

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**на тему: «Комплекс вимірювання витрати природного газу»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-01

Приси́кар Олександр Степанович \_\_\_\_\_

Керівник:

асистент

Драчук Олеся Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доцент

Самарцев Юрій Миколайович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти –перший (бакалаврський)

Спеціальність –151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма - «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт**  
**студенту Присякару Олександрю Степановичу**

1. Тема проєкту: «Комплекс вимірювання витрати природного газу»

Керівник проєкту                      Драчук О.О.

Затверджено наказом по університету №2121-с від 28.05.2024

2. Термін подання студентом проєкту 11 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до проєкту:

3.1. *Номінальна витрата газу: 150 м<sup>3</sup>/год.*

3.2. *Діаметр умовного проходу: 100мм .*

3.3. *Середня температура: -40°C~+200°C; Номінальний тиск: 4,0 Мпа.*

4. Зміст пояснювальної записки:

4.1. *Огляд та класифікація витратомірів природного газу*

4.2. *Огляд складових елементів вимірювальних комплексів*

4.3. *Розробка принципової та структурної схеми вимірювального комплексу*

4.4. Створення програми обробки інформації з датчиків, обчислення витрати з приведенням до стандартних умов.

4.5. Висновки

5. Перелік графічного (ілюстраційного) матеріалу: Складальне креслення корпусу обчислювача, принципова та структурна схема комплексу вимірювання, програмний алгоритм обчислювача витрати 4 формати А1

6. Дата видачі завдання: 1 лютого 2024 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Підбір та аналіз літератури	до 01.03.2024 р.	
2.	Огляд методів вимірювання витрати, класифікація витратомірів	до 20.03.2024 р.	
3.	Аналіз принципів побудови вимірювальних комплексів	до 5.04.2024 р.	
4.	Створення принципової та структурної схеми	до 10.04.2024 р.	
5.	Створення 3Д моделі обчислювача	до 15.05.2024 р.	
6.	Написання програмного коду обробки інформації вимірювального комплексу		
7.	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів. Відгук керівника ДП	до 06.06.2024 р.	
8.	Перевірка на плагіат, рецензування	до 11.06.2024 р.	
9.	Захист	з 14.06.2024 р. по 20.06.2024 р.	

Студент

\_\_\_\_\_

Олександр ПРИСИКАР

Керівник ДП

\_\_\_\_\_

Олеся ДРАЧУК

## Анотація

Тема комплексів вимірювання витрати природного газу є вкрай актуальною у світі через потребу в ефективному та точному обліку енергоресурсів. В умовах збільшення глобального споживання природного газу та важливості зменшення витрат і втрат при його транспортуванні, точні вимірювання стають критично важливими для енергетичної безпеки, економічної ефективності та екологічної стійкості. Комплекси вимірювання витрати природного газу дозволяють операторам енергетичних систем точно відстежувати обсяги споживаного ресурсу, запобігати втратам і витокам, а також забезпечувати коректне комерційне розрахунки між постачальниками та споживачами.

Мета цієї дипломної роботи – розробка програми обчислення даних вимірювального комплексу. Для виконання цієї задачі ознайомимося з основними принципами роботи комплексу та його компонентами.

Ключові слова: комплекс вимірювання витрати природного газу, витратомір, датчик, обчислювальна система.

## Annotation.

The topic of natural gas consumption measurement complexes is highly relevant in today's world due to the need for efficient and accurate accounting of energy resources. With the increase in global natural gas consumption and the importance of reducing costs and losses during its transportation, precise measurements become critically important for energy security, economic efficiency, and environmental sustainability.

Natural gas consumption measurement complexes enable energy system operators to accurately track the volumes of consumed resources, prevent losses and leaks, and ensure correct commercial transactions between suppliers and consumers.

The objective of this graduate work is to develop a program for calculating data from the measurement complex. To achieve this task, we will familiarize ourselves with the basic principles of the complex's operation and its components.

Keywords: natural gas flow measurement complex, flow meter, sensor, computing system.

## Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....	10
2. КОМПОНЕНТИ КОМПЛЕКСІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....	12
2.1. Витратоміри: типи, принципи роботи, переваги та недоліки .....	12
2.2. Датчики тиску і температури.....	27
2.3. Системи збору і обробки даних.....	33
3. ПРИНЦИП РОБОТИ КОМПЛЕКСІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....	35
3.1. Етапи вимірювального процесу .....	35
3.2. Перевірка вимірювального комплексу.....	36
3.3. Вплив умов експлуатації на точність вимірювань .....	36
4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ КОМПЛЕКСОМ .....	37
4.1. Природа технологічного об'єкту контролю (ОК) і процеси, що протікають в ньому .....	39
4.2. Регульовані параметри, збурення та можливі дії керування.....	40
4.3. Структурна схема автоматизованої системи контролю витоку газу.....	41
4.4. Розрахунок загальної похибки комплексу .....	43
4.5. Програма обчислення даних вимірювального комплексу.....	46
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	54
ДОДАТКИ.....	56

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОК – об'єкт контролю;

ОС – обчислювальна система;

СК – система контролю;

МПД – модуль передачі даних;

ЛП – локальна пам'ять;

ДТК – датчик тиску;

ДТ – датчик температури;

HART – Highway Addressable Remote Transducer - комунікаційний протокол для передачі даних у промислових процесах;

RS 485 – Recommended Standard 485 – стандарт передачі даних у промислових системах, число 485 вказує на номер стандарту.

## Вступ

Вимірювання витрати природного газу є однією з ключових задач у газовій промисловості, оскільки точний облік енергоресурсів безпосередньо впливає на економічну ефективність, енергетичну безпеку та екологічну стабільність. Зростання попиту на природний газ як на відносно чисте джерело енергії зумовлює необхідність удосконалення систем вимірювання для зменшення втрат та підвищення точності обліку. У сучасних умовах розвитку технологій важливим є використання комплексів вимірювання витрати природного газу, що забезпечують надійні та точні вимірювання, необхідні для коректного комерційного розрахунку та зниження ризиків, пов'язаних з витоками газу.

Метою цієї роботи є написання програми обчислення даних вимірювального комплексу. Що дасть змогу слідкувати за наступними параметрами комплексу: миттєва витрата газу, температура та тиск. Для цього буде вивчено компоненти і технології, які використовуються у комплексах вимірювання витрати природного газу, а також розроблено математичні моделі, що описують принципи їх роботи. Для досягнення цієї мети передбачається вирішити наступні завдання:

- дослідити теоретичні основи вимірювання витрати природного газу, включаючи фізичні принципи і типи витратомірів;
- описати та проаналізувати основні компоненти комплексів вимірювання витрати природного газу;
- вивчити сучасні технології вимірювання витрати природного газу та інтеграцію цих технологій у вимірювальні комплекси;
- розробити і описати математичну модель вимірювального комплексу, що дозволяє підвищити точність вимірювань;
- дослідити практичні аспекти використання комплексів вимірювання витрати природного газу у різних галузях промисловості;
- проаналізувати результати досліджень та розробити рекомендації щодо покращення роботи вимірювальних комплексів.



Об'єктом дослідження є комплекси вимірювання витрати природного газу, які використовуються у різних галузях промисловості. Предметом дослідження є компоненти і технології, що складають ці комплекси, а також математичні моделі, що описують їх роботу.

## 1. Теоретичні основи вимірювання витрати природного газу

Вимірювання витрати природного газу базується на ряді фізичних принципів, що дозволяють точно визначити кількість газу, що проходить через трубопровід за одиницю часу. Розглянемо основні фізичні принципи, які застосовуються для вимірювання витрати.

- Закони гідродинаміки. Витрати газу визначаються через різницю тисків та швидкість потоку, що описуються рівняннями Бернуллі та Нав'є-Стокса.
- Теплові властивості. Вимірювання витрати може базуватися на зміні температури газу при проходженні через витратомір (термічні витратоміри).
- Акустичні властивості. Використання ультразвукових хвиль для визначення швидкості потоку газу.
- Електромагнітні принципи. Вимірювання зміни електромагнітного поля при проходженні газу через витратомір (коріолісові витратоміри).

