювач і забезпечують випромінювання рідини і прийом від неї ультразвукових імпульсів під кутом до осі трубопроводу. Рух рідини викликає зміну часу повного поширення ультразвукового сигналу вздовж потоку і проти течії.

Швидкість поширення ультразвукового імпульсу в вимірювальній рідині, що заповнює трубопровід, дорівнює сумі швидкості ультразвуку в нерухомому середовищі і швидкості палива  $V$ , спроектованої в цьому напрямку поширення ультразвуку.

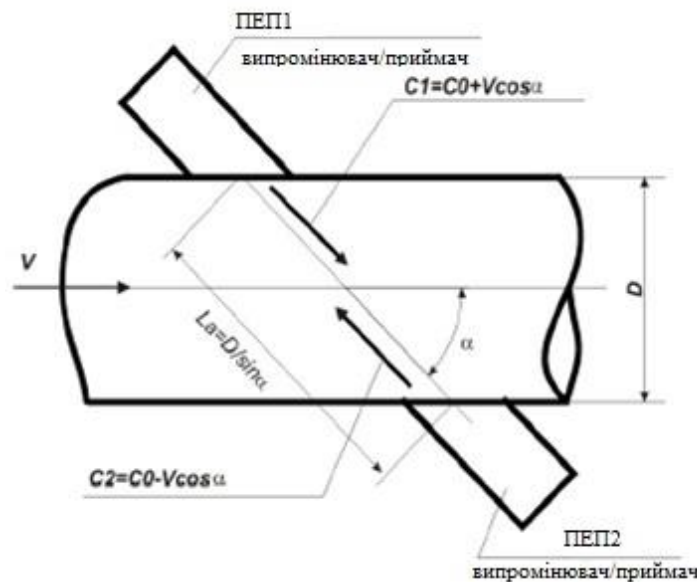


Рис. 3.1. Пояснення принципу дії витратоміру

де  $L_a$  - довжина активної частини акустичного каналу;

$L_d$  - довжина активної частини акустичного каналу; ПЕП;

$C_0$  - швидкість ультразвуку в нерухомій воді;

$V$  - швидкість руху води в трубопроводі;

$\alpha$  - кут відповідно до рис. 1.

Таким чином, час поширення ультразвуку по потоку і проти нього визначається відповідно до формул (3.1) і (3.2) :

$$t_1 = \frac{L_d - L_a}{C_0} + \frac{L_a}{C_0 + V \cdot \cos(\alpha)}, \quad (3.1)$$

$$t_2 = \frac{L_d - L_a}{C_0} + \frac{L_a}{C_0 - V \cdot \cos(\alpha)}, \quad (3.2)$$

де  $t_1, t_2$  – час поширення ультразвукового імпульсу по потоку і проти потоку.

Пристрій, що містить електронні вузли формування і перетворення ультразвукових імпульсів, обчислення витрати, об'єму і виводу на основі вимірних часів поширення ультразвукових імпульсів, утворює вторинний перетворювач – електронний блок (ЕБ). Обчислення витрати  $Q$  в ЕБ здійснюється по формулах (3.3) и (3.4) з урахуванням формул (3.1) и (3.2):

$$V = \frac{(t_2 - t_1) \cdot C_0^2}{2L_a \cdot \cos(\alpha)}, \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot K}{4} \times \frac{(t_2 - t_1) \cdot C_0^2}{2 \cdot L_a \cdot \cos(\alpha)}, \quad (3.4)$$

де  $D$  - внутрішній діаметр УПВ в зоні установки ПЕП1 и ПЕП2;

$K$  - коефіцієнт корекції, що розраховується в залежності від гідродинамічних властивостей рідини і характеру потоку по УПВ.

Для виключення впливу зміни швидкості ультразвуку в рідині від температури, в приладі враховується фактична швидкість ультразвуку, розрахована по формулі (3.5), яка є хорошим наближенням формули (3.6).

$$C_0^2 = \frac{L_{\text{д}}^2}{t_1 \cdot t_2}, \quad (3.5)$$

$$C_0^2 = \left( \frac{2 \cdot L_{\text{д}}}{t_1 + t_2} \right)^2, \quad (3.6)$$

Витратомір являє собою трубу з нержавіючої або кислотостійкої сталі, до кінця якої приварені відповідно до ГОСТ12815-80 2 фланця. У середній зоні труби приварені 2 тримача навпроти один одного під кутом 45°. Тримач використовується для установки ПЕП1 і ПЕП2. ПЕП1 і ПЕП2 монтується за допомогою паронітових прокладок і фіксуються в тримачі гайками.

Конструкція вторинного перетворювача являє собою корпус обладнання для установки. У нижній частині корпусу розташовані роз'єми для підключення джерел живлення ПЕП1, ПЕП2, ПЕП3 і ПЕП4 за допомогою високочастотних кабелів, прийому аналогових і частотних сигналів ЕС Передня панель ЕВ захищена прозорою кришкою і кріпиться до корпусу 4 гвинтами через ущільнювач.

Розміщення функціональних блоків ЕС в корпусі здійснюється за платно-модульним принципом. З'єднання між платами є функціонально завершеним вузлом ЕС і проходить через поперечну плату.

Аналогова плата і плата мікропроцесора кріпляться до поперечної плати за допомогою знімного з'єднання.

Функціональна схема 2-канального ультразвукового витратоміра показана на рис. 3.2.

Аналогова плата забезпечує:

- гальванічне відділення датчика ПЕП від вимірювальної частини вимірювального каналу;
- відправка потужного імпульсу по кабельній лінії з хвильовим опором 50 Ом в ПЕП;
- прийом слабких сигналів від ПЕП2 (посилення і детектування);
- логічна настройка тимчасового процесу передачі і прийому імпульсів;
- фвтоматичне регулювання посилення приймача в залежності від рівня сигналу, що надходить на вхід;
- підвищений дозвіл для точного вимірювання тимчасових інтервалів.



Рис. 3.2. Функціональна схема двоканального ультразвукового витратоміру

Мікропроцесорна плата:

- управляє процесом попереминого зондування потоку рідини ультразвуковими імпульсами;

- обчислює значення вимірюваних параметрів;
- забезпечує введення програмованих параметрів з клавіатури і виведення інформації на індикатор;
- формує вихідні аналогові сигнали пропорційні витратам в кожному каналі виміру;
- забезпечує зв'язок по мережі RS - 485;
- проводить періодичну самодіагностику.

Крос - плата забезпечує:

- необхідна напруга живлення;
- формування вихідних частотно/імпульсних сигналів.

### 3.1.1 Плата аналогова

Структурна схема плати приведена на рис.3.3.

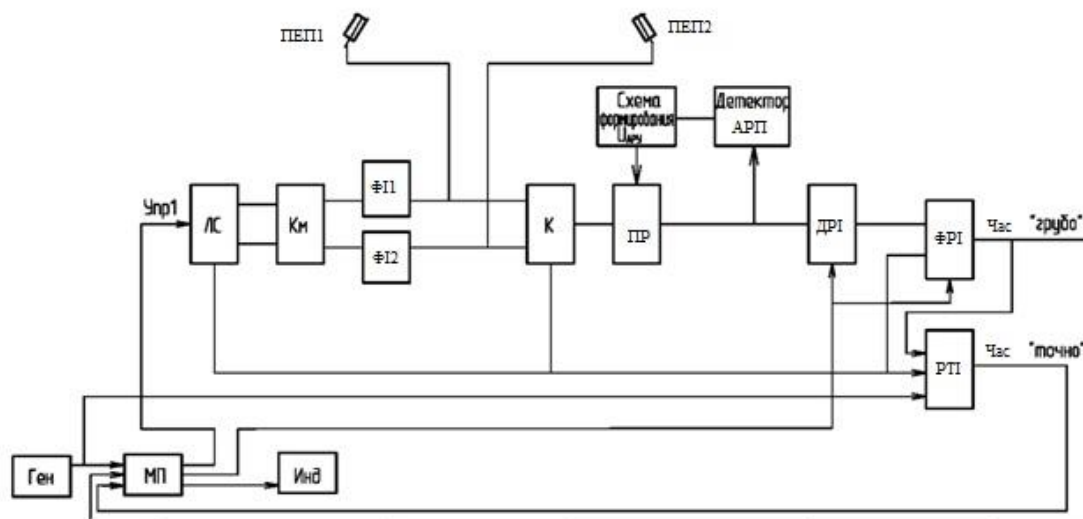


Рис. 3.3. Структурна схема аналогової плати

Плата аналогова складається з:

- логічної схеми, що управляє (ЛС);
- комутатора КМ;



- формувачів імпульсів ФІ1, ФІ2;
- ключів К;
- підсилювача регульованого ПР;
- схеми формування напруги автоматичного регулювання посилення СФ АРП;
- детектора АРП;
- детектора робочого імпульсу ДРІ;
- формувача робочого імпульсу ФРІ;
- розширювача часових інтервалів РТІ.

Плата забезпечує:

- послітку потужних імпульсів через кабельну лінію з хвилевим опором 50 Ом на датчики ПЕП1 та ПЕП2;
- прийом (посилення і детектування) слабких сигналів від датчиків ПЕП1 та ПЕП2;
- логічне узгодження часових процесів послітки і прийому імпульсів, підключаючи до приймача відповідні датчики, збуджуючи відповідні формувачі імпульсів;
- автоматичне регулювання коефіцієнта посилення (АРП) приймача залежно від рівня сигналу, що поступає на його вхід;
- формування сигналу "час "грубий" для визначення часу поширення сигналу (з дискретністю 200 нс) і сигналу "час "точний" (з дискретністю, що відповідає дозволу підсилювача часових інтервалів);
- збільшення дозволу для точного виміру часових інтервалів.

Часова діаграма роботи плати аналоговою приведена на рис. 3.4. ЛС забезпечує логічне управління роботою плати.

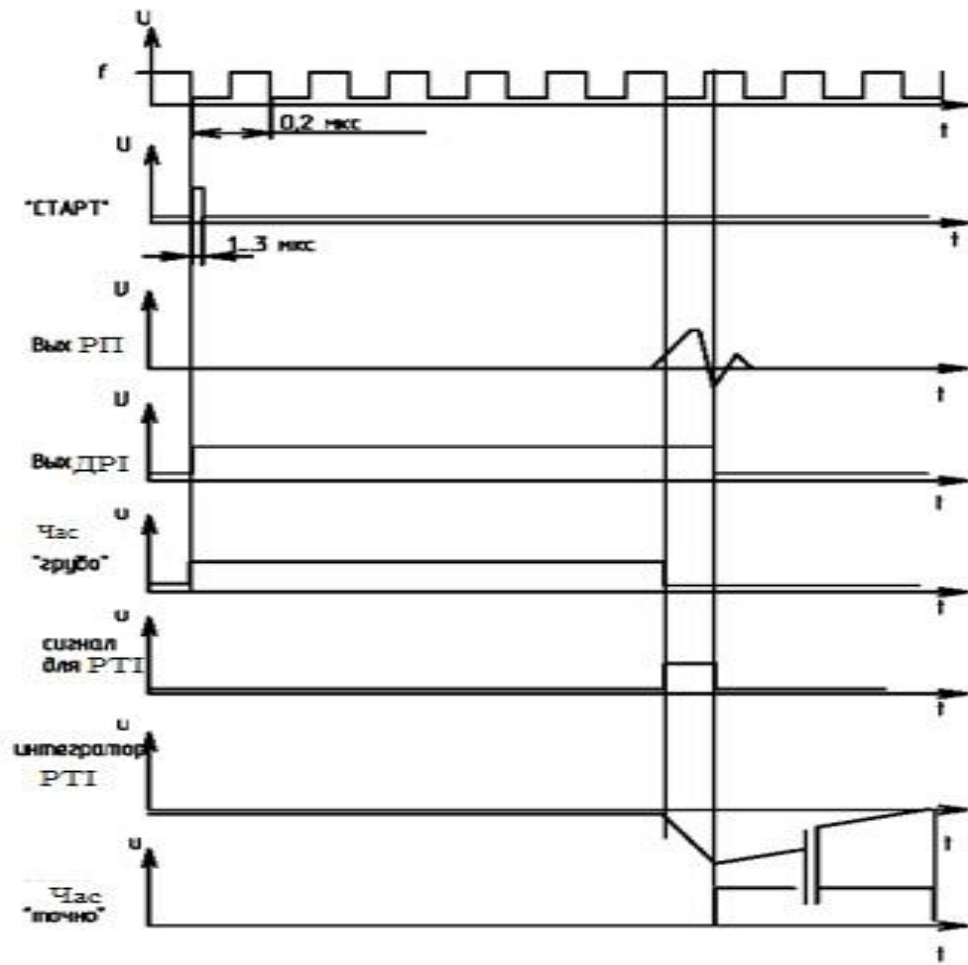


Рис. 3.4. Часова діаграма роботи аналогової плати

Комутатор КМ служить для комутації імпульсів з ЛС для почергового запуску ФІ1, ФІ2.

Формувачі ФІ1, ФІ2 служать для формування вихідних імпульсів ПЕП1, ПЕП2.

Вхідні імпульси через ключі К поступають на регульований підсилювач РП, охоплений системою АРП.

Детектор ДРІ призначений для фіксації моменту приходу робочого імпульсу, по якому схемами ФРІ та РТІ формуються сигнали "час "грубий", "час "точний".

### 3.1.2 Плата мікропроцесорна

Структурна схема плати приведена на рис. 3.5.

Плата мікропроцесорна складається з:

- генератора Г;
- мікропроцесора ПРЦ;
- постійного запам'ятовуючого пристрою ПЗП;
- програмованого таймера ПТ;
- порту введення-виводу ПВВ;
- дешифратора Дш;
- індикатора І;
- перетворювача двійково-десятькового коду в семисегментний Х/У;
- електричного перепрограмованого постійного запам'ятовуючого пристрою ЕППЗП.

Генератор Г на 5 МГц слугує для забезпечення роботи процесора ПРЦ і заповнення в ПТ інтервалів часу "час "грубо" і "час "точний", що поступають з аналогової плати витратоміру.

Таймер Т0 спільно з таймером порту ПВВ служить для формування сигналу F1, пропорційного витраті палива. ПТ виконаний на мікросхемі - 82С53.

ПРЦ виконаний на КМОП однокристальною восьмирозрядною мікроЕОМ типу 80С39.

ПЗП служить для зберігання програм роботи ПРЦ и виконано на регістрі адреси (мікросхема 74НС573) і безпосередньо запам'ятовуючого пристрою на 4Кх8 біт (мікросхема 27С64).

Індикатор І працює в динамічному режимі і управляється ПРЦ через порт ПВВ, Дш і перетворювач Х/У.

ЕППЗП служить для зберігання програмованих параметрів часу роботи і розрахованого об'єму палива.

ЕППЗП виконано на мікросхемі 24С02.

Інформація в ЕППЗП записується послідовно біт за бітом через ПВВ і в такому ж виді прочитується безпосередньо в порт ПРЦ.

### **3.1.3 Плата живлення**

Плата живлення забезпечує отримання необхідної напруги живлення.

Плата містить перетворювач частота - струм для формування вихідного струмового сигналу і підсилювач для формування частотного сигналу.

## **3.2 Аналіз структурних схем ультразвукових витратомірів**

Розглянемо схемотехніку найбільш поширених варіантів УЗ доплерівських приладів.

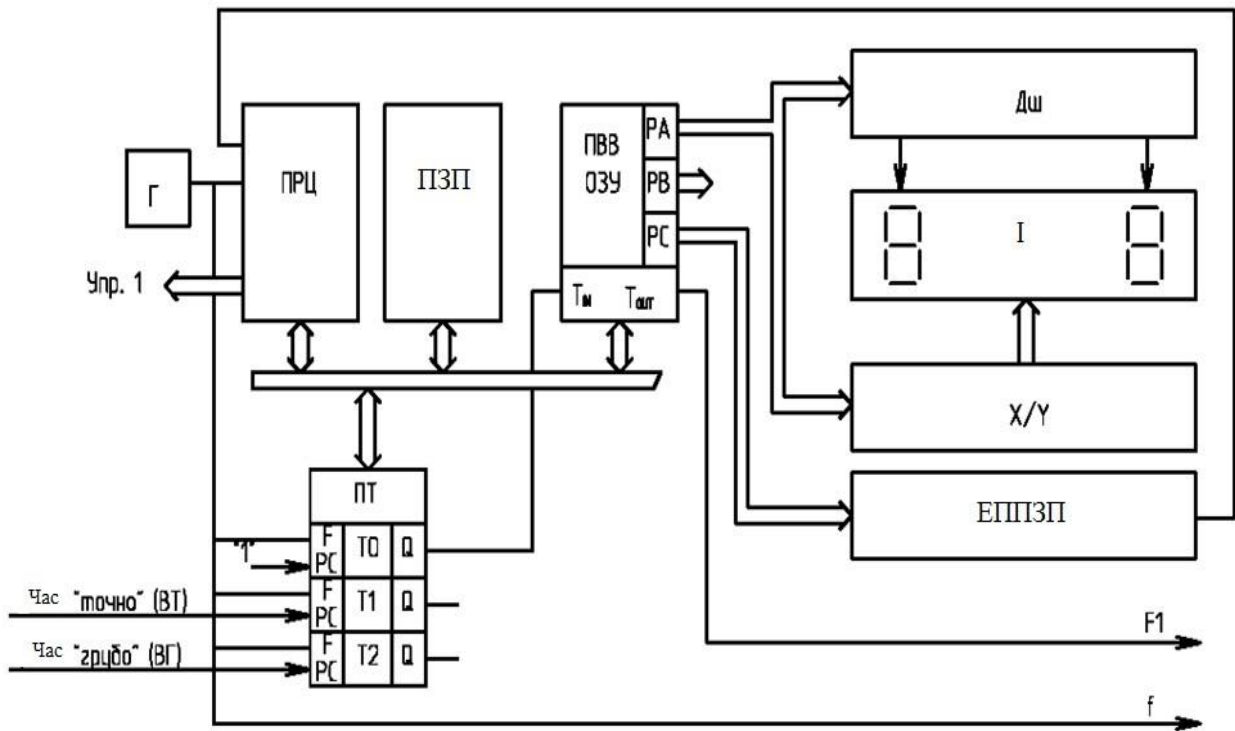


Рис. 3.5. Структурна схема мікропроцесорної плати УЗ витратоміра

Для побудови доплерівських індикаторів швидкості потоку використовується ряд відомих радіотехнічних вузлів і блоків, що застосовуються в короткохвильових приймально-передаючих пристроях і допрацьованих з урахуванням специфіки взаємодії з електроакустичним елементом доплерівського приладу - ультразвуковим датчиком .

Блок схема простого безперервно-хвильового УЗ приладу із звуковою індикацією без виділення інформації про напрям потоку показана на рис. 3.6.

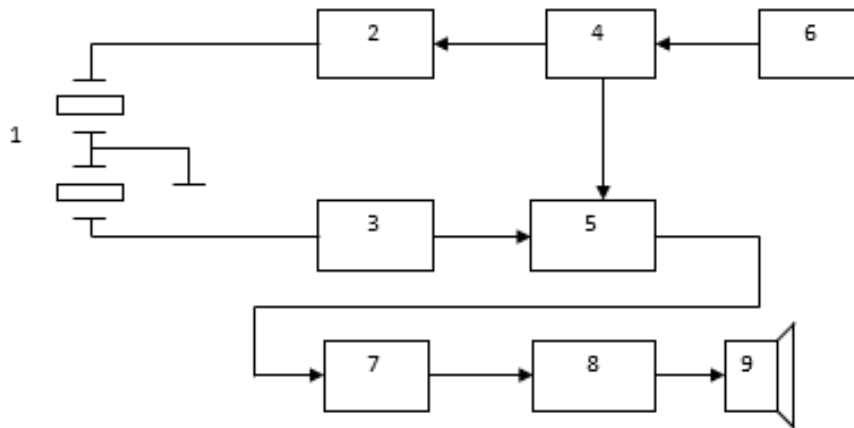


Рис. 3.6. Блок схема безперервно-хвильового доплерівського витратоміру  
1 – УЗ датчик, 2 – ПП, 3 – попередній підсилювач, 4 – задаючий генератор, 5 – синхронний детектор, 6 – кварцовий резонатор, 7 – смуговий фільтр, 8 – УНЧ, 9 – індикатор

Розглянемо роботу цього витратоміру. Що виробляється задаючим генератором 4 (частота якого стабілізується кварцовим резонатором 6 сигнал подається на вхід підсилювача потужності (ПП) 2, посилюється останнім і випромінюється у вигляді акустичної хвилі, сфокусованої УЗ перетворювачем 1 по напрямку досліджуваної посудини. Відбитий сигнал, що несе інформацію про рух формених елементів палива в цьому трубопроводі, перетвориться приймальним елементом УЗ датчика, посилюється попереднім підсилювачем з малим рівнем шумів 3 і детектується синхронним детектором 5, керованим задаючим генератором 4.

Ехо-сигнал містить спектр доплерівських частот, обумовлений рухом окремих елементів потоку в аналізованому об'ємі. Цей сигнал можна представити у вигляді суперпозиції сигналів, що привносяться усіма лініями струму, що проходять через вимірювальний об'єм. Вклад кожної компоненти в цей сигнал пропорційний потужності ультразвуку, розсіяній елементами потоку уздовж цієї лінії, тобто інтегралу

по лінії струму від чутливості в пучку (залежності величини сигналу, прийнятого від точкового розсіювача, від координат цього розсіювача).

Для спрощення наступних викладень, розглянемо сигнал на виході блоку 3, якщо складається з трьох компонентів: частоти, що несе, і сигналів, відбитих від прямого і зворотного потоків. Такий сигнал може бути представлений у виді:

$$S(t) = A_0 \cos(w_0 t + \phi_0) + A_f \cos(w_0 t + w_f t + \phi_f) + A_r \cos(w_0 t - w_r t + \phi_r), \quad (3.3)$$

де  $A$ ,  $w$  и  $\phi$  - відповідно амплітуда, кутова частота і фаза кожного сигналу, а індекси  $0$ ,  $f$  та  $r$  означають ту, що несе, прямий і зворотний потік.

Цей сигнал поступає на детектор 5. З математичної точки зору детектор є перемножувач двох сигналів. Умноживши це вираження на  $\cos w_0 t$  - сигнал з виходу опорного генератора, отримуємо сигнал на виході синхронного детектора 5:

$$D(t) = \frac{1}{2} A_0 [\cos(2w_0 t + \phi_0) + \cos(\phi_0)] + \frac{1}{2} A_f [\cos(w_f t + \phi_f) + \cos(2w_0 t + w_f t + \phi_f)] + \frac{1}{2} A_r [\cos(w_r t - \phi_r) + \cos(2w_0 t + w_r t + \phi_r)] \quad (3.4)$$

Цей сигнал далі фільтрується смуговим фільтром 7 для усунення низькочастотних перешкод, що виникають внаслідок віддзеркалення УЗ сигналу від стінок посудини (амплітуда сигналу від яких на декілька порядків вище за амплітуду корисного доплерівського сигналу), що повільно рухаються, постійної складової

$\frac{1}{2} A_0 \cos(\phi_0)$  і ВЧ шуму (включаючи  $\frac{1}{2} A_0 \cos(2w_0 t + \phi_0)$ ,  $\frac{1}{2} A_f \cos(2w_0 t + w_f t + \phi_f)$  та  $\frac{1}{2} A_r \cos(2w_0 t + w_r t + \phi_r)$ ).

Вираження для відфільтрованого сигналу має вигляд:

$$\tilde{D}(t) = \frac{1}{2} A_f \cos(w_f t + \phi_f) + \frac{1}{2} A_r \cos(w_r t - \phi_r) , \quad (3.5)$$

Цей сигнал подається потім на підсилювач низької частоти (УНЧ) 8 для відтворення системою індикації 9.

### **3.3 Імпульсний ультразвуковий витратомір з індикацією без виділення інформації про напрям потоку**

Блок-схема імпульсного УЗ доплерівського приладу з індикацією без виділення інформації про напрям потоку показана на рис. 3.7.

Як видно, імпульсний прилад відрізняється від безперервно-хвильового наявністю формувача імпульсів дозволу передачі і прийому, а також селекторів передачі і прийому, керованих цими імпульсами. Що виробляється опорним генератором 8 сигнал детектується селектором передачі 5 в строго певні проміжки часу, що задаються формувачем імпульсів дозволу передачі 4. Прийнятий сигнал також детектується за часом селектором прийому 6, а продетектований синхронним детектором 9 сигнал запам'ятовується в пристрої вибірки і зберігання (УВХ) 10 до приходу наступного імпульсу. Положення "об'єму вибірки" на осі УЗ датчика або глибина розташування досліджуваної посудини визначається часовою затримкою між імпульсом випромінювання і стробом прийому, що відкриває селектор прийому 6. Ця затримка задається формувачем імпульсів дозволу прийому 7.