Для вимірювання витрати природного газу використовуються різні методи, які можуть бути спрямовані на визначення об'ємної або масової витрати. Відповідно до принципу роботи, витратоміри можна класифікувати як витратоміри з позитивним витісненням, витратоміри диференціального тиску, турбінні, вихрові, ультразвукові, коріолісові та теплові масові витратоміри.

**Масова витрата** – це маса газу  $m$ , яка за одиницю часу  $t$  проходить через поперечний переріз потоку, кг/год[17]:

$$q_m = \frac{m}{t}, \quad (1.1)$$

Де  $t$  – час, протягом якого газ проходить через цей переріз[17].

**Об'ємна витрата** – кількість газу, що проходить через поперечний переріз потоку за одиницю часу  $t$ , в одиниці об'єму  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ [17]:

$$q_V = \frac{V}{t}, \quad (1.2)$$

## **2. Компоненти комплексів вимірювання витрати природного газу**

Комплекси вимірювання витрати природного газу включають в себе різноманітні компоненти, що забезпечують точне та надійне вимірювання потоку газу. Основні елементи таких систем включають витратоміри, датчики тиску і температури, а також системи збору та обробки даних. Кожен з цих компонентів виконує специфічні функції, необхідні для отримання достовірної інформації про витрати природного газу.

Така комплексна система забезпечує точний і надійний контроль, дозволяючи ефективно керувати складними процесами і підтримувати їх безперебійну роботу. У подальших розділах ми детально розглянемо кожен з цих компонентів, їхні характеристики, принципи роботи та застосування.

### **2.1 Витратоміри: типи, принципи роботи, переваги та недоліки**

Витратоміри – це прилади, призначені для вимірювання витрати газу, тобто об'єму або маси газу, що проходить через певний переріз трубопроводу за одиницю часу. Вони є ключовими компонентами систем обліку та контролю витрат природного газу. Використання витратомірів є критично важливим для різних галузей, таких як промисловість, енергетика, комунальне господарство, а також у побутових умовах, де необхідно точно вимірювати споживання газу.

Принцип роботи витратомірів залежить від їх типу, але загальною метою є точне визначення кількості газу, що проходить через систему. Основні принципи роботи витратомірів включають механічне обертання, вимірювання часу проходження сигналу, використання інерційних сил та інші методи. Дані, отримані з витратомірів, можуть бути використані для обліку газу, управління процесами, моніторингу та оптимізації споживання ресурсів.

Витратоміри використовуються в багатьох сферах. У промисловості вони служать для контролю технологічних процесів, обліку споживання сировини та енергії. В енергетиці витратоміри застосовуються для вимірювання об'єму газу, що спалюється на електростанціях та інших енергетичних об'єктах. У комунальному

господарстві ці прилади необхідні для обліку споживання газу в житлових та комерційних будівлях.

Існує кілька основних видів витратомірів, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування. Розглянемо які існують основні типи витратомірів, їхні особливості, переваги та недоліки.

### **Ультразвукові(акустичні) витратоміри**

Акустичні витратоміри вимірюють витрату за допомогою акустичних коливань, що проходять через потік рідини або газу. Більшість таких приладів працюють в ультразвуковому діапазоні частот і називаються ультразвуковими. Вони бувають двох типів: одні вимірюють витрату за допомогою переміщення акустичних коливань рухомим середовищем, інші використовують ефект Доплера. Найбільш поширені прилади вимірюють час проходження акустичних коливань вздовж і проти потоку. Рідше зустрічаються прилади, які вимірюють відхилення коливань перпендикулярно до потоку.

Ультразвукові витратоміри можуть бути використані для вимірювання як об'ємної, так і масової витрати газу, і мають високу точність та швидкість вимірювання. Ультразвукові витратоміри працюють на основі вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів через потік газу. Два ультразвукових передавача-випромінювача розташовані по обидва боки трубопроводу. Один передає імпульс, який проходить через газ до другого передавача. Вимірюється час проходження імпульсу в обох напрямках. Різниця у часі проходження імпульсу в прямому та зворотному напрямках пропорційна швидкості потоку газу.

Ультразвукові витратоміри використовуються у широкому діапазоні застосувань, включаючи комерційний та промисловий облік газу, контроль технологічних процесів та моніторинг систем транспортування газу. Вони мають низький рівень втрат тиску та можуть працювати у складних умовах, таких як високий тиск та температура.

Ультразвукові витратоміри мають кілька переваг, серед яких висока точність, відсутність рухомих частин і низький опір потоку. Проте вони можуть бути чутливими до змін складу газу і наявності домішок.



Рис 1. Ультразвуковий витратомір[10]

Ультразвукові витратоміри підходять для агресивних середовищ і чистих рідин, забезпечуючи вимірювання масової витрати з похибкою від  $\pm 1\%$  до  $2,5\%$ , а в середньому – від  $\pm 0,5\%$  до  $1\%$ . Ультразвукові витратоміри придатні для труб будь-якого діаметру починаючи від  $10\text{ мм}$  і більше.

Візьмемо для прикладу часово-імпульсний спосіб (спосіб фазового зсуву), він вимірює різниці фазових зсувів ультразвукових хвиль, які направляються проти потоку та за ним.

$$\Delta f = \frac{2\pi f D V_c \cos\beta}{c^2}, \quad (2.1)$$

де

$c$  — швидкість звуку в середовищі;

$V_c$  — середня швидкість потоку, вздовж усього шляху поширення сигналу;

$f$  — частота ультразвукового сигналу;

$D$  — шлях проходження ультразвукового сигналу.

Цей метод використовує різницю фаз між прийнятим і переданим імпульсним сигналом під кутом  $\beta$  до напрямку потоку.

Далі розглянемо наступний тип ультразвукових витратомірів – частотний. Частотними називаються ультразвукові витратоміри, засновані на залежності різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань від різниці часів  $\Delta\tau$  проходження цими коливаннями однієї і тієї ж відстані  $L$  по потоку рідини, що рухається, або газу і проти нього[12].

Залежно від того, чи вимірюються різниці частот пакетів ультразвукових коливань або коротких імпульсів, що проходять через рідину або газ, витратоміри називаються частотно-пакетними або частотно-імпульсними[12].

Наступним типом ультразвукових витратомірів є часоімпульсні витратоміри.

Часоімпульсні ультразвукові витратоміри – це такі витратоміри, що вимірюють різницю часів  $\Delta\tau$  змінних коротких імпульсів за напрямком руху потоку і проти нього по довжині шляху  $L$ . Різниця  $\Delta\tau$  пов'язана із середньою швидкістю  $v_L$  наступним рівнянням:

$$\Delta\tau = \frac{2Lv_L \cos\alpha}{c^2}. \quad (2.2)$$

Часоімпульсні ультразвукові витратоміри найчастіше одноканальні та працюють на дуже коротких імпульсах дальністю 0,1-0,2 мкс, які вони посилають один одному назустріч по чергово або одночасно[12].

## Турбосилові витратоміри

Турбосиловими називаються силові витратоміри, в перетворювачі яких в результаті силового впливу, пропорційного масовій витраті, потік закручується[16].

Такий витратомір, при зовнішньому силовому впливі, влаштований так, що всередині трубопроводу встановлений ротор з малим радіальним зазором, який має канали для проходу газу, розділені перегородками, паралельними його осі, або ж виконаний у вигляді прямокутної крильчатки. Ротор обертається від електродвигуна з кутовою швидкістю  $\omega$  і закручує газ, який набуває обертального руху, показаного стрілками. Далі газ надходить в ротор, вісь якого розташована паралельно і закручена на кут  $\phi$ , пропорційний масовій витраті.

Турбінні витратоміри використовуються для вимірювання об'єму газу в магістральних трубопроводах та на великих промислових об'єктах[20]. Ці прилади належать до класу тахометричних пристроїв, в яких чутливий елемент обертається під впливом потоку газу. Вони забезпечують надійний, безперервний і точний вимір кількості газу, що протікає в закритому трубопроводі під тиском. Принцип дії турбінних витратомірів базується на вимірюванні швидкості обертання турбіни під дією потоку газу. Під час проходження газу через витратомір турбіна обертається, а швидкість її обертання пропорційна швидкості потоку газу. Індуктивні або оптичні датчики реєструють ці обертання і генерують відповідні електричні імпульси, які передаються на вторинний прилад для обробки. Витратоміри цього типу забезпечують високу точність і надійність вимірювань, що робить їх ідеальними для використання в магістральних газопроводах і на великих промислових підприємствах, де потрібне точне вимірювання великих обсягів газу.