Оскільки амплітуда прийнятого продетектованого сигналу визначається потужністю ультразвуку, що випромінює, а із-за імпульсного характеру випромінювання при однаковій амплітуді випромінюваних сигналів безперервно-хвильового і імпульсного приладів середня випромінювана потужність останнього буде менше, то на УМ імпульсного тракту подається більша напруга живлення, в порівнянні з безперервно-хвильовим режимом для забезпечення підтримки рівня середньої



інтенсивності випромінюваного сигналу в імпульсному режимі. УЗ датчик імпульсного приладу є одним п'єзоелектричним елементом, що поєднує функції прийому і передачі, рознесені в часі. Приймальний тракт повинен забезпечувати захист вхідного каскаду від перевантажень під час випромінювання.

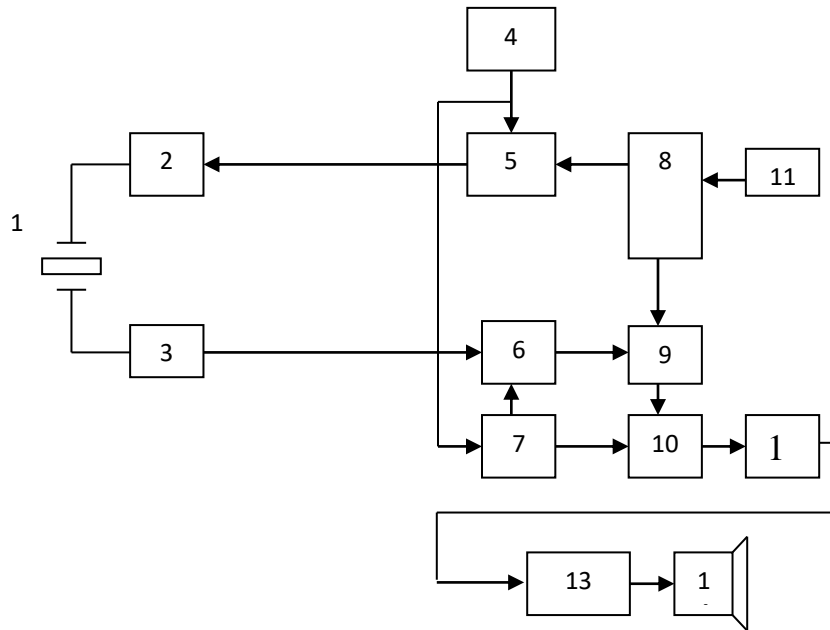


Рис. 3.7. Блок-схема імпульсного УЗ витратоміру з індикацією без виділення інформації про напрям потоку

1 – УЗ датчик, 2 – УМ, 3 – попередній підсилювач, 4 - формувач імпульсів дозволу передачі, 5 - селектор передачі, 6 - селектор прийому, 7 - формувач імпульсів дозволу прийому (лінія затримки), 8 - задаючий генератор, 9 - синхронний детектор, 10 - УВХ, 11 - кварцовий резонатор, 12 - смуговий фільтр, 13 - УНЧ, 14 – індикатор.

### 3.4 Синхронний квадратурний детектор і блок виділення інформації про напрям потоку

Описані вище прилади не зберігають інформацію про напрям потоку, а дає лише величину зрушення частоти. Інформація про напрям потрібна, щоб стежити за зміною

швидкості потоку в течії, де виникає зворотний потік, або якщо напрям потоку несе інформацію, наприклад, при дослідженні складу палива.

Для того, щоб розділити сигнали, що несуть інформацію про прямий і зворотний потік, найширше в сучасних приладах застосовується квадратурна демодуляція (рис. 3.8).

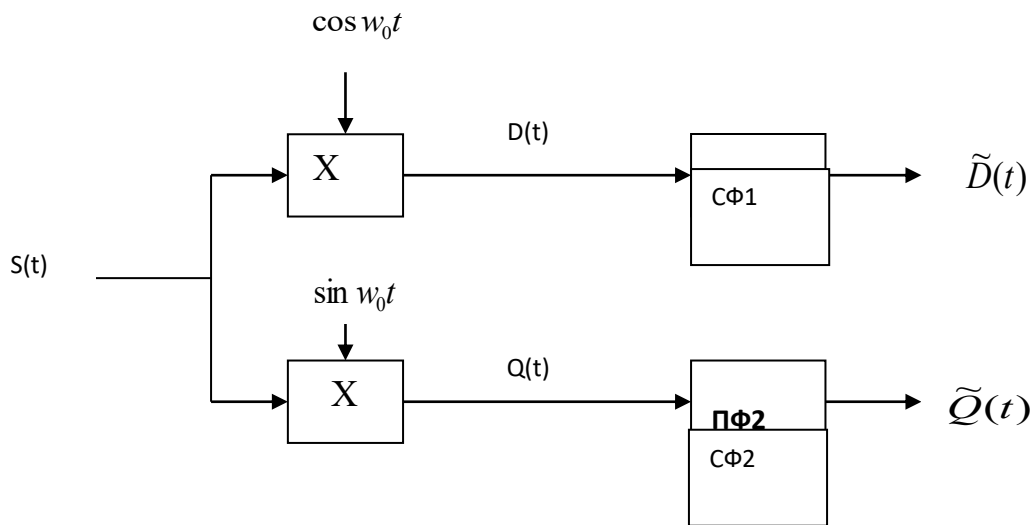


Рис. 3.8. Блок схема квадратурного демодулятора  
 X - перемножувач, СФ - смугові фільтри

Посилений сигнал з виходу попереднього підсилювача 3 (рис 3.5, 3.7) подається на два перемножувача X, детекторів, що виконують роль, на вхід одного з яких, що управляє, подається сигнал з виходу опорного генератора  $\cos w_0 t$ , на вхід, що управляє, іншого - сигнал, зрушений відносно першого на  $\frac{\pi}{2}$ , тобто  $\sin w_0 t$ . Таким чином, на виході одного з каналів є присутнім синфазний сигнал  $\tilde{D}(t)$ , описуваний (3.5), на виході другого - квадратурний сигнал  $\tilde{Q}(t)$ , вид, що має :

$$\tilde{Q}(t) = \frac{1}{2} A_f \sin(w_f t + \phi_f) + \frac{1}{2} A_r \sin(w_r t - \phi_r)$$

або 
$$\tilde{Q}(t) = \frac{1}{2} A_f \cos(w_f t + \phi_f + \pi/2) + \frac{1}{2} A_r \cos(w_r t - \phi_r - \pi/2) \quad (3.6)$$

Знак доплерівського зрушення, а значить, і напрям потоку визначається по співвідношенню фаз прямого (синфазного) і квадратурного каналів. Якщо це зрушення позитивне, то квадратурний сигнал відстає на  $\pi/2$  від синфазного, і випереджає інакше.

Для розподілу сигналів необхідно "зрушити" один з каналів відносно іншого на  $\pi/2$ , а потім зробити сумарно-ріницеву операцію над отриманими сигналами.

Із запропонованих досі методів розподілу сигналів прямого і зворотного потоку найбільший розвиток отримали 2 методи:

- обробка прямого і квадратурного каналу у фазовій області;
- застосування цифрової обробки сигналів і, зокрема, фільтру Гілберта.

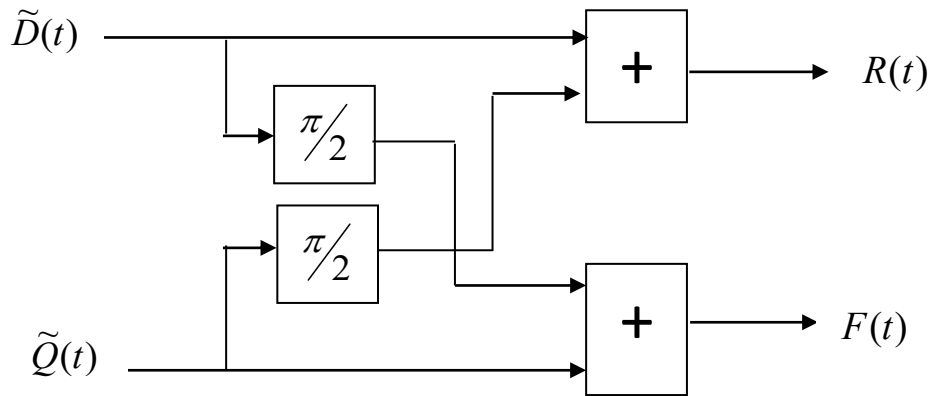


Рис. 3.9. Виділення сигналів прямого і зворотного потоку у фазовій області

Обидва сигнали, прямий і квадратурний, зрушуються на  $\pi/2$  і підсумовуються з іншим, незрушеним, сигналом. В результаті виходять два повністю розділених каналу.

Так, зрушуючи прямий сигнал  $\tilde{D}(t)$ , описуваний (3.5), отримуємо:

$$\tilde{D}^+(t) = \frac{1}{2} A_f \cos(w_f t + \phi_f + \pi/2) + \frac{1}{2} A_r \cos(w_r t - \phi_r + \pi/2)$$

Підсумовування з квадратурним сигналом  $\tilde{Q}(t)$  призводить до видалення компонента, що відноситься до зворотного потоку :

$$F(t) = A_f \cos(w_f t + \phi_f + \pi/2)$$

Точно також, зрушуючи квадратурний канал  $\tilde{Q}(t)$  і підсумовуючи з прямим каналом  $\tilde{D}(t)$ , отримаємо компоненту зворотного потоку :

$$R(t) = A_r \cos(w_r t + \phi_r)$$

Другий підхід ґрунтується на застосуванні фільтру Гілберта. ФГ є звичайним, не рекурсивним фільтром. Саме із-за своєї властивості зрушувати фазу  $90^\circ$ , він застосовується в модемах як детектор тієї, що огинає. Коефіцієнти ФГ розраховуються по формулі:

$$h(n) = \frac{2}{n \times \pi} \times \sin^2\left(\frac{n \times \pi}{2}\right)$$

для  $n = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{N}{2}$ , де  $\frac{N}{2}$  - порядок ФГ, та  $h(n) = 0$  для  $n = 0$ .

Оскільки ФГ реалізується в цифровому виді, оброблюваний сигнал має бути цифрований за допомогою АЦП. В цьому випадку тракт обробки прямого і квадратурного каналу має вигляд, показаний на рис. 3.10:

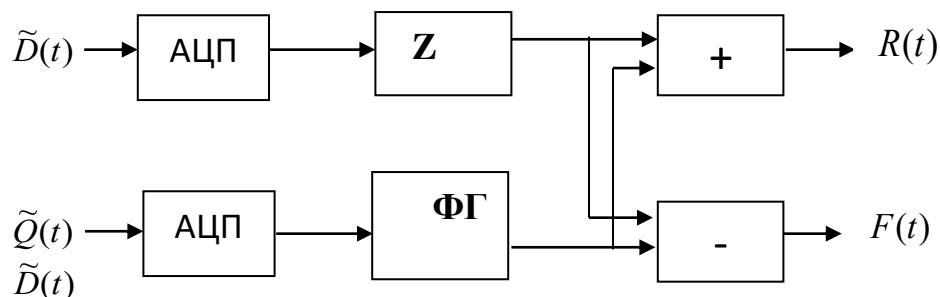


Рис. 3.10. Виділення сигналів прямого і зворотного потоку в частотній області

Тут  $Z$  – лінія затримки на половину довжини ФГ. Таким чином, структурна схема безперервно-хвильового УЗ доплерівського приладу із звуковою індикацією і виділенням інформації про напрям потоку виглядає як показано на рис. 3.11.

Відмінність від раніше розглянутої схеми - у блоках 5 і 7. Блок синхронного детектора 5 включає схему формування квадратурного сигналу, яка буде розглянута пізніше і розглянута раніше схему квадратурного демодулятора рис. 3.6. Блок 7 містить два смугові фільтри і схему виділення інформації про напрям потоку - сигнали з виходів яких посилюються за допомогою УНЧ і подаються на індикатори 9.

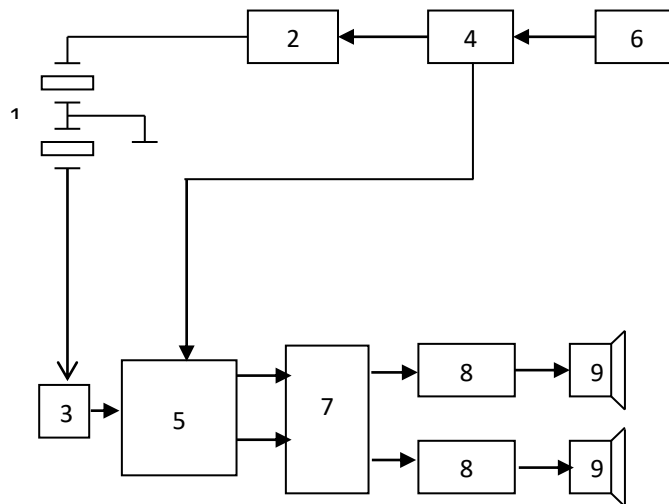


Рис. 3.11. Блок схема безперервно-хвильового доплерівського приладу з виділенням інформації про напрям швидкості потоку

1 – УЗ датчик, 2 – УМ, 3 – попередній підсилювач, 4 - задаючий генератор, 5 - синхронний детектор і схема формування квадратурних сигналів, 6 - кварцовий резонатор, 7 - смуговий фільтр і схема виділення сигналів прямого і зворотного потоку, 8 - УНЧ, 9 - індикатори

### 3.5 Формувач квадратурного сигналу

Як було вказано вище для розподілу каналів прямого і зворотного потоків, необхідно сформувати два сигнали, зрушені один відносно іншого на  $\frac{\pi}{2}$ . На практиці замість того, щоб множити сигнал  $x(t)$  на  $\cos(\omega_0 t)$  і  $\sin(\omega_0 t)$ , цей сигнал множать на сигнал прямокутної форми (меандр) з частотою, кратною  $\omega_0$ . Аналітичне представлення такого сигналу [10]:

$$Z(\omega_0 t) = \frac{4}{\pi} \left( \cos \omega_0 t + \frac{(-1)}{3} \cos 3\omega_0 t + \dots + \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos(1n+1)\omega_0 t + \dots \right), \quad (3.7)$$

Як видно з приведенного вираження, синхронна демодуляція в цьому випадку зводиться до синхронного детектування за допомогою набору синхронних демодуляторів з коефіцієнтами посилення  $\frac{4}{\pi} \frac{(-1)^n}{(2n+1)}$  і частотами, що несуть  $(2n+1)\omega_0$ . Вхідним виборчим підсилювачем, що нівелює пролізання в низькочастотну область спектру вихідного сигналу компонент з частотами  $(2n+1)\omega_0$  являється сам ультразвуковий датчик, працюючий в області свого резонансу.

Таким чином, завдання демодуляції вхідного сигналу зводиться до завдання детектування цього сигналу за допомогою простого аналогового ключа, керованого сигналами, що мають форму меандру, і описуваного (7).

Це завдання найпростіше вирішується в цифровому виді за допомогою трьох D тригерів (рис. 3.12).

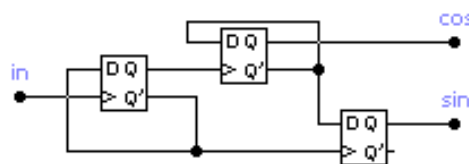


Рис. 3.12. Блок схема формувача квадратурного сигналу

Перевагою цієї схеми в порівнянні з аналоговою є відсутність дискретних компонентів і, як наслідок, набагато менші частотні, часові і температурні погрішності зрушення фаз.

Часова діаграма для цієї схеми приведена на рис. 3.13.

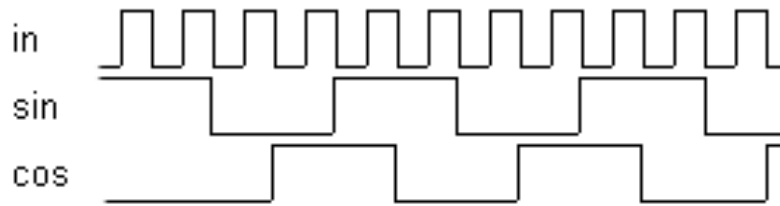


Рис. 3.13. Часова діаграма роботи формувача квадратурного сигналу

Як видно з цієї діаграми, частота опорного сигналу має бути вище за частоту результуючих сигналів в чотири рази. Таким чином, для роботи доплерівського приладу в діапазоні 2 МГц частота на виході опорного генератора повинна складати 8 МГц, для 4 МГц – 16 МГц, і для 8 МГц – 32 МГц.

При побудові приладів, працюючих на частотах зверху 20 МГц, частота опорного генератора стає вище 80 МГц. При проектуванні блоків генератора, формувача квадратурного сигналу і змішувача, працюючих на таких частотах, пред'являються підвищені вимоги до розводки друкованої плати, її екранування, які важко забезпечити. Тому виникає відхилення різниці фаз сигналів, що подаються на квадратурний детектор від  $\frac{\pi}{2}$ , що призводить до проникнення цього відхилення у вихідний сигнал, і, як наслідок, до спотворень результатів обробки доплерівського сигналу.

Так, якщо сигнал, що подається на детектор прямого каналу, має вигляд  $\cos w_0 t$ , а сигнал, що подається на детектор квадратурного -  $\sin(w_0 t + \varphi_{err})$ , тобто є помилка

зрушення опорного сигналу від величини  $\frac{\pi}{2}$ , тобто в цьому випадку вираження для відфільтрованого квадратурного сигналу придбаває вид:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(t) = & \frac{1}{2} A_f \cos \varphi_{err} \sin(w_f t + \phi_f) + \frac{1}{2} A_f \sin \varphi_{err} \cos(w_f t + \phi_f) + \\ & + \frac{1}{2} A_r \cos \varphi_{err} \sin(w_r t - \phi_r) + \frac{1}{2} A_r \sin \varphi_{err} \cos(w_r t - \phi_r) \end{aligned}$$

Як неважко помітити, отримане вираження легко перетвориться в наступне:

$$\tilde{Q}(t) = \cos \varphi_{err} \tilde{Q}(t) + \sin \varphi_{err} \tilde{D}(t)$$

Тобто квадратурний сигнал в цьому випадку містить частину прямого сигналу. Це - випадок так званого "пролізання" або відсутності розподілу каналів. Зрушення цього сигналу на  $\frac{\pi}{2}$  аналоговим або цифровим способом і проведення над отриманим результатом сумарно-різницевої операції вже не приведе до повного розподілу сигналів прямого і зворотного потоку, і результати розрахунків спектрограми і індексів будуть спотворені.

### 3.6 Обґрунтування вибору ультразвукового витратоміру палива

Ультразвукові витратоміри при їх використанні на трубопроводах середніх і великих діаметрів виявляються значно дешевше за механічних, електромагнітних, коріолісових і інших витратомірів. Крім того, ультразвукові витратоміри можуть використовуватися для виміру витрати рідин-діелектриків, наприклад нафтопродуктів.

Особливістю ультразвукових витратомірів, являється те, що за замовленням вони можуть бути укомплектовані або врізаними датчиками, що контактують безпосередньо з рідиною в трубопроводі, або накладними (безконтактними), що монтуються на зовнішній поверхні трубопроводу.



До недавнього часу на трубах середнього і великого діаметру найбільш широке поширення мали вузли обліку на звужуючих пристроях. Проте через різні недоліки: засмічення імпульсних трубок, необхідності регулярного технічного обслуговування, незручності проведення періодичної перевірки, сточування кромки, вузького динамічного діапазону і, нарешті, втрат тиску, виникає бажання перейти на застосування сучасніших витратомірів. Прямолінійні ділянки трубопроводу, необхідні для правильної експлуатації ультразвукових витратомірів, як правило менше, ніж для звужуючих пристроїв, тому найчастіше монтаж датчиків може бути здійснений в наявній камері для звужуючого пристрою.

Ультразвукові прилади використовують сучасну мікропроцесорну техніку для обробки сигналів та є конкурентно спроможними в області ультразвукової витратометрії. У їх алгоритмах роботи передбачені автоматична корекція швидкості ультразвуку і гідродинамічного коефіцієнта, залежно від середньої швидкості потоку. Похибка виміру безконтактними датчиками із заломленням променя не перевищує похибки для врізаних датчиків прямого випромінювання. У широкому діапазоні швидкостей потоку і температур відносна похибка виміру витрати не перевищує  $\pm 1,5\%$  і лише при швидкостях менш  $0,3\text{ м/с}$  не перевищує  $\pm 4\%$ . У разі використання спеціально виготовленої вимірювальної ділянки, у вказаному діапазоні швидкостей потоку, відносна похибка виміру не перевищує  $1\%$  та  $2\%$  відповідно. В процесі експлуатації, в результаті корозії і утворення на стінках трубопроводу відкладень, можливе збільшення похибки виміру витрати, пов'язане зі зміною внутрішнього діаметру і шорсткості. Щоб цього уникнути, для установки як накладних, так і врізаних датчиків необхідно використовувати труби або ділянки труб, що спеціально виготовляються, з нержавіючого металу, з полімерних матеріалів або металеві труби з полімерним покриттям.

Найважливішою умовою, що найбільш сильно впливає на точність виміру усіх типів витратомірів, працюючих за принципом швидкість-площа, у тому числі для ультразвукових витратомірів являється симетричність епюри швидкостей

поток, що забезпечується дотриманням довжин прямолінійних ділянок. Скорочення необхідних довжин прямолінійних ділянок для таких витратомірів без збитку для точності вимірів, тобто проведення вимірів при викривленій епюрі швидкостей, - завдання, що вирішується виключно за допомогою багатоканальних вимірників, незалежно від методу виміру.

Для виміру об'ємної витрати і об'єму різних рідин в широкому діапазоні температур, в напірних металевих і пластмасових трубопроводах в різних умовах експлуатації, у тому числі у вибухонебезпечних зонах, – витратомір виконує виміру при постійному і змінному (реверсивному) напрямі потоку рідини в трубопроводі для кожного напрямку окремо, з індикацією знаку напрямку потоку, архівація вимірних значень, а також забезпечує можливість виведення вимірних значень на зовнішні пристрої [8].

УЗ витратомір забезпечує можливість виміру в одному трубопроводі однією парою перетворювачів електроакустичних (ПЕА). ПЕА, що входять до складу витратоміру, виготовляються врізані (встановлюються в монтажні патрубки, наварені на отвори, що протилежать, в стінках трубопроводу) герметичні.

УЗ витратоміри застосовують для установки на трубопроводі діаметром  $DУ$  від 10 до 4200 мм.

Витратомір дозволяє виміряти значення середнього об'єму витрат рідини, об'єму рідини наростаючим підсумком, як суми результатів виміру в обох напрямках, упізнати швидкості потоку рідини. Витратомір робить індикацію поточної дати і часу, часу роботи в штатних/нештатних режимах.

За допомогою пристрою індикації витратомір забезпечує виведення значень вимірних об'ємів. Архівація робиться в незалежній пам'яті витратоміру за останні 728 годин, 64 доби, 64 місяці.

Витратомір виконує виведення вимірних значень середньої об'ємної витрати рідини у вигляді струмового вихідного сигналу і об'єму рідини у вигляді імпульсів з нормованою вагою.

Витратомір виконує:

- автоматичний контроль аварійних і нештатних ситуацій і архівацію виду аварії або нештатної ситуації, із занесенням в журнал аварійних (нештатних) ситуацій;
- виведення вимірювальної, діагностичної, довідкової і архівної інформації за допомогою комунікаційного зв'язку через послідовний інтерфейс RS 232 або RS 485.

Інтерфейс RS 232 забезпечує безпосередній зв'язок витратоміру тільки з одним персональним комп'ютером (ПК) при довжині лінії зв'язку не більше 15 м. Інтерфейс RS 485 дозволяє забезпечувати безпосередній зв'язок в мережі з 32 абонентів (одним з яких являється ПК) на відстань до 1200 м.

Комунікаційний зв'язок через інтерфейс RS 232 (RS 485) дозволяє за допомогою ПК отримати і задокументувати інформацію поточним значенні вимірюваних параметрів і результатів автодіагностики витратоміру з прив'язкою до дати і часу знімання параметрів, а також архівні значення вимірюваних параметрів і результатів автодіагностики, що зберігаються у вартовому, добовому або місячному архіві (по вибору) і журналі аварій за увесь період накопичення або за необхідний період по вибору споживача. При переході в аварійний режим або при виникненні нештатної ситуації витратомір забезпечує комутацію ланцюга сигналізації постійного струму.

### 3.6.1 Технічні характеристики витратоміру

Таблиця 3.1

Технічні характеристики витратоміру

Найменування параметра	Значення параметра
1	2

Діаметр умовного проходу, $D_u$ , мм: - накладні ПЕА - врізані ПЕА	будь-який з діапазону 50-4200 будь-який з діапазону 10-4200
Вимірювана середня об'ємна витрата рідини, $m^3/ч$ - найменший, $Q_{V MAX}$ - перехідний $Q_{V П}$ - найбільший $Q_{V MIN}$	Визначається залежно від $D_u$ (мм) $0,0002 D_u^2$ $0,001 D_u^2$ $0,028 D_u^2$
Температура вимірюваної рідини, $^{\circ}C$	мінус 70-плюс 220
Найбільший тиск в трубопроводі, МПа	2,5
Найбільша довжина сигнального кабелю між ВП и ПЕА, м	100
Швидкість передачі інформації по RS зв'язку, кБіт	1.2; 2,4; 4,8; 9,6; 19,2
Середній термін служби, років	12

Витратомір забезпечує видачу вимірних значень об'єму у вигляді імпульсів з нормованою вагою.