Переваги турбінних витратомірів включають високу точність і надійність, але вони можуть зазнавати зносу рухомих частин і потребують регулярного обслуговування





Рис 2. Турбінний лічильник[9]

### **Коріолісові витратоміри**

Витратоміри, відомі як коріолісові, мають коріолісове прискорення перетворювача, яке залежить від вартості, коли силовий вплив на них накладається. Конфігурація дозволяє потоку рухатися в радіальному напрямку по відношенню до осі обертання, яка збігається з віссю трубопроводу, щоб досягти цього безперервного прискорення перетворювача витрат.

Принципова схема коріолісового витратоміра зображена на рис 3. [9]

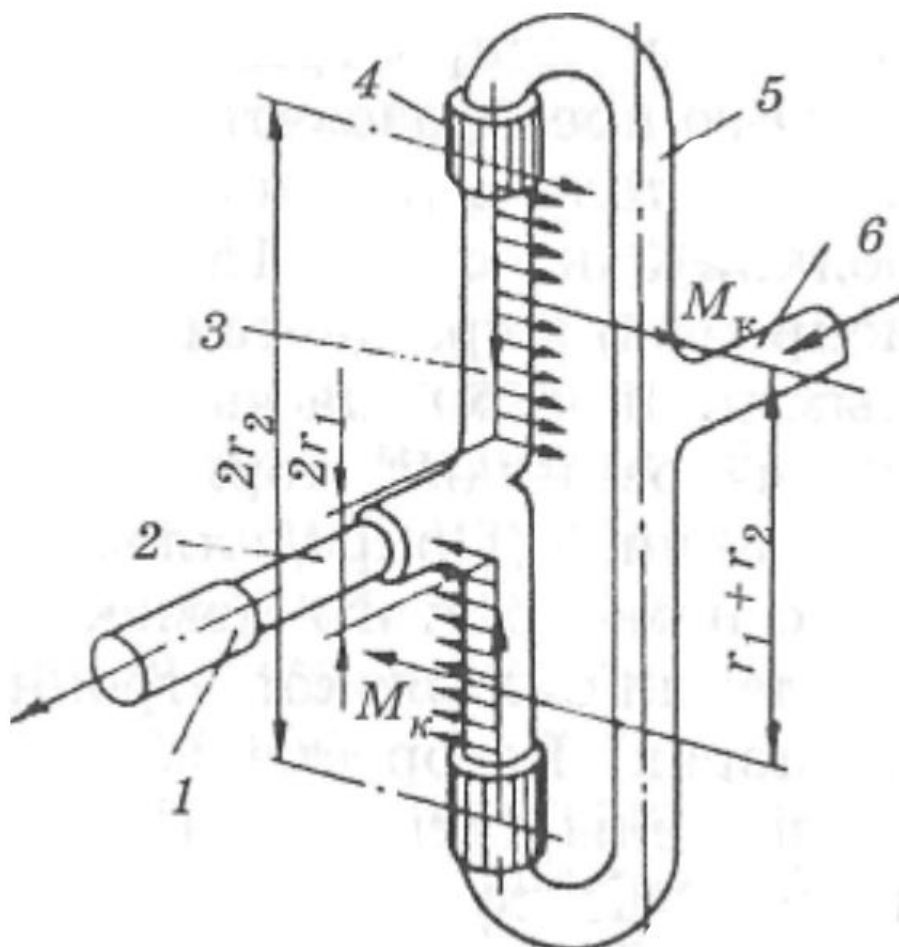


Рис 3. Схема дії сил у коріолісовому витратомірі[9]

У трубопроводі, через який тече вимірювана речовина, два трубні штуцера 1 і 6 пов'язані за допомогою гнучких трубних з'єднань. Металеві втулки, які не показані на схемі, з'єднують штуцери з шарикопідшипниками. Вони разом з рештою перетворювача витрати обертаються з частотою 1800 об/хв від електродвигуна через зубчасту передачу, пов'язану зі штуцером 6. Рідина надходить через штуцер 6. Коріолісове прискорення, яке відбувається в трубках, що обертаються, спричиняє прикладення сили до стінок трубки, що спрямовує крутний момент у протилежному напрямку. Коріолісове прискорення в трубках 3 має напрям, тоді як коріолісове прискорення в трубках 4 і 5 зворотне. Це відбувається, коли трубки 4 і 5 пов'язані еластичними з'єднаннями. Таким чином, момент сил  $M_k$  прикладений до стінок

трубок 3 у бік крутного моменту. Момент  $M_k$  прикручує тонку торсіонну трубку 2 до вихідного штуцера 1.

Момент  $M_k$  визначається рівнянням:

$$M_k = 2 \int_{r_1}^{r_2} a \rho F r dr, \quad (2.3)$$

де

$r$  – поточний радіус трубки;

$r_1$  – середній радіус, на якому зупиняється рух газу в радіальному напрямку;

$r_2$  – радіус зовнішнього кінця трубки;

$a$  – коріолісове прискорення в трубках;

$\rho$  – щільність вимірюваної речовини;

$F$  – площа поперечного перерізу трубки.

Коріолісове прискорення:

$$a = 2v\omega, \quad (2.4)$$

де

$v$  – швидкість газу в трубці 3

$\omega$  – кутова швидкість обертання трубки

Якщо підставити значення  $a$  в попереднє рівняння, тоді отримаємо, що:

$$M_k = \omega(r_2^2 - r_1^2)Q_m. \quad (2.5)$$

Витратоміру, зображений на рис 3. має одну важливу особливість – це незалежність потужності, яку витрачає електродвигун, від витрати  $Q_m$ . Це відбувається через те, що енергія, яку було витрачено при обертанні трубок 5, повертається при проході газу

через трубки 3. А потужність електродвигуна витрачається лише на подолання тертя в опорах або в гнбких з'єднаннях перетворювача з трубопроводом.

Коріолісові витратоміри вимірюють масову витрату газу, використовуючи ефект Коріоліса. Вони дуже точні та не залежать від змін густини, тиску або температури газу. Коріолісові витратоміри складаються з трубки, що вібрує. Коли газ проходить через трубку, він створює інерційні сили (сили Коріоліса), що змушують трубку деформуватися. Ця деформація пропорційна масовій витраті газу. Спеціальні сенсори вимірюють деформацію трубки, і ці дані використовуються для обчислення масової витрати. Коріолісові витратоміри застосовуються у промислових процесах, де необхідна висока точність вимірювання масової витрати. Вони використовуються для контролю процесів у нафтохімічній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості. Ці витратоміри відзначаються високою точністю і незалежністю від фізичних властивостей газу, але мають високу вартість і складну конструкцію.



Рис 4. Коріолісовий витратомір[5]

## Вихрові витратоміри

Вихровими називаються витратоміри, які влаштовані за принципом залежності частоти коливань тиску від витрати, що виникають у потоці в процесі вихроутворення або коливання струменя. Вони поділяються на три групи, суттєво відмінні одна від одної[18].

- Витратоміри, що мають у первинному перетворювачі нерухоме тіло, при обтіканні якого з обох його сторін поперемінно виникають зривні вихори, що створюють пульсації тиску[18].
- Витратоміри, у первинному перетворювачі яких потік закручується і, потрапляючи потім у розширену частину труби, прецесує, створюючи при цьому пульсації тиску[18].
- Витратоміри, у первинному перетворювачі яких струмінь, що витікає з отвору, здійснює автоколивання, створюючи при цьому пульсації тиску[18].

Термін «вихровий витратомір», строго кажучи, застосовується лише до приладів перших двох груп. Але однаковий осцилюючий характер зміни параметрів, що визначають рух потоку в перетворювачах витрати, дозволяє і витратоміри 3-ї групи розглядати разом з першими двома. Особливо близький характер процесів, що відбуваються у витратомірах 1-ї і 3-ї груп.

Вихрова трубка(рис 5.) є ключовим компонентом вихрового витратоміру, який використовується для вимірювання витрати рідини або газу. Основний принцип роботи вихрового витратоміру базується на ефекті Кармана, де в потоці за перешкодою (в даному випадку - за вихровою трубкою) утворюються вихори.

Коли рідина або газ проходять через трубку з встановленою в ній перешкодою, за цією перешкодою починають утворюватися чергуючі вихори. Частота утворення цих вихорів прямо пропорційна швидкості потоку рідини або газу. Вихрова трубка в цьому контексті створює необхідні умови для виникнення цих вихорів.

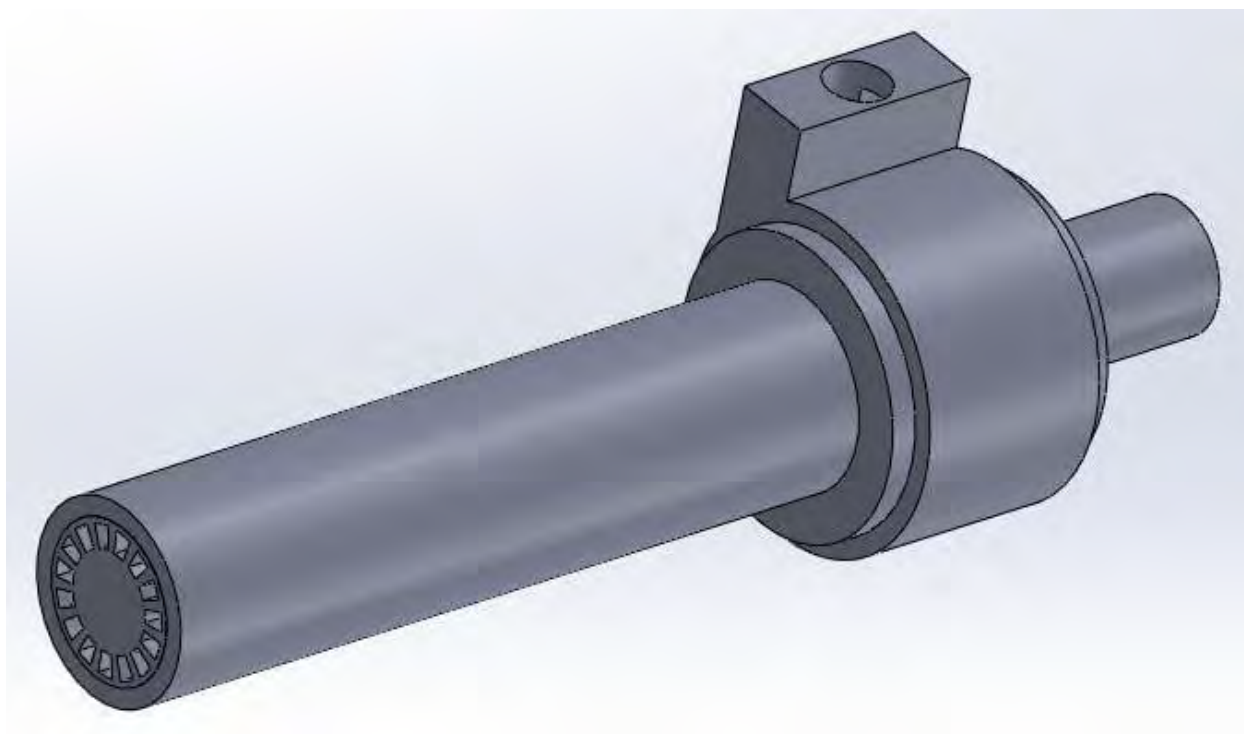


Рис 5. 3Д модель вихрової трубки

Для дослідження характеристик вихрових витратомірів поряд з числом Рейнольдса ( $Re$ ) використовується число або критерій Струхаля ( $Sh$ ), що характеризує періодичні процеси, пов'язані з рухом рідини або газу[18]. Цей критерій, що виникає при вивченні обтікання потоком повітря циліндра (струни), має вигляд:

$$Sh = f d v^{-1}, \quad (2.6)$$

де

$f$  — частота пульсацій тиску газу (або рідини) в результаті періодичного зриву вихорів;

$d$  — діаметр циліндра (характерний розмір);

$u$  — швидкість потоку.

Оскільки при постійності числа  $Sh$  частота  $f$  пропорційна швидкості  $u$ , вимірюючи цю частоту, можна судити про швидкість  $u$ , а отже, і про об'ємну витрату потоку[18].

Для отримання лінійної шкали вихрового витратоміра потрібно, щоб число  $St$  залишалось постійним у можливо більшому діапазоні чисел  $Re$ [11].

Іноді крім числа  $Sh$  використовують ще й число Россбі ( $Ro$ ) — відношення осьової і тангенціальної складових швидкості[11]:

$$Ro = \frac{v}{\omega d}, \quad (2.7)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість.

Числа  $Sh$  і  $Ro$  пов'язані залежністю:

$$Sh = \frac{f}{\omega Ro}, \quad (2.8)$$

з якої випливає, що  $Sh$  залишається постійним, якщо постійні число  $Ro$  і відношення  $f/\omega$ [11].

Роботу вихрових витратомірів можуть порушувати акустичні і вібраційні перешкоди, створювані різними джерелами: насосами і компресорами, місцевими опорами, завихрювачами, вібруючими трубами тощо. Якщо частота шкідливих пульсацій відрізняється від частоти вимірювального сигналу, то її вплив можна усунути за допомогою електричних фільтрів. Складніше усунути їх, якщо ці частоти збігаються. Іноді застосовують струєвипрямляч на вихідному патрубку перетворювача витрати. Для боротьби з перешкодами доцільно мати два перетворювачі (наприклад, два п'єзоелементи), включених протилежно і встановлених у точках, де пульсації корисного сигналу знаходяться в протифазі, а пульсаційні перешкоди у фазі. При цьому корисні сигнали підсилюються, а перешкоди значною мірою усуваються. Термоперетворювачі менш чутливі до перешкод, ніж перетворювачі тиску. Вібрації не впливають на їх показання, але механічно вони менш міцні.

Вихрові витратоміри мають багато переваг: відсутність рухомих частин, простота і надійність перетворювача витрати, незалежність показань від тиску і температури, великий діапазон вимірювання, що доходить у деяких випадках до 15-20 лінійності шкали, висока точність (похибка +0,5-1,5 %), частотний вимірювальний сигнал, стабільність показань, порівняна нескладність вимірювальної схеми, можливість отримання універсального градуювання[19]. До недоліків вихрових витратомірів відносяться значні втрати тиску, які досягають 30-50 кПа, і деякі обмеження можливості їх застосування: вони непридатні при малих швидкостях через труднощі вимірювання сигналу, що має малу частоту, і виготовляються лише для труб, які мають діаметри від 25 до 150-300 мм[19]. Застосування їх для великих труб ускладнено, а при дуже малих діаметрах відсутнє вихроутворення. Вони також не застосовуються при  $Re < 10^4$ . Багато конструкцій вихрових витратомірів непридатні для вимірювання забруднених і агресивних речовин, які можуть порушити роботу перетворювачів.

### **Кореляційні витратоміри**

Якщо за допомогою корелометра визначити точку максимальної ординати взаємної кореляційної функції двох випадково змінюваних параметрів потоку одного типу, у двох перетинах, розташованих на невеликій відстані  $L$  один від одного, то ця точка відповідатиме часу  $\tau_n$ , необхідному для переміщення потоку на зазначеній відстані. Знаючи площу поперечного перетину потоку  $S$  та його об'ємну витрату  $Q_o$ , можна визначити за формулою

$$Q_o = \frac{kSL}{\tau_n}, \quad (2.9)$$

де  $k$  — коефіцієнт, що враховує вплив профілю швидкостей, властивостей речовини та характеристик вимірювального пристрою.