У витратомірі реалізована можливість підключення до двох імпульсних виходів. У одного з них вихідний каскад виконаний на фототранзисторі з відкритими колектором (виведення РК2) і емітером (виведення РЕ2) транзисторної оптопари, що забезпечує гальванічну розв'язку виходу від основної схеми. При цьому, найбільші допустимі значення напруги 15 В, а навантаження струму - 10 мА. Цей вихід використовується для підключення до теплообчислювача СПТ 960 фірм "Логіка". Інший імпульсний вихід (маркіровка виводів POOUT, POGND) реалізований на гальванічному розв'язаному емітерному повторювачі. При цьому амплітуда вихідного імпульсу складає не менше 4 В на навантаженні не менше 1 кОм. Працюють обидва виходи одночасно.

Передбачена можливість установки з клавіатури витратоміру двох режимів роботи:

- з періодом дотримання імпульсів 10 мс (при шпаруватості 2);
- з періодом дотримання імпульсів 200 мс (при шпаруватості 2).

Період дотримання імпульсів 200 мс встановлюється при роботі витратоміру з теплообчислювача СПТ960.

Номінальна статична характеристика витратоміру по імпульсному виходу:

$$V = N \cdot K, \quad (3.8)$$

де  $V$  - об'єм води, виміряний за інтервал часу  $T$ , м<sup>3</sup>;

$N$  - кількість імпульсів, що пройшли за інтервал часу  $T$ ;

$K$  - вага імпульсу, м<sup>3</sup>/имп.

Вага імпульсу  $K$  розраховується у витратомірі автоматично після визначення  $D_u$  трубопроводу по формулі:

$$K = Q_{MAX} T_i / 3600, \quad (3.9)$$

де  $T_i$  - встановлений період дотримання імпульсів, с.

Розраховане значення округляється у витратомірі і виводиться на дисплей. Це значення використовується в якості ваги імпульсу  $K$ . При роботі по імпульсному виходу обов'язково переконатися у відповідності ваги імпульсу, встановленого на пристрої реєстрації і підключеного до імпульсного виходу витратоміру, вазі імпульсу на імпульсному виході витратоміру, ліченому з індикатора.

Вихід активний в діапазоні витрат:

$$Q_{VMIN} < QV < QV_{MAX}, \quad (3.10)$$

де  $QV$  - значення середньої об'ємної витрати рідини, м<sup>3</sup>/ч;

$QVMAX$  - найбільша вимірювана середня об'ємна витрата рідини для цього типорозміру витратоміру, м<sup>3</sup>/ч;

$QVMIN$  - мінімальне значення вимірюваної витрати, що встановлюється користувачем, м<sup>3</sup>/ч.

Витратомір забезпечує видачу вимірних значень витрати у вигляді сигналу постійного струму з межами:

- від 0 до 5 мА при навантаженні не більше 1,5 кОм;
- від 0 до 20 мА при навантаженні не більше 250 Ом;
- від 4 до 20 мА при навантаженні не більше 250 Ом.

Витратомір забезпечує комутацію зовнішнього ланцюга (релейний ланцюг, виводи якого позначені на схемі підключення і кросс-платі РК1 і РЕ1) фототранзистором n -р-п типу з відкритим колектором (виведення РК1) і емітером (виведення РЕ1) транзисторної оптопари, що забезпечує гальванічну розв'язку приладу. Комутована напруга і струм при цьому не повинні перевищувати 15 В і 10 мА відповідно.

Витратомір забезпечує можливість перегляду даних при контролі їх значень, введенні або зміні (при введенні витратоміру в експлуатацію, експлуатації, перевірці і так далі) за допомогою системи функціональних меню, доступ до яких забезпечується клавіатурою витратоміру.

Відносні погрішності при виведенні вимірних значень на індикатор, при реєстрації в архіві, при видачі даних по RS зв'язку, імпульсному і струмовому виходам не перевищують значень, вказаних в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Відносні погрішності при виведенні вимірних значень

Вимірюваний параметр	Відносна погрішність виміру, %
Середня об'ємна витрата, об'єм, рідини в	

діапазоні витрат: $Q_{V \text{ MIN}} - Q_{V \text{ П}}$	$\pm 4,0$
$Q_{V \text{ П}} - Q_{V \text{ MAX}}$	$\pm 1,5$

### 3.6.2 Принцип роботи вибраного витратоміру

За принципом роботи витратомір відноситься до час-імпульсним ультразвукових витратомірів, робота яких заснована на вимірі різниці часів проходження коротких імпульсів (що зондують) ультразвукових коливань (УЗК) по напрямку швидкості потоку рідини в трубопроводі і проти нього. Збудження зондуючих імпульсів робиться первинними електроакустичними перетворювачами, що встановлюються на трубопровід з вимірюваною витратою.

За способом організації зондування потоку рідини ультразвуковими імпульсами витратомір відноситься до автоциркуляційних витратомірів з попереминою комутацією.

Особливістю ультразвукового витратоміра (УЗВ) являється поперемине функціонування двох синхрокільць. Синхрокільця утворені приймально-підсилювальним трактом, охопленим зворотним зв'язком, що запізнюється, через електроакустичний тракт ПЕА1 - стінка трубопроводу - рідина - стінка трубопроводу - ПЕА2.

Первинний перетворювач витрати включає відрізок труби і закріплені на ньому два електроакустичні перетворювачі - ПЕА1 та ПЕА2, що забезпечують випромінювання ультразвукових сигналів (УЗС) в рідину під кутом до осі трубопроводу. При русі рідини спостерігається знос ультразвукової хвилі, який призводить до зміни повного часу поширення УЗС між ПЕА : по потоку рідини (від ПЕА1 до ПЕА2) час поширення зменшується, а проти потоку (від ПЕА2 до ПЕА1) - зростає.

Вторинний вимірювальний перетворювач за допомогою попереминого випромінювання в рідину УЗС і їх прийому, що рухається, здійснює вимір різниці часів

поширення УЗС по потоку і проти потоку рідини  $dT$ . Ця величина  $dT$ , пропорційна швидкості, а отже, і витраті рідини, визначається вираженням(3.11):

$$dT = T1 - T2 = 2 \cdot n \cdot v \cdot D \cdot \operatorname{tg} \theta / c^2 + t_3, \quad (3.11)$$

де

$$T_{1,2} = \frac{D}{c \cos \theta} \left( 1 \pm \frac{v \sin \theta}{c} \right) + t_{CT1,2} + t_{ЗВ1,2},$$

$T_1$  - повний час поширення УЗС по потоку рідини;

$T_2$  - повний час поширення УЗС проти потоку рідини;

$n$  - коефіцієнт установки ПЕА : для установки ПЕА з віддзеркаленням УЗС від стінки трубопроводу  $n=2$ ; для установки без віддзеркалення  $n=1$ ;

$D$  - внутрішній діаметр трубопроводу;

$\theta, c$  - кут і швидкість поширення УЗС в нерухомій рідині;

$v$  - швидкість рідини, усереднена уздовж ультразвукового променя;

$t_{CT}, t_{ЗВ}$  - додаткова затримка УЗС в стінках трубопроводу, звукопроводах ПЕА і електронному тракті при поширенні УЗС по потоку і проти потоку рідини.

### 3.6.3 Опис функціональної схеми витратоміру

Функціональна схема витратоміру приведена на рис.3.14.

На схемі показані наступні функціональні вузли витратоміру :

- первинний перетворювач витрати (ПП);
- вторинний вимірювальний перетворювач (ВП) зі вбудованим стабілізованим вторинним джерелом живлення (ВДЖ), що виконує функції контролера витратоміру за допомогою схеми мікропроцесорного управління (СМУ), функції вимірювального проміжного перетворювача за допомогою блоку



прийому і генерації сигналу (БПГС), функції формувача електричних вихідних сигналів для інформаційного зв'язку з вторинними реєструючими приладами, засобами вимірів і автоматизації, і функції пристрою обробки, зберігання і відображення даних;

- індикатор рідкокристалічний;
- плівкова клавіатура.

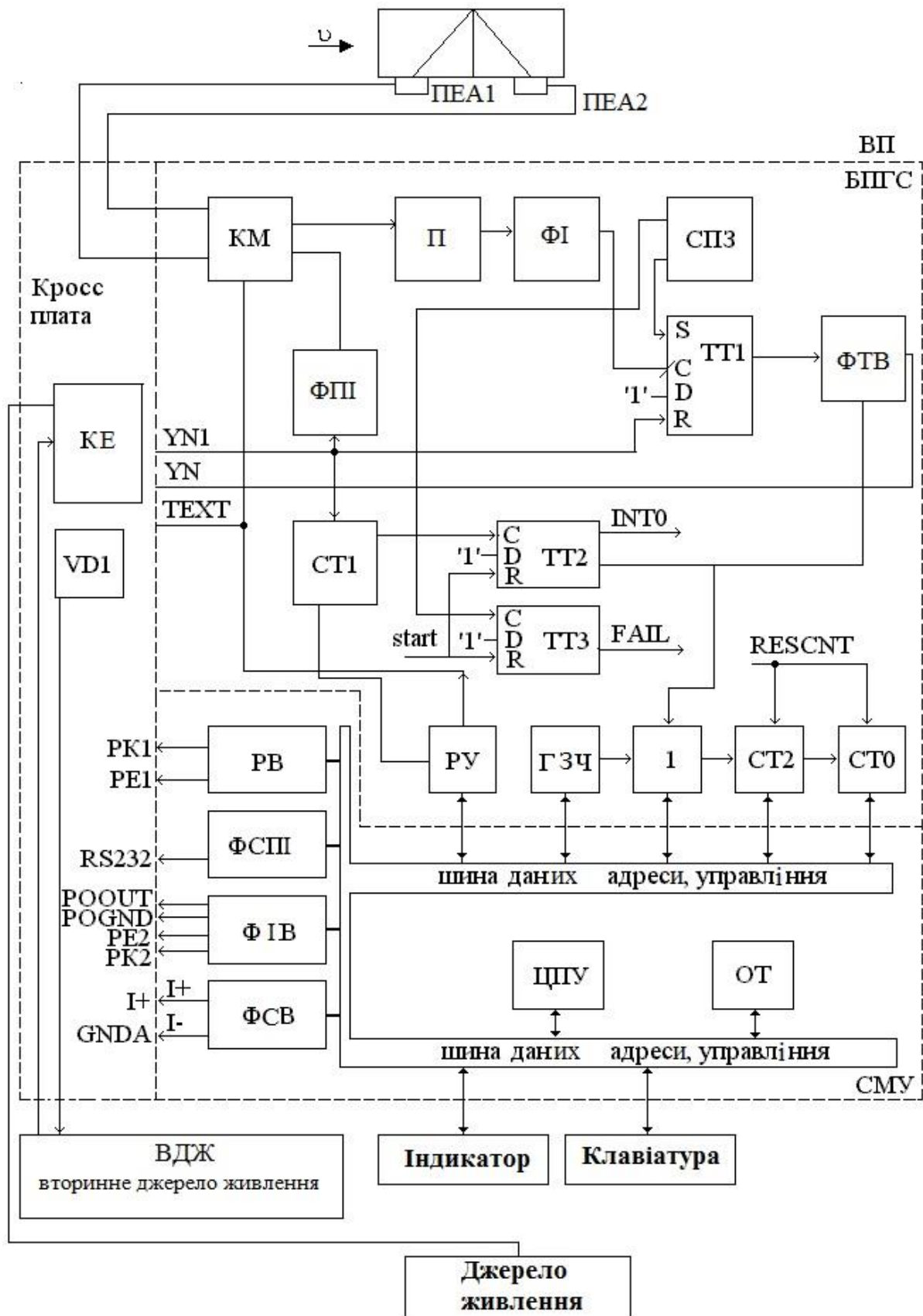


Рис.3.14. Функціональна схема витратоміру

БПГС працює таким чином. Після подачі пускового імпульсу START від СМУ робиться скидання тригерів ТТ2 (формувача періоду наповнення) і ТТ3 (тригера помилки), а також відбувається примусовий запуск формувача часового вікна (ФЧВ), чим забезпечується формування першого зондуючого імпульсу за допомогою формувача потужних імпульсів (ФП). При тривалій відсутності імпульсів на виході тригера ТТ1 схема примусового запуску (СПЗ) виробляє пусковий імпульс, який встановлює тригер ТТ1 в "1" стан. Одночасно з цим відбувається установка тригера ТТ3 в "1" стан, що свідчить про несправність акустичного тракту (сигнал FAIL). При справності акустичного тракту запускається ФТВ, який через 10...12 мкс вихідним сигналом  $Y_N$  утримує тригер ТТ1 в "0" стані. При цьому забороняється установка тригера ТТ1 в "1" стан від формувача імпульсів (ФІ), що потрібне для захисту від перешкод. Одночасно сигнал  $Y_N$  з виходу ФТВ поступає на ФП. ФП формує зондуючий імпульс, який через комутатор напряму випромінювання (КМ) подається на один з ПЕА. Номер що підключається до виходу КМ ПЕА (ПЕА1 або ПЕА2) залежить від значення потенціалу управління ТЕХТ, що подається на КМ з регістра управління РУ (припустимо, що потенціал управління комутатором  $T=0$ , тоді зондуючий імпульс поступить на ПЕА1 і УЗС випромінюватиме по потоку рідини).