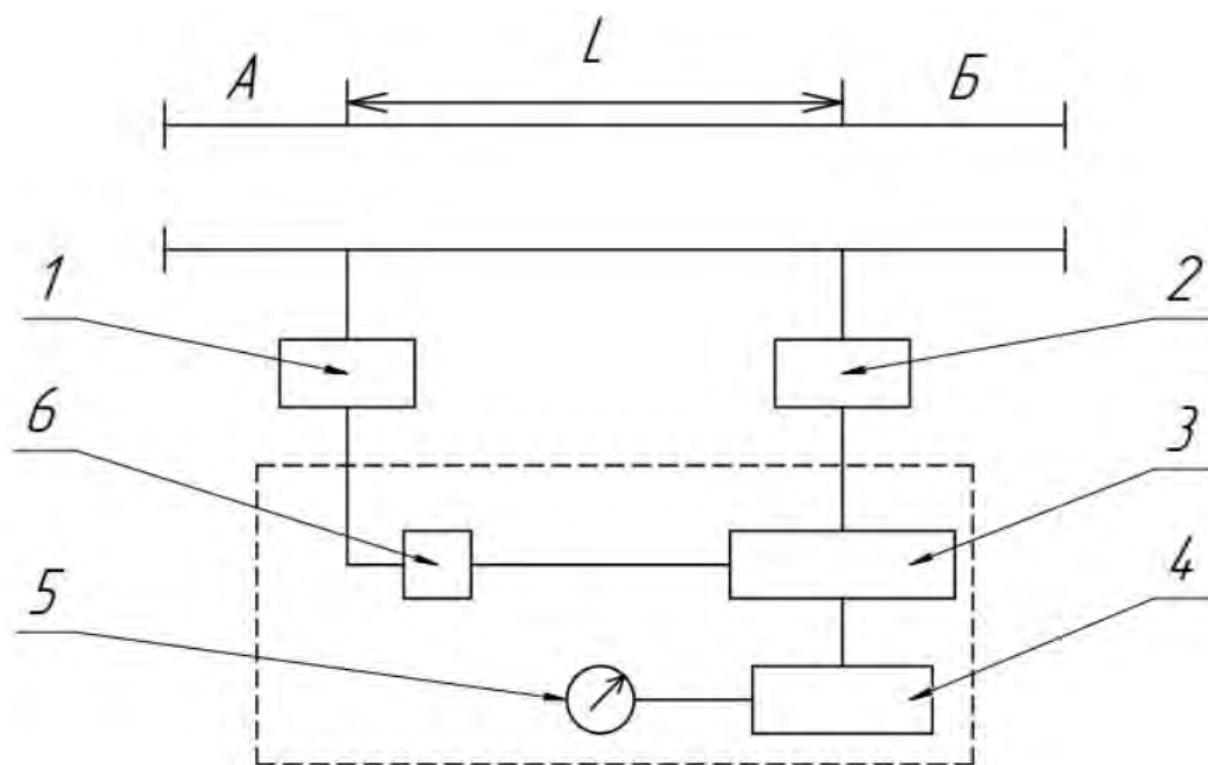


Рис 6. Схема кореляційного витратоміра

Принципова схема кореляційного витратоміра показана на рис.6. Зміна того чи іншого параметра потоку, наприклад концентрації окремих його фаз, сприймається у перетинах А і Б двома датчиками 1 і 2. Сигнали  $x(t)$  і  $y(t)$ , які генеруються цими датчиками. Хоча сигнали  $x(t)$  і  $y(t)$  мають випадковий характер, але завдяки відносно невеликій відстані  $L$  між перетинами А і Б, вони мають сильний кореляційний зв'язок. Форма сигналу  $x(t)$  передуює формі сигналу  $y(t)$  на час, необхідний для переміщення частинок потоку від перетину А до перетину Б. Для вимірювання цього часу використовується корелометр (див. рис. 1), що складається з блоків 3, 4, 6 і вимірювального приладу 5. Блок 6 перетворює сигнал  $x(t)$  у сигнал  $x(t-\tau)$ . Він має регулюючий пристрій, який дозволяє змінювати час затримки  $\tau$ . Блок 3 обчислює добуток сигналів  $x(t-\tau)$  і  $y(t)$ . Блок 4 інтегрує цей добуток і видає його середнє значення  $R_{xy(\tau)}$  за певний період часу.

### Роторні витратоміри

Роторні лічильники використовуються для вимірювання об'єму газу на середніх і малих витратах. Вони складаються з двох ротаторів, які обертаються під впливом

поток газу. Коли газ проходить через лічильник, він змушує обертатися ротори. Кількість обертів роторів пропорційна об'єму газу, що проходить через лічильник. Роторні лічильники оснащені механічними або електронними сенсорами, які рахують кількість обертів і перетворюють ці дані в електричні сигнали для подальшої обробки. Роторні лічильники широко використовуються для комерційного обліку газу у житлових та комерційних будівлях. Вони також застосовуються у невеликих промислових установках, де необхідне точне вимірювання витрат газу. Роторні лічильники відрізняються надійністю, простотою конструкції та тривалим терміном служби.



Рис 7. Роторний витратомір[2]

## 2.2 Датчики тиску і температури

Датчики тиску і температури є важливими компонентами для контролю параметрів газового потоку, що дозволяє забезпечити точність вимірювань та безпеку експлуатації системи.

### Датчики тиску

Датчики тиску є важливими компонентами систем вимірювання та контролю витрати природного газу. Вони використовуються для вимірювання розрідження, надлишкового й абсолютного тиску газу. Крім того, ці датчики здійснюють контроль температурних параметрів газу та відстежують значення тиску в реальному часі. Забезпечуючи точні та надійні вимірювання, датчики тиску допомагають забезпечити безпеку, ефективність та економічність систем транспортування і споживання природного газу.

У загальному випадку вимірювальним елементом датчиків тиску газу є п'єзорезистивна монолітна структура. Ця структура вбудована в приймач тиску, заповнений спеціальною рідиною і відділений від вимірюваного середовища розділовою мембраною. Конструкція датчиків тиску забезпечує високу точність та стабільність вимірювань, захищаючи вимірювальний елемент від агресивних впливів газового середовища. П'єзорезистивні елементи змінюють свій опір під впливом деформації, що дозволяє точно вимірювати тиск.

Принцип роботи датчиків тиску заснований на перетворенні фізичного тиску в електричний сигнал. Коли тиск прикладається до розділової мембрани, він передається через рідину до п'єзорезистивної структури. Відповідно до змін тиску, змінюється опір п'єзорезистивного елемента, що перетворюється в електричний сигнал. Цей сигнал обробляється електронними компонентами датчика і передається у вигляді вихідного сигналу, який може бути інтерпретований відповідними пристроями для моніторингу та контролю.

Датчики тиску широко використовуються в системах транспортування, розподілу та споживання природного газу. Вони є незамінними у газових магістралях для контролю тиску на різних етапах транспортування газу. У комунальному

господарстві датчики тиску допомагають забезпечити точний облік споживання газу в житлових та комерційних будівлях. Крім того, датчики тиску застосовуються в промисловості для контролю процесів, пов'язаних із використанням природного газу як енергетичного ресурсу.

Існує кілька основних видів датчиків тиску, які використовуються для вимірювання тиску природного газу. Види датчиків тиску розрізняють за методом вимірювання та за вимірювальною величиною. Спочатку розглянемо основні види, за методом вимірювання: абсолютні, відносні, диференціальні.

Абсолютні датчики тиску вимірюють тиск відносно абсолютного вакууму. Вони використовуються в ситуаціях, де необхідно точно знати абсолютне значення тиску природного газу, незалежно від змін атмосферного тиску. Ці датчики мають вбудовану вакуумну камеру, яка забезпечує порівняння вимірюваного тиску з абсолютним нулем. Коли тиск прикладається до мембрани датчика, вона деформується, викликаючи зміну електричного сигналу в п'єзорезистивному елементі. Абсолютні датчики тиску використовуються у наукових дослідженнях та промислових процесах, де потрібна висока точність вимірювань незалежно від змін атмосферного тиску. Вони також застосовуються у складних технологічних процесах газової промисловості, де необхідно контролювати абсолютні значення тиску.

Відносні датчики тиску вимірюють тиск відносно атмосферного тиску. Вони є найпоширенішими і використовуються в багатьох системах вимірювання та контролю тиску природного газу. Ці датчики мають отвір, який дозволяє атмосферному тиску впливати на одну сторону мембрани, тоді як вимірюваний тиск природного газу прикладається до іншої сторони. Різниця тисків викликає деформацію мембрани і зміну електричного сигналу в п'єзорезистивному елементі. Відносні датчики тиску широко використовуються у системах транспортування та розподілу природного газу, а також у комунальному господарстві для обліку споживання газу. Вони також застосовуються в промислових процесах, де необхідно контролювати тиск газу відносно навколишнього середовища.

Диференціальні датчики тиску вимірюють різницю між двома тисками природного газу. Вони використовуються для контролю перепаду тиску в системах,

що дозволяє визначати потік газу. Ці датчики мають дві камери для тиску, які прикладаються до обох сторін мембрани. Різниця тисків викликає деформацію мембрани, що впливає на п'єзорезистивний елемент і змінює його електричний сигнал. Диференціальні датчики тиску широко використовуються у газових магістралях для контролю перепаду тиску, що дозволяє ефективно керувати потоком природного газу. Вони також застосовуються у промислових процесах, де важливо знати перепад тиску для контролю технологічних параметрів.

Датчики тиску також розрізняють за вимірювальною величиною. Розглянемо наступні види: датчик тиску тензодатчика, ємнісний датчик тиску, п'єзоелектричний датчик тиску, датчик тиску газопровідності, резистивний датчик тиску, волоконно-оптичний датчик тиску.

Датчик тиску тензодадатчика – це датчик, який використовує зміну опору тензодатчика для вимірювання тиску, коли на тензодатчик прикладається тиск, його форма дещо змінюється, викликаючи зміну опору[22]. Для того, щоб зрозуміти як влаштований тензодатчик, візьмемо за приклад його найпростіший варіант, де чутливий елемент – тензорезистор. Основа роботи тензорезистора – закон Гука, який стверджує, що зміна електричного опору по відношенню до вихідного положення елемента пропорційна стисненню або подовженню сенсору. Визначимо коефіцієнт пропорційності, за даним принципом:

$$K = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R}{R}, \quad (2.10)$$

де

$K$  – коефіцієнт пропорційності;

$\Delta l$  – показник зміни довжини в ході деформації;

$l$  – довжина елемента, який вимірюється, у стані спокою;

$\Delta R$  – зміна показника опору при деформації;

$R$  – значення опору тензорезистора в нормальному положенні.

На практиці подовження та стиснення сенсору можна зобразити наступним чином(рис 8.):

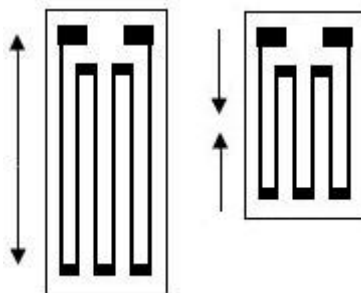


Рис 8. Принцип роботи тензорезисторів[26]

Ємнісні датчики тиску – це такі датчики, в яких тим чи іншим способом вимірюється ємність між двома електродами[24]. Принцип його роботи заснований на деформації діафрагми, яка утворює один із двох конденсаторних електродів. Коли тиск змінюється, діафрагма вигинається, змінюючи відстань між електродами, що призводить до зміни ємності, яка вимірюється і перетворюється в електричний сигнал, пропорційний тиску. Отже, конденсатор являє собою два паралельно розміщених електрода, розділених невеликим зазором. В такому випадку визначимо ємність:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (2.11)$$

де

$\varepsilon_r$  - діелектрична константа матеріалу між елктродами (дорівнює 1 для вакууму);

$\varepsilon_0$  - електрична константа (дорівнює  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ );

A - площа електродів;

$d$  - відстань між електродами.

Є два способи змінювати ємність між електродами: змінити площу електродів та відстань. Найпростіше – керувати відстанню від одного електрода до іншого. Зазвичай один електрод - це діафрагма, чутлива до тиску, а другий - фіксована пластина[25].

П'єзоелектричний датчик тиску – це такий датчик тиску, який вимірює тиск, за допомогою п'єзоелектричного ефекту. Принцип роботи такого датчика полягає в тому, що певні матеріали, такі як кристали кварцу або спеціальні кераміки, генерують електричний заряд у відповідь на механічну деформацію або зміну тиску. Коли до таких матеріалів прикладається тиск, виникає деформація, яка викликає появу електричного заряду, пропорційного до величини прикладеного тиску.

Датчик тиску газопровідності визначає тиск газу шляхом вимірювання теплопровідності газу[22]. Принцип роботи датчика тиску газопровідності базується на вимірюванні електричної провідності газу, яка змінюється під впливом тиску. У таких датчиках використовується електродна система, розташована всередині газопроводу. Коли тиск газу змінюється, змінюється й провідність газу між електродами. Ця зміна провідності перетворюється в електричний сигнал, який є пропорційним до величини тиску. Цей сигнал потім обробляється для відображення значення тиску на відповідному пристрої.

Датчики групи резистивних належать до числа параметричних і зазвичай діляться на три підгрупи: контактні, реостатні перетворювачі та тензотранзистори [24]. Резистивні датчики тиску працюють на основі зміни електричного опору в матеріалі під дією механічної деформації, викликані тиском. У контактних резистивних датчиках механічний контакт змінює опір, тоді як у реостатних перетворювачах рухливий елемент змінює положення ковзного контакту на резистивному елементі, змінюючи опір. Тензорезистори, або тензодатчики,

використовують матеріали з п'єзорезистивними властивостями, які змінюють свій опір під дією деформації.

Волоконно-оптичний датчик тиску працює на принципі зміни властивостей світла, що проходить через оптичне волокно, під впливом тиску. У таких датчиках світловий сигнал проходить через оптичне волокно, що зазнає деформації під дією тиску. Ця деформація змінює параметри світла, такі як інтенсивність, фаза або частота, що проходить через волокно. Відповідні зміни світлового сигналу вимірюються і перетворюються в електричний сигнал, пропорційний до величини тиску. Волоконно-оптичні датчики тиску відзначаються високою чутливістю, стійкістю до електромагнітних завад та здатністю працювати в екстремальних умовах, таких як високі температури або агресивні середовища.

### **Датчики температури**

Датчики температури є важливою складовою частиною комплексів вимірювання витрати природного газу. Вони використовуються для вимірювання температурних параметрів газу, що проходить через систему. Точні дані про температуру дозволяють коректно розраховувати об'ємну витрату газу за різних умов температури і тиску.

Датчики температури використовуються у всіх галузях, де необхідно контролювати температуру газу. У комплексах вимірювання витрати природного газу вони використовуються для точного вимірювання температури газу в системі та коректної компенсації впливу температури на об'ємну витрату газу.

Розглянемо основні види датчиків температури, а саме: термістори, термопари та термоперетворювачі опору[28].

Термістор - лінійний або нелінійний електричний резистор, опір якого значно змінюється залежно від температури[27]. Принцип роботи термістора базується на зміні його електричного опору у відповідь на зміну температури. Термістори бувають двох основних типів: з позитивним температурним коефіцієнтом (РТС), у яких опір



зростає з підвищенням температури, і з негативним температурним коефіцієнтом (NTC), у яких опір зменшується при підвищенні температури. Ця зміна опору дозволяє точно вимірювати температуру або контролювати температуру в різних електронних пристроях. Термістори використовуються в термометрах, температурних контролерах, і схемах захисту від перегріву завдяки їх високій чутливості до температурних змін і швидкому часу відгуку.

Термопара – електричне з'єднання з двох різнорідних провідників – термоелектродов, кінці яких сполучені зваркою або спайкою[27]. Принцип роботи термопари базується на термоелектричному ефекті, або ефекті Зеебека, який полягає в тому, що при нагріванні одного спаю термопари і підтриманні іншого спаю при нижчій температурі, виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна різниці температур між двома спаями. Ця ЕРС створює електричний струм, який може бути виміряний, і за допомогою калібрувальних таблиць або формул визначається температура вимірюваного середовища. Термопари широко використовуються завдяки їхній здатності вимірювати широкий діапазон температур, міцності, швидкому відгуку і відносно простій конструкції.

Термоперетворювач опору (RTD, Resistance Temperature Detector) — це датчик, який використовується для вимірювання температури шляхом зміни електричного опору матеріалу при зміні його температури. Термоперетворювачі опору призначені для вимірювання температури середовищ в різних агрегатних станах (газо- і рідкоподібних, твердих сипучих середовищах) в великому діапазоні  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ [29].