Після проходження через електроакустичний тракт на виході ПЕА2 (або ПЕА1 - при випромінюванні проти потоку рідини) сигнал має форму радіоімпульсу. Після посилення підсилювачем (П), ФІ перетворить його в пачку імпульсів, першим з яких тригер ТТ1 встановлюється в "1" стан. Таким чином відбувається регенерація імпульсу  $Y_N$  у кожному такті випромінювання сигналу по або проти потоку рідини.

Під дією імпульсів  $Y_N$  відбувається заповнення лічильника СТ1 і у момент його переповнювання тригер ТТ2 встановлюється в "1" стан і закінчується цикл виміру по цьому напряму тривалістю, наприклад,  $T_{n1}$  - по напряму потоку (тоді  $T_{n2}$  - проти напряму потоку). При цьому формується сигнал переривання INTO.

Значення  $T_{n1}$  ( $T_{n2}$ ) пропорційні; часу поширення сигналу в електроакустичному тракті  $T_1$  ( $T_2$ ):

$$T_{n1} = N \cdot T_1, \quad (3.12)$$

де  $N$  - коефіцієнт накопичення (визначуваний лічильником СТ1).

Тривалість інтервалів  $T_{n1}$  та  $T_{n2}$  вимірюються шляхом заповнення їх імпульсами з генератора зразкової частоти (ГЗЧ). Код, пропорційний тривалості  $T_{n1}$  ( $T_{n2}$ ), формується в лічильниках СТ0 та СТ2. Отримані коди прочитуються СМУ по сигналу переривання INTO, після чого СМУ формується сигнал початкової установки RESCNT для установки СТ0 та СТ2 у початковий стан.

Для автоматичного перезапуску СМУ (після збоїв, зависань, пропажі живлячої напруги і так далі) передбачена схема охоронного таймера (ОТ).

СМУ здійснює обробку результатів виміру, і обчислення (по значеннях інтервалів часу по обох напрямках  $T_{n1}$  та  $T_{n2}$ ) вимірюваної витрати рідини  $Q$ :

$$Q = S_{пп} \cdot (T_{n1} - T_{n2}), \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3.13)$$

де  $S_{пп}$  - коефіцієнт перетворення витратоміру,  $\text{м}^3/(\text{мкс} \cdot \text{год})$ .

При градуюванні витратоміру на перевірочній установці методом пропуску рідини через ПП цей коефіцієнт визначається за методикою перевірки порівнянням результатів виміру витрати зразковим пристроєм і градуйованим витратоміром.

При непрямому градуюванні методом виміру параметрів ПП і потоку рідини в трубопроводі, залежно від типу ПЕА (накладний або врізаний), цей коефіцієнт обчислюється програмою витратоміру.

Параметри первинного перетворювача витрати і інші градуювальні коефіцієнти вводяться у витратомір з клавіатури і запам'ятовуються в незалежному пристрої, що запам'ятовує. Введення вказаних коефіцієнтів здійснюється оператором у відповідних режимах (меню) в процесі градуювання витратоміру.

Об'єм рідини  $V$  за інтервал часу  $T$  розраховується по формулі 3.14:

$$V = \int_0^T Q(t) dt, \quad (3.14)$$

Формувач імпульсних виходів (ФІВ) служить для перетворення результату виміру в імпульсні сигнали.

Формувач струмового виходу (ФСВ) призначений для перетворення результатів виміру в уніфікований струмовий сигнал (I+, I-).

Формувач сигналів послідовного інтерфейсу (ФСП) призначений для перетворення сигналів в рівні інтерфейсів RS232 та RS485.

Релейний вихід призначений для комутації зовнішнього ланцюга сигналізації постійного струму.

### 3.6.4 Конструкція витратоміру

Накладні ПЕА, зовнішній вигляд яких показаний на рис. 3.15, виконані в суцільному корпусі з нижньою гранню 2, випромінюючою поверхнею, що являється. На бічній поверхні корпусу нанесена риска 3 акустичні центри ПЕА. Корпус повністю герметизований заливкою термостійкого електроізоляційного компаунда. На кінці коаксіального радіочастотного кабелю ПЕА 1, жорстко закріпленого в корпусі і виконаного завдовжки не менше 1,5 м, встановлений роз'єм для його підключення до лінії зв'язку з вторинним перетворювачем.

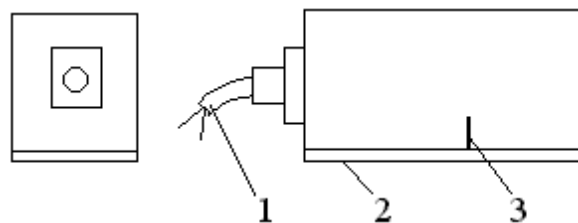


рис. 3.15. Зовнішній вигляд накладного ПЕА

Вибухозахищене виконання ПЕА передбачає виконання з'єднання ПЕА без роз'єму в сполучній коробці вибухозахищеного виконання або іншим способом, задовольняючим відповідним вимогам правил ПУЕ.

### **Висновки:**

Вибраний мною ультразвуковий витратомір УРСВ-010М має дуже широкий діапазон застосування. Цей витратомір забезпечений високоточною електронікою і інноваційними технологіями цифрової обробки сигналу, що забезпечує надійні і стабільне виміри витрати палива навіть в складних умовах польоту. Прилад не вимагає спеціального налаштування, оскільки перехідні процеси не впливають на його свідчення.

Витратомір УРСВ-010М є компактним приладом, який легко монтується і простий в експлуатації. Його можна встановлювати у важкодоступних місцях, оскільки немає необхідності у використанні фільтрів, випрямлячів потоку, опор, ізоляції від вібрацій.

Як і будь-який представник ультразвукових витратомірів, цей прилад не має рухливих і виступаючих частин, на нім немає додаткових втрат тиску, зносу і завихрень.

Витратомір УРСВ-010М не відноситься до класу дешевих приладів, але серед сучасних ультразвукових витратомірів його вартість порівняно невисока. При цьому слід враховувати те, що загальні витрати, пов'язані з монтажем, значно нижче в порівнянні з аналогічними витратами на монтаж масових або вихрових витратомірів.

Враховуючи все вище сказане, можна стверджувати, що ультразвуковий витратомір УРСВ-010М має відмінні технічні і метрологічні показники, високу міру надійності, і чудове поєднання ціна-якість, тобто він добре підходить для використання в якості витратоміру палива в паливовимірвальній системі літака.

## РОЗДІЛ 4

# АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРУ

### 4.1 Аналіз джерел похибок вимірювання

Є низка причин, які можуть викликати появу похибок свідчень у ультразвукових витратомірах. Основними серед яких є:

- залежність показів від профілю швидкостей або числа Рейнольдса ( $Re$ );
- зміна швидкості поширення ультразвуку в середовищі внаслідок зміни її параметрів;
- тиску і температури, а також і її концентрації;
- вплив реверберації;
- багаторазового відображення ультразвукового променя;
- похибки, що вносяться електронної вимірювально-перетворювальної схемою.

У двопроменевих приладах, крім того, можуть виникати похибки через неоднаковості обох електронно-акустичних каналів витратоміра. З іншого боку, і в однопроменевих приладах, що працюють з почерговим випромінюванням, можливі похибки через акустичної не симетрії умов проходження ультразвуку по потоку і проти нього.

Залежність показів ультразвукових витратомірів від числа  $Re$  є наслідком того, що ці прилади вимірюють не середню швидкість потоку по перетину труби, а середню швидкість по лінії ультразвукового променя. Останній спрямовується або паралельно осі труби, або під кутом до неї.

У першому випадку вимірюється місцева швидкість, що збігається з траєкторією руху ультразвукового променя; так, якщо останній рухається по осі труби, той і буде

вимірюватися осьова швидкість рідини. Співвідношення між середньою  $v_c$  та осьовий  $v_{max}$  швидкостями залежить від числа Re. При ламінарному русі  $\frac{v_c}{v_{max}} = 0,5$

при турбулентному русі це відношення зростає із збільшенням

$$Re \frac{v_c}{v_{max}} = 0,77 (\text{при } Re = 5 \cdot 10^3), \quad \frac{v_c}{v_{max}} = 0,87 (\text{при } Re = 5 \cdot 10^6).$$

У разі направлення ультразвукового променя під кутом до осі труби буде вимірюватися вже не місцева швидкість потоку, а швидкість  $v_D$ , усереднена по діаметру труби, причому співвідношення між  $v_D$  та середньою швидкістю по перетину  $v_C$  не залежить від кута нахилу променя, а визначається тільки числом Re. При ламінарному русі  $\frac{v_c}{v_D} = 0,75$ . При турбулентному русі зв'язок між  $v_C$  і  $v_D$  визначається рівнянням:

$$\frac{v_D}{v_C} = 1 + 0.442 \sqrt{\lambda},$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт опору труби.

Для гладких труб

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 Re^{-0.237}.$$

З цього виходить рівняння  $\frac{v_C}{v_D} = 0,925$  при  $Re = 5 \cdot 10^3$  і  $\frac{v_C}{v_D} = 0,961$  при  $Re = 5 \cdot 10^6$ .

Таким чином, для витратоміру з ультразвуковим променем, що перетинає потік під деяким кутом  $\alpha$ , поправочний коефіцієнт значно ближче до одиниці і величина його менше міняється, чим для витратоміру з променем, паралельним осі труби. У першому випадку при десятиразовій зміні витрати в турбулентній області величина  $\frac{v_C}{v_D}$  міняється усього на  $\pm 0,65\%$  від середнього значення, в другому ж випадку відповідна зміна витрати міняє  $\frac{v_c}{v_{max}}$  на  $\pm 1,65\%$ .



Зміна щільності і складу середовища викликає зміну швидкості ультразвуку  $c$  в ній. Для рідин швидкість із залежить головним чином від температури  $t$  і концентрації розчину  $q$  і при невеликих коливаннях  $\Delta t$  і  $\Delta q$  змінюється лінійно:

$$c_{t, q} = c \cdot (1 + b \cdot \Delta t - a \cdot \Delta q).$$

Відносний температурний коефіцієнт  $b$  швидкості ультразвуку для більшості органічних рідин негативний і має значення  $2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$ .

Легко бачити, що для фазового витратоміру, абсолютна похибка від зміни температури і концентрація буде рівна:

$$\Delta \varphi_{t, q} = \frac{4(b\Delta t + a\Delta q)L\omega \cos \alpha}{c^2} \nu,$$

а відносна похибка:

$$\delta \varphi_{t, q} = 200 \cdot (b \cdot \Delta t + a \Delta q).$$

Звідси витікає, що навіть незначні коливання температури і концентрації середовища можуть дати помітну похибку. При  $\Delta t = 5^\circ$  и  $b = 2,5 \cdot 10^{-3}$  отримаємо  $\delta \varphi_t = 1,25 \%$ .

У однопроменевих фазових витратомірах коливання  $t$  і  $q$  викликають ще одну обставину, що обмежує можливості застосування таких приладів.

Навіть дуже незначні коливання  $t$ , наприклад на  $1...2^\circ$ , створюють такі зрушення фаз на приймальних п'єзоелементах в порівнянні з випромінюючими п'єзоелементами, які виходять за межі робочої характеристики фазового детектора. В цьому випадку виходом з положення є використання однопроменевих приладів з вимірювальними схемами, що здійснюють безпосереднє порівняння фаз обох прийнятих коливань (по потоку і проти нього), або перехід на застосування двопроменевих витратомірів.

Багатократні віддзеркалення або реверберація ультразвукових коливань від меж середовища з мембранами приймальних перетворювачів можуть бути джерелом великих погрешностей. Основною перешкодою є перший паразитний сигнал, що приходить на приймальний перетворювач після двократного віддзеркалення від приймального і випромінюючого вібраторів. Величина цього сигналу може досягати до

75 % від величини корисного сигналу, що створюється первинним не відбитим ультразвуковим коливанням. Погрішність від реверберації дуже важко оцінити кількісно. Для боротьби з реверберацією в двопробних приладах доцільно поверхні мембран приймальних п'єзоелементів зрізати під невеликим кутом до площини, перпендикулярної ультразвуковому променю. Тоді відбиті імпульси підуть убік і повторні віддзеркалення не поступають на п'єзоелементи. З цієї ж причини перетворювачі із заломленням значною мірою позбавлені похибки, пов'язаних з реверберацією.