### **2.3 Системи збору і обробки даних**

Системи збору і обробки даних є центральною ланкою комплексів вимірювання витрати природного газу, відповідальними за збір, аналіз і передачу даних, отриманих від витратомірів, датчиків тиску і температури. Ці системи складаються з контролерів, програмного забезпечення для аналізу даних та інтерфейсів передачі

даних, таких як Ethernet, Modbus і Wireless. Контролери здійснюють безпосереднє зчитування даних з вимірювальних пристроїв, забезпечуючи їхню первинну обробку та передачу до центральної системи. Програмне забезпечення для аналізу даних відповідає за обробку і аналіз отриманої інформації, що дозволяє точно визначати витрату газу та інші параметри.

Системи збору даних виконують ряд важливих функцій. Вони збирають дані з усіх вимірювальних пристроїв, обробляючи і аналізуючи їх для визначення поточної витрати газу. Це включає розрахунки, що базуються на показниках витратомірів, тиску і температури, забезпечуючи комплексний підхід до моніторингу. Крім того, системи зберігають історичні дані для подальшого аналізу, що дозволяє вивчати довгострокові тенденції і виявляти можливі аномалії або відхилення в роботі системи.

Також важливою функцією є передача даних на віддалені сервери або до диспетчерських центрів, що дозволяє здійснювати моніторинг і управління системою в режимі реального часу. Це забезпечує можливість швидкого реагування на будь-які зміни чи неполадки, підвищуючи загальну ефективність та безпеку системи. Інтерфейси передачі даних забезпечують надійну і швидку передачу інформації, що є критичним для своєчасного прийняття рішень та підтримання стабільної роботи системи.

Таким чином, системи збору і обробки даних грають вирішальну роль у забезпеченні точного і надійного контролю за витратою природного газу. Вони забезпечують комплексний підхід до моніторингу, обробки і аналізу даних, а також зберігання і передачі інформації, що дозволяє ефективно керувати складними технологічними процесами і підтримувати їх безперебійну роботу.

Отже, у висновок до цього розділу можна сказати, що основними компонентами комплексу вимірювання витрати природного газу є витратомір, датчики тиску та температури, система збору та обробка даних. Для кожного приладу існують різні типи, які так чи інакше відрізняються один від одного. Ми ознайомилися із основними різновидами таких приладів, описали принцип роботи, їхні головні переваги та недоліки.

### **3. Принцип роботи комплексів вимірювання витрати природного газу**

#### **3.1 Етапи вимірювального процесу**

Комплекси вимірювання витрати природного газу виконують декілька основних етапів для забезпечення точних і надійних результатів.

Підготовка газу до вимірювання включає кілька важливих етапів, які забезпечують точність і надійність результатів. Спочатку газ проходить через фільтри, які видаляють тверді частки, пил і інші механічні домішки, що можуть вплинути на точність вимірювань або пошкодити обладнання. Потім відбувається видалення надлишкової вологи за допомогою осушувачів, щоб уникнути впливу вологи на результати вимірювань і корозії обладнання. Далі здійснюється стабілізація температури газу за допомогою теплообмінників або термостатів для запобігання впливу температурних коливань на вимірювання.

Також важливо знизити і стабілізувати тиск газу до потрібного рівня за допомогою редукторів і стабілізаторів тиску. Для багатокomпонентних газів забезпечується рівномірний склад газової суміші за допомогою змішувачів і гомогенізаторів. У разі необхідності видаляються специфічні хімічні домішки за допомогою адсорбентів, хемсорбентів або каталізаторів. Завершальним етапом є калібрування обладнання, що включає перевірку та налаштування вимірювальних приладів з використанням стандартних газових сумішей для забезпечення точних результатів. Усі ці кроки критично важливі для забезпечення надійності та точності вимірювань, особливо у промислових додатках, наукових дослідженнях та екологічному моніторингу.

Вимірювання витрати газу залежить від типу витратоміра, який може використовувати ультразвукові хвилі, обертання турбіни, зміну температури або коріолісовий ефект. Датчики тиску і температури постійно моніторять параметри газу і передають ці дані в систему збору та обробки даних.

Контролери системи збирають дані з витратомірів та датчиків, враховуючи температуру, тиск і склад газу для корекції показників витратомірів і отримання точних результатів. Системи обробки даних аналізують отриману інформацію, визначають витрату газу і зберігають результати

Дані можуть бути оброблені на місці для оперативного контролю і управління системою. Також вони передаються на центральні сервери або диспетчерські центри для подальшого аналізу і моніторингу.

### **3.2 Повірка вимірювального комплексу**

Повірка вимірювальних комплексів — це процедура перевірки і підтвердження точності роботи вимірювальних приладів, яка проводиться для забезпечення їх відповідності встановленим стандартам і нормативам. Вимірювальні комплекси, що включають витратоміри, датчики тиску і температури, повинні регулярно проходити повірку для забезпечення точних і надійних вимірювань. Процес повірки включає калібрування приладів, тестування їх функціональності та виявлення будь-яких відхилень від норми. Результати повірки дозволяють вчасно виявити та усунути неточності в роботі вимірювального обладнання, забезпечуючи достовірність зібраних даних і безпеку технологічних процесів. Повірка є важливою складовою підтримки високого рівня якості вимірювань і дотримання вимог регуляторних органів.

Для комплексів вимірювальних міжповірочний інтервал встановлений аналогічно, як і для категорії 41 «Лічильники газу та пристрої перетворення об'єму (використовуються для проведення розрахунків за поставлений та/або спожитий природний газ)» – 2 роки (для класу 1,0)[30].

Після того, як була пройдена періодична повірка комплексу, отримані результати обов'язково повинні бути занесені у паспорт даного комплексу.

### **3.3 Вплив умов експлуатації на точність вимірювань**

Умови експлуатації можуть суттєво впливати на точність вимірювань витрати природного газу. Основні фактори, що впливають на точність:

#### **Температура**

Зміни температури газу можуть впливати на фізичні властивості газу, такі як густина і в'язкість, що в свою чергу може впливати на точність вимірювань.

Необхідність врахування температурних поправок для коректної інтерпретації даних.

### **Тиск**

Високий або низький тиск може впливати на роботу витратомірів і точність вимірювань. Наприклад, зміни тиску можуть впливати на вихрові витратоміри або витратоміри диференціального тиску.

Використання датчиків тиску для компенсації і корекції вимірювань.

### **Склад газу**

Домішки або зміни в складі газу можуть впливати на точність вимірювань, особливо для ультразвукових і теплових витратомірів.

Необхідність регулярного моніторингу складу газу і відповідної корекції вимірювань.

### **Механічні впливи**

Вібрації, удари або механічні пошкодження можуть впливати на точність роботи витратомірів, особливо для витратомірів з рухомими частинами, таких як турбінні або ротаційні витратоміри.

Встановлення антивібраційних кріплень і регулярний технічний огляд для мінімізації механічних впливів.

### **Забруднення**

Накопичення бруду, конденсату або інших забруднень у трубопроводах і на поверхнях витратомірів може знижувати точність вимірювань.

Регулярне очищення і обслуговування системи для підтримки її в належному стані.

Отже, у висновок до розділу про принцип роботи комплексів вимірювання витрати природного газу, можна зазначити, що основними етапами вимірювального процесу є підготовка до вимірювання, збір даних, аналіз та обробка отриманих даних, запис результатів і на кінець підготовка звітів та аналізів. Кожні два роки проходить перевірка

комплексу. Повірка проводиться для забезпечення точності та надійності вимірювань. Точність вимірювання витрати природного газу може змінюватися, адже на точність впливають такі показники як: температура, тиск, склад газу, механічні впливи та забруднення.

## 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ КОМПЛЕКСОМ

### 4.1. Природа технологічного об'єкту контролю (ОК) і процеси, що протікають в ньому

Технологічний об'єкт контролю (ОК) в автоматичній системі контролю витoku газу на газорозподільних станціях - це сама станція, включаючи всі пристрої, системи та процеси, пов'язані з розподілом та контролем газу. На прикладі такої системи можна виділити деякі елементи та процеси.