Погрішності, що вносяться електронною вимірювальною схемою, визначаються характером і типом останньої, і для кожної схеми повинні оцінюватися самостійно.

#### **4.2 Розрахунок методичної похибки виміру витрати**

Більшість з розроблених витратомірів мають перетворювачі із заломленням ультразвукових хвиль, виконані з тими, що накладаються зовні на трубопровід з вимірюваним потоком вузлами п'єзоелементів, наприклад, ClampitronFlowmeter фірми «ControlotronCorporation» (США). Такі прилади з малими витратами і швидко монтується на трубі. У цих перетворювачах ультразвукові хвилі поширюються в потоці, зазнаючи два заломлення на межах розділу : звукопровід вузла п'єзоелемента - труба і труба - вимірюваний потік. Кути заломлення ультразвукових хвиль на межах розділу залежать від змін швидкості ультразвуку (головним чином, у вимірюваному потоці), обумовленої варіаціями температури, тиску і складу вимірюваного потоку, що призводить до великих погрішностей вимірів витрати.

Дійсно, спрощені рівняння витрати Q для одноканальних частотно-імпульсних QF, імпульсно-тимчасових QT і фазових QФ витратомірів відповідно мають вигляд:

$$QF = (\pi \cdot D^3 \cdot (1 + Ca \cdot \tau \cdot \sin \frac{\alpha}{D})^{2/4} \cdot K \cdot \sin 2 \cdot \alpha) \cdot F, \quad (4.1)$$

$$QT=(\pi \cdot D \cdot C_a^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/8 \cdot K)) \cdot T, \quad (4.2)$$

$$Q\phi=(\pi \cdot D \cdot C_a^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/8 \cdot K \cdot \omega)) \cdot \Phi, \quad (4.3)$$

де  $D$  — внутрішній діаметр труби;

$C_a$  — швидкість ультразвуку в потоці;

$$\tau = \tau_{\text{ЭЛ}} + \tau_{\text{ТР}} + \tau_{\text{ЗВ}}$$

$\tau$  — час затримки ультразвукових хвиль в електронній схемі і електричних кабелях  $\tau_{\text{ЭЛ}}$ , у трубі  $\tau_{\text{ТР}}$  та в звукопроводі  $\tau_{\text{ЗВ}}$ ;

$\alpha$  — кут між напрямом поширення ультразвукових хвиль в потоці і віссю труби;

$K$  — поправка на розподіл швидкостей потоку;

$F$  — різниця частот вихідних сигналів;

$T$  — різниця часів вихідних сигналів;

$\omega$  — кутова частота ультразвукового сигналу;

$\Phi$  — різниця фаз вихідних сигналів.

Гранична відносна похибка  $\Delta\phi$  виміру функції  $\Psi(x, y)$  некорельованих параметрів  $x$  і  $y$  може бути виражена:

$$\Delta\Psi = ((\partial\Psi/\partial x/\Psi)^2 \delta x^2 + (\partial\Psi/\partial y/\Psi)^2 \delta y^2)^{1/2}, \quad (4.4)$$

де  $\delta x$  и  $\delta y$  - граничні відносні похибки параметрів  $x$  і  $y$ .

З рівнянь (4.1), (4.2) і (4.3) на підставі рівняння (4.4) отримаємо вирази граничних відносних похибок  $\Delta$ , а вимірів витрати за рахунок змін кута  $\alpha$  для відповідних схем витратомірів:

$$\Delta_{af} = (2 \operatorname{Cos} \alpha C_a \tau / D / (1 + (C_a \tau \operatorname{Sin} \alpha / D) - 2 \operatorname{ctg} 2\alpha)) \delta \alpha, \quad (4.5)$$

$$\Delta_{at} = \Delta_{a\phi} = 2 \delta \alpha / \operatorname{Sin} 2\alpha, \quad (4.6)$$

де  $\delta\alpha$  — гранична відносна похибка кута  $\alpha$ .

Значення кута  $\alpha$  визначається за виразом:

$$\alpha = \arccos(n \cos \gamma), \quad (4.7)$$

$$n = C_\alpha / C_\gamma, \quad (4.8)$$

де  $C_\gamma$  — швидкість ультразвуку в звукопроводі вузла п'єзоелемента;

$\gamma$  — кут між напрямом поширення ультразвукових хвиль в звукопроводі вузла п'єзоелемента і віссю труби.

З виразів (4.7) і (4.8) на підставі рівняння (4.4) отримаємо рівняння граничної відносної погрішності кута  $\alpha$ :

$$\delta\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - (n \cos \gamma)^2}} \delta n, \quad (4.9)$$

Величина  $C_\gamma$  є функцією температури  $t$ , а  $C_\alpha$  — функцією температури  $t$ , тиску  $p$  і складу  $q$ . Тому на підставі рівняння (4) можна записати:

$$\delta n = \sqrt{\delta_{nt}^2 + \delta_{np}^2 + \delta_{nq}^2}, \quad (4.10)$$

де  $\delta_{nt}$ ,  $\delta_{np}$  и  $\delta_{nq}$  - відповідно граничні відносні похибки  $n$  за рахунок варіацій  $t$ ,  $p$  та  $q$ .

Зміною геометричних розмірів труби від температури нехтуємо внаслідок крихти величини. З рівнянь (4.1), (4.2) і (4.3) на підставі рівняння (4.4) отримаємо вирази граничних відносних похибок  $\Delta C_\alpha$  вимірів витрати за рахунок змін швидкості ультразвуку  $C_\alpha$  у вимірюваному потоці для відповідних схем витратомірів:

$$\Delta C_\alpha f = (2C_\alpha \tau \sin \alpha / D (1 + C_\alpha \tau \sin \alpha / D)) \delta C_\alpha, \quad (4.11)$$

$$\Delta C_{at} = \Delta C_{ap} = 2\delta C_a, \quad (4.12)$$

Швидкість ультразвуку в потоці Ca є функцією температури t, тиску p і складу q. На підставі рівняння (4.4) запишемо:

$$\delta C_a = \sqrt{\delta_{Cat}^2 + \delta_{Cap}^2 + \delta_{Caq}^2},$$

де  $\delta_{Cat}$ ,  $\delta_{Cap}$  та  $\delta_{Caq}$  - відповідно граничні відносні похибки Ca за рахунок варіацій t, p та q.

Оскільки  $\delta_{Cat} = \delta n t$ ,  $\delta_{Cap} = \delta n p$  и  $\delta_{Caq} = \delta n q$ , то  $\delta C_a = \delta n$ .

На підставі рівняння (4.4) загальна гранична відносна погрішність  $\Delta$  виміри витрати для витратомірів з перетворювачами із заломленням ультразвукових хвиль за рахунок змін кута випромінювання  $\alpha$  і швидкості ультразвуку у вимірюваному потоці Ca отримаємо:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_a^2 + \Delta_{Ca}^2}, \quad (4.13)$$

Всі перелічені вище похибки були розраховані на ЕОМ - PASKAL. Дані для розрахунку приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Дані для розрахунку похибки

Вихідні данні:	Значення:
Діаметр труби D, м	0,1
Кут поширення ультразвукових хвиль в звукопроводі по відношенню до осі труби $\gamma$ , рад	$0,78539$ $28,8 \cdot 10^{-6}$
Час затримки ультразвукових хвиль $\tau$ , с	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Гранична відносна похибка за рахунок варіації температури $\delta_{nt}$ ,	$1 \cdot 10^{-3}$
Гранична відносна похибка за рахунок варіації тиску $\delta_{np}$ ,	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Гранична відносна похибка за рахунок варіації концентрації $\delta_{nq}$ ,	0,52
Величина n	

У програмі прийняті наступні позначення:

$D=DT$ ,  $\gamma=G$ ,  $\tau=T$ ,  $\delta_{nt}=NT$ ,  $\delta_{np}=NP$ ,  $\delta_{nq}=NQ$ ,  $n=N$ ,  $\alpha=A$ ,  $\delta n=BN$ ,  $\delta a=BA$ ,  $\Delta af=AF$ ,  
 $\Delta at=AT$ ,  $\Delta a\varphi=AV$ ,  $Ca=V$ ,  $\Delta Caf=DF$ ,  $\Delta Cat=DC$ ,  $\Delta Caq=DV$ ,  $\delta Ca=CA$ ,  $\Delta f=FI$ ,  $\Delta t=\Delta\varphi=TF$ .

Результати розрахунку приведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2

Результати розрахунку похибки

Вид похибки:	Значення, %
Від зміни кута $\alpha$ :	
- для частотно-імпульсних витратомірів	
- для імпульсно-тимчасових і фазових витратомірів	3,51
Від зміни швидкості ультразвуку :	5,60
- для частотно-імпульсних витратомірів	0,27
- для імпульсно-тимчасових і фазових витратомірів	3,05
Загальна похибка:	

- для частотно-імпульсних витратомірів	3,52
- для імпульсно-тимчасових і фазових витратомірів	6,38

Як бачимо, з розрахунків при застосуванні перетворювачів із заломленням ультразвукових хвиль граничні відносні похибки вимірів витрати  $\Delta a$  за рахунок змін кута  $a$  в частотно-імпульсних витратомірах можуть бути 3,51 %, а в імпульсно-тимчасових і фазових — 5,6 %. Цих похибок немає у витратомірах з перетворювачами без заломлення ультразвукових хвиль. Відносні похибки вимірів витрати за рахунок зміни швидкості ультразвуку  $C_a$  у частотно-імпульсних витратомірах за розрахунками складають 0,27 %, а в імпульсно-тимчасових і фазових — 3,05 %.

Отже загальна гранична відносна похибка виміру витрати для витратомірів з перетворювачами із заломленням ультразвукових хвиль за рахунок змін кута випромінювання і швидкості ультразвуку у вимірюваному потоці складе:

- для частотно-імпульсного витратоміру 3,52 %;
- для імпульсно-тимчасового витратоміру 6,38 %.

### 4.3 Програма розрахунку похибок

Розрахунок погрішностей виконаний на мові Turbo PASKAL 7.0.

Program 1;

Usescrt;

VAR N, BA, A, AF, AT, V, NT, NP, NQ, DF, DT, DV, DC, CA, DV, FI, TF, AV, T,

G: real;

Begin

clrscr;

```

writeln('Введіть діаметр труби DT');
readln(DT);
writeln('Введіть кут поширення ультразвукових хвиль G');
readln(G);
writeln('Введіть час затримки ультразвукових хвиль T');
readln(T);
writeln('Введіть швидкість поперечної ультразвукової хвилі V');
readln(V);
writeln('Введіть граничну відносну похибку за рахунок варіації температури NT');
readln(NT);
writeln('Введіть граничну відносну похибку за рахунок варіації тиску NP');
readln(NP);
writeln('Введіть граничну відносну похибку за рахунок варіації концентрації
NQ');
readln(NQ);
writeln(' Введіть N');
readln(N);
BN:=sqrt(NT*NT+NP*NP+NQ*NQ);
BA:=BN/sqrt(1-(N*cos(G)));
A:=arctan((sqrt(1-sqr(N*cos(G))))/(N*cos(G)));
AF:=(2*cos(A*T*V/DT/(1+(T*V*sin(A)/DT))-2*cos(2*A)/sin(2*A))*BA;
AV:=2*BA/sin(2*A);
AT:= AV;
CA:=BN;
DF:=(2*V*T*sin(A/DT*(1+V*T*sin(A/DT))))*CA;
DC:=2*CA;
FI:=sqrt(AF*AF+DF*DF);
TF:=sqrt(AT*AT+DC*DC);

```



```
Writeln('Результати розрахунку похибки ');  
Writeln('AF=',AF:7:4);  
Writeln('AT=',AT:7:4);  
Writeln('DF=',DF:7:4);  
Writeln('DC=',DC:7:4);  
Writeln('FI=',FI:7:4);  
Writeln('TF=',TF:7:4);  
readkey;  
End.
```

Результати розрахунку похибок:

AF=0,0351

AT=0,0560

DF=0,0027

DC=0,0305

FI=0,0352

TF=0,0638

#### 4.4 Блок - схема алгоритму обчислення похибки

Блок-схема алгоритму обчислення похибок представлена на малюнку 4.1

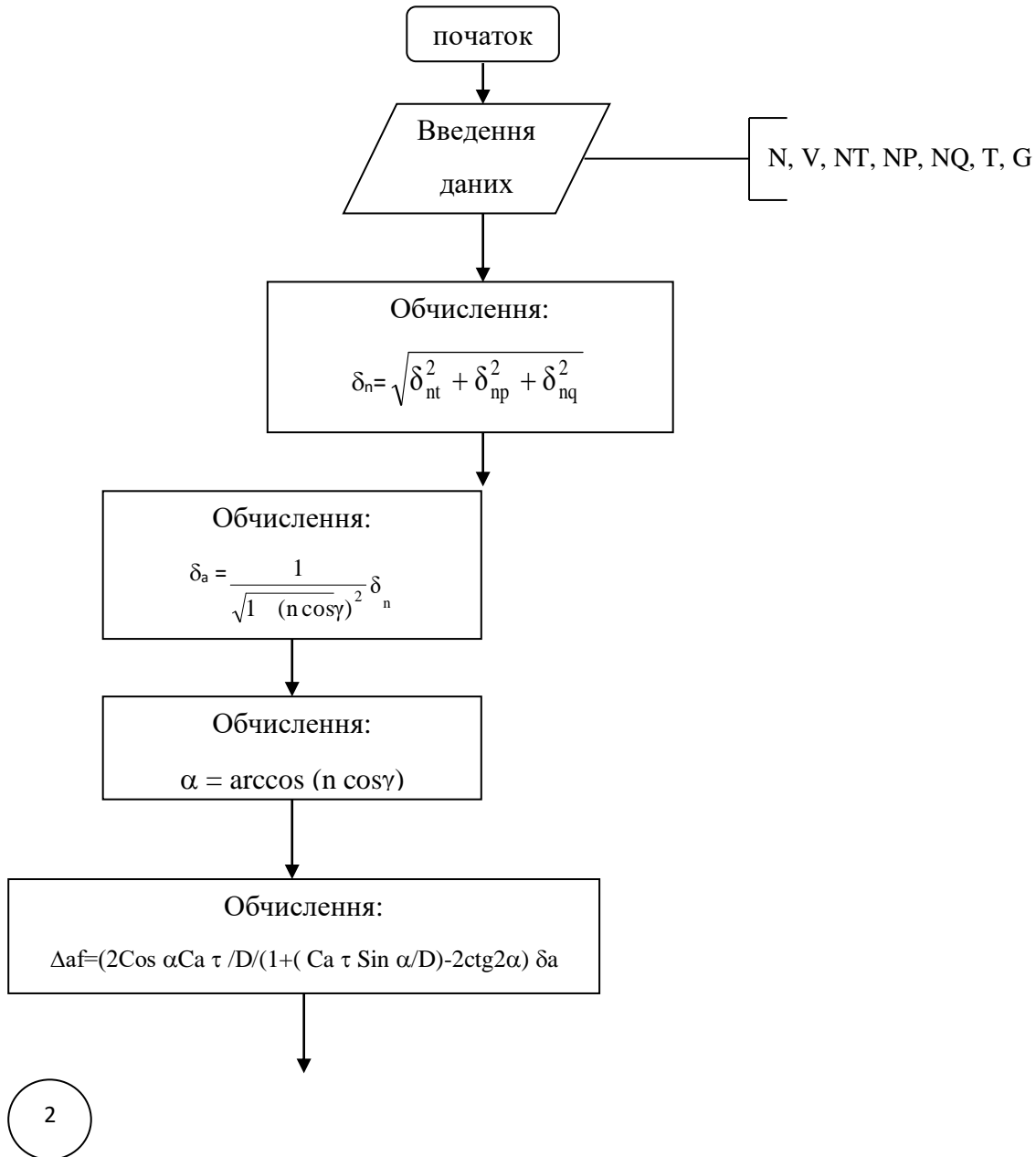
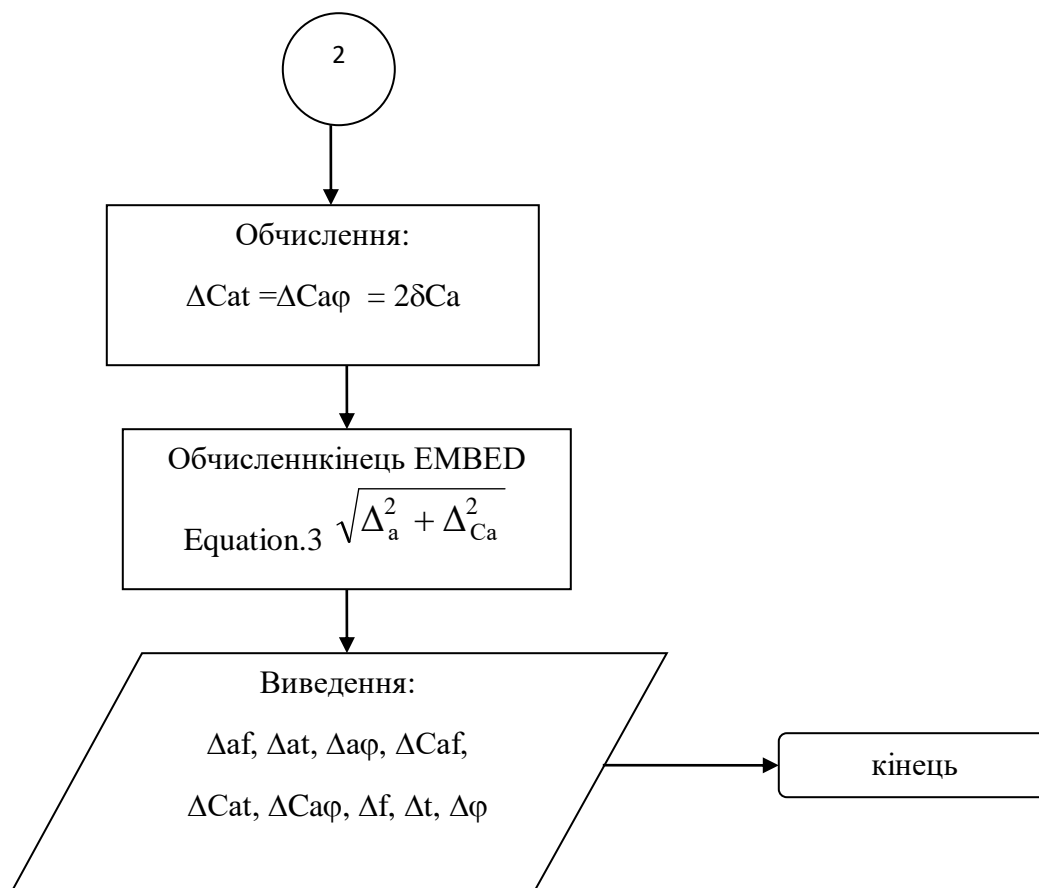


рис.4.1. Блок-схема алгоритму обчислення похибок витратоміра палива



Продовження рис. 4.1.

### Висновки:

При визначенні витрати палива є ряд причин, які можуть викликати появу похибок свідчень в ультразвукових витратомірах. Серед основних показників похибки являється залежність свідчень від профілю швидкостей або числа Рейнольдса (Re), а також внаслідок зміни тиску, температури, і її концентрації, змінюється швидкість поширення ультразвуку в середовищі. Також можуть виникати похибки, що вносяться електронною вимірювально-перетворювальною схемою.

Свідчення ультразвукових витратомірів хоча і порівняно незначні, але залежать від профілю швидкостей. Тому бажано мати прямолінійні ділянки труби до і після того місця, де встановлені п'єзоелементи.

У разі виміру за допомогою фазового витратоміру навіть незначні коливання температури і концентрації середовища можуть дати помітну похибку. Навіть дуже незначні коливання температури створює такий зрушення фаз на приймальних п'єзоелементах в порівнянні з випромінюючими п'єзоелементами, які виходять за межі робочої характеристики фазового детектора. В цьому випадку виходом з положення є використання двопроневих витратомірів.

Багатократні віддзеркалення або реверберація ультразвукових коливань в двопроневих витратомірах, від меж середовища з мембранами приймальних перетворювачів можуть бути джерелом великих похибок. Для боротьби з реверберацією в двопроневих приладах доцільно поверхні мембран приймальних п'єзоелементів зрізати під невеликим кутом до площини, перпендикулярної ультразвуковому променю. Тоді відбиті імпульси підуть убік і повторні віддзеркалення не поступають на п'єзоелемент.

Широке розповсюдження у використанні розроблених витратомірів мають перетворювачі із заломленням ультразвукових хвиль, кути заломлення ультразвукових хвиль на межах розділу залежать від змін швидкості ультразвуку обумовленої варіаціями температури, тиску і складу вимірюваного потоку, що призводить до великих похибок вимірів витрати.

При розрахунку похибки виміру на ЕОМ в програмі PASKAL, ми вчислили, що при застосуванні перетворювачів із заломленням ультразвукових хвиль граничні відносні похибки вимірів витрати  $\Delta a$  за рахунок змін кута  $a$  в частотно-імпульсних витратомірах, менше, ніж у імпульсно-тимчасових і фазових. Цих похибок немає у витратомірах з перетворювачами без заломлення ультразвукових хвиль. Відносні похибки вимірів витрати за рахунок зміни швидкості ультразвуку  $S_a$  в частотно-імпульсних витратомірах за розрахунками складають 0,27 %, а в імпульсно-тимчасових і фазових — 3,05 %. Для частотно-імпульсного витратоміру і імпульсно-тимчасового витратоміру з перетворювачами із заломленням ультразвукових хвиль загальна

гранична відносна погрішність виміру витрати за рахунок змін кута випромінювання і швидкості ультразвуку у вимірюваному потоці складе - 3,52 % і 6,38 % відповідно.

В ході розрахунків на підставі рівняння граничної відносної погрішності  $\Delta\varphi$  виміри функції  $\Psi(x,y)$  некорельованих параметрів  $x$  і  $y$ , отримали загальну граничну відносну погрішність  $D$  виміру витрати для витратомірів з перетворювачами із заломленням ультразвукових хвиль за рахунок змін кута випромінювання  $\alpha$  і швидкості ультразвуку у вимірюваному потоці  $C_a$ .

Розраховані для різних рідин значення  $\delta_{nt}$  в діапазоні зміни температури  $15 \pm 5$  °C приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Граничні відносні похибки за рахунок варіації температури

Вимірювана рідина	$\delta_{nt} 10^{-2}$	n
Вода	1,30	0,55
Бензин	1,80	0,44
Дизельне паливо	1,80	0,50
Масло індустріальне	1,30	0,55
Спирт етиловий	1,50	0,46
Спирт метиловий	1,50	0,42
Бензол	2,00	0,50
Нафта	1,50	0,52

## **ВИСНОВКИ**

У дипломній роботі були розглянуті групи ультразвукових витратомірів, їх структури та принципи застосування. Після проведення порівняльного аналізу принципу вимірювання витрати середовища, можливості використання безконтактних датчиків (витратомірів) в системі обліку палива літака для контролю витрати палива в даний час більшість цих типів інтелектуальних витратомірів використовуються при

обліку нафтопродуктів. Дані про помилки таких витратомірів відносно кращі, ніж у турбін, діафрагм, змінних перепадів тиску та інших типів.

Також представлена принципова схема вимірювання швидкості потоку, заснована на методі Доплера. Ультразвукові датчики мають переваги не тільки в області створення інтелектуальних високоточних витратомірів, але і в створенні еталонного вимірювального і перевірного обладнання.

Таким чином, розглянутий ультразвуковий витратомір може використовуватися на заправних станціях в літаках і аеропортах для точного обліку як нафтопродуктів, так і їх обсягу, об'ємного і масового споживання.

Основними перевагами ультразвукових витратомірів є відсутність рухомих елементів, простота забезпечення вибухозахищених умов і збереження практично цілих ділянок трубопроводу. Крім того, ультразвуковий прилад має низьку інерційність і може використовуватися для контролю пульсуючого потоку.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Безпека життєдіяльності / За ред. Я.І. Бедрія. – Львів, 2000.
2. Білявський Г.О., Падун М.М., Фурдуй Р.С. Основи загальної екології. – К. Либідь, 1995.
3. Будико М.И. Глобальна екологія. – М. Мисль, 1977.
4. Величковський Б.Т., Кирпічев В.І., Суравегіна І.Т. Здоров'я людини і довкілля. – М. Нова шк., 1997.

5. Гігієна праці / А.М. Шевченко, О.П. Яворовський, Г.О. Гончарук та ін. – К. Інфотекс, 2000.
6. Єлісеєв А.Т. Охорона праці. – К., 1995.
7. Каспаров А.А. Гігієна праці і промислова санітарія. – М. Медицина, 1981.
8. Кирилов В.Ф., Книжников В.А. , Коренков І.П. Радіаційна гігієна. – М. Медицина, 1988.
9. Корсак К.В., Плахоттк О.В. Основи екології. – 2-ге вид. – К. МАУП, 2000.
10. Лапт ВМ Безпека життєдіяльності людини. – К. Знання, Л. Вид-во ЛБК НБУ, 1999.