- **Датчики витoku газу.** Ці пристрої розташовані на різних точках станції і призначені для виявлення витoku газу. Вони постійно моніторять рівень газу в навколишньому середовищі.

- **Аналізатори газу.** Ці пристрої вимірюють концентрацію газів у повітрі, а також можуть виявляти наявність ідентифікованих хімічних сполук, які можуть вказувати на потенційний витік.

- **Клапани безпеки та засувки.** Ці пристрої можуть автоматично закриватися у разі виявлення витoku газу, щоб зупинити подачу газу та запобігти подальшому витoku.

- **Системи вентиляції.** Вони можуть бути активовані для видалення газу з небезпечної зони та забезпечення безпечних умов для персоналу.

- **Системи сповіщення та аварійного відключення.** Якщо виявляється витік газу, система може автоматично надсилати сигнали аварійного сповіщення персоналу та надсилати команди на відключення окремих пристроїв або всієї станції.

- **Системи моніторингу і управління.** Ці системи відповідають за збір та аналіз даних в реальному часі, прийняття рішень на основі цих даних та керування всією автоматизованою системою контролю витoku газу.

## **4.2. Регульовані параметри, збурення та можливі дії керування**

В контексті автоматичної системи контролю витоку газу на газорозподільчих станціях можна виділити наступні регульовані параметри, збурення та можливі дії керування.

### **Регульовані параметри**

- Рівень газу в атмосфері. Це основний параметр, який регулюється в системі. Вимірюється концентрація газу в повітрі та регулюється в межах безпечних значень.
- Робота клапанів безпеки та засувок. Стан відкриття/закриття клапанів безпеки та засувок може регулюватися для контролю потоку газу.

### **Збурення**

- Витік газу. Найбільш очевидне збурення - витік газу з газорозподільчих пристроїв або трубопроводів.
- Технічні несправності. Збурення може виникнути внаслідок несправностей у пристроях вимірювання, клапанах або інших частинах системи контролю.
- Аварійні ситуації. Наприклад, пожежа чи інші аварійні стани, які можуть вплинути на роботу системи.

### **Можливі дії керування**

- Автоматичне відключення клапанів та засувок. В разі виявлення витоку газу можуть бути автоматично відключені клапани та засувки, щоб зупинити потік газу.
- Активація вентиляційних систем. Системи вентиляції можуть бути активовані для видалення газу з небезпечної зони.
- Відправлення аварійних сигналів та повідомлень. Автоматична система може відправляти сигнали аварійних повідомлень персоналу або екстреним службам для прийняття негайних заходів.



### 4.3. Структурна схема автоматизованої системи контролю потоку газу

Структурна схема автоматизованої системи контролю потоку газу є важливим інструментом в проектуванні, розробці та експлуатації систем контролю потоку газу. Вона відображає структуру та взаємозв'язки компонентів системи і графічно представляє їхнє функціональне призначення. Основна мета структурної схеми полягає у забезпеченні зрозумілості і чіткості всіх елементів та процесів системи. Вона виконує наступні функції.

1. Визначення компонентів системи. Структурна схема ідентифікує всі компоненти, що входять до складу системи контролю потоку газу, включаючи датчики, контролери, пристрої реєстрації даних, системи оповіщення та інші елементи.
2. Показ розміщення компонентів. Вона дозволяє визначити фізичне розташування кожного компонента в системі. Це допомагає при плануванні монтажу та розкладанні обладнання для оптимальної ефективності.
3. Опис зв'язків і взаємодії. Структурна схема показує взаємозв'язки між компонентами, включаючи передачу даних, керування та спрямованість сигналів. Це допомагає зрозуміти, як кожен елемент взаємодіє з іншими в системі.
4. Організація керування. Вона допомагає визначити структуру керування системою, включаючи блоки керування, логіку роботи та реакцію на різні сценарії та події.
5. Відлагодження і обслуговування. Структурна схема спрощує процес відлагодження, ремонту та обслуговування системи. Завдяки чіткому уявленню про структуру системи, технічний персонал може швидше і ефективніше вирішувати проблеми та здійснювати планове обслуговування.
6. Документація. Вона служить важливим джерелом інформації для інженерів, техніків та інших зацікавлених сторін. Документована структурна схема дозволяє зберігати і передавати знання про систему з покоління в покоління.

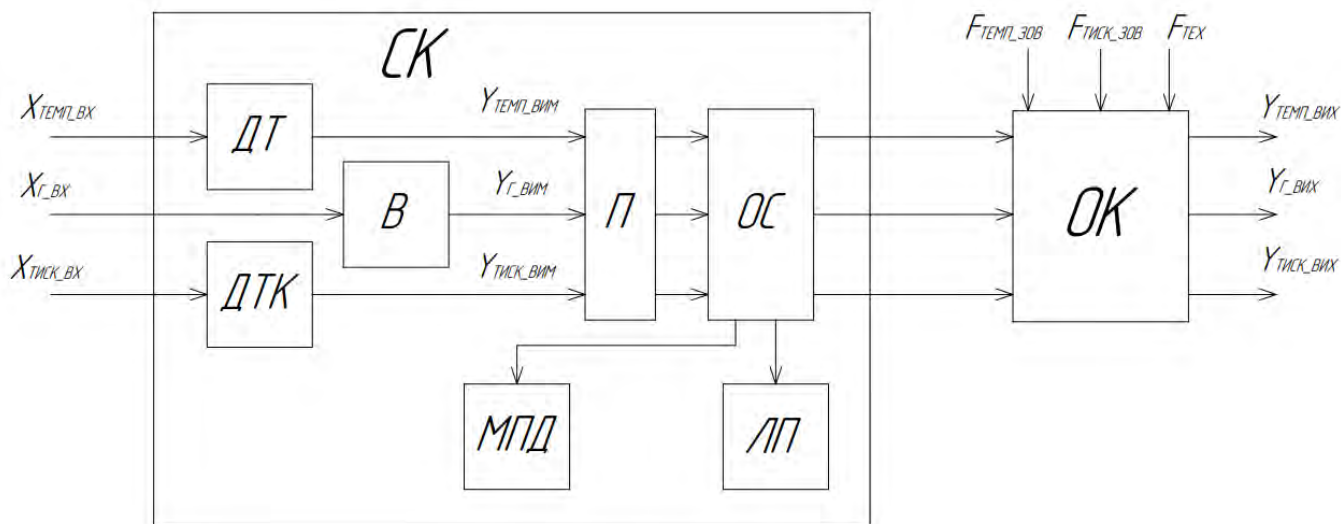


Рис 9. Структурна схема автоматизованої системи контролю потоку газу

На Рисунку 9 можемо побачити структурну схему керування автоматизованої системи контролю потоку газу на газорозподільчих станціях, яка включає вимірювальні прилади тиску та газові детектори, системи моніторингу та управління, системи вентиляції, аварійні системи сповіщення та відключення, а також контролери (логічні контролери, мікроконтролери), які керують цими компонентами.

$X_{Г_ВХ}$ ,  $X_{ТЕМП_ВХ}$ ,  $X_{ТИСК_ВХ}$  – вхідні значення, які надходять в систему контролю (СК), першочергово вхідне значення об'єму газу  $X_{Г_ВХ}$  потрапляє до витратоміру (В), який вимірює газ що прийшов. Одночасно з цим надходять значення  $X_{ТЕМП_ВХ}$ ,  $X_{ТИСК_ВХ}$  на датчики температури(ДТ) та тиску(ДТК) відповідно. Далі отримуємо виміряні значення  $Y_{Г_ВИМ}$ ,  $Y_{ТЕМП_ВИМ}$ ,  $Y_{ТИСК_ВИМ}$ , які надходять до перетворювача (П), а з перетворювача на обчислювальну систему (ОС). З ОС дані надходять до МПД - модулю передачі даних (може бути дистанційною також), ЛП - локальна пам'ять, в якій відбувається збереження даних та на об'єкт контролю (ОК) безпосередньо, де на дані впливають зовнішні параметри, що спричиняють різні зміни (зовнішні температури, тиск та різні технічні впливи), в результаті маємо вихідне значення кожного з параметрів.

Отже, об'єктом контролю автоматизованої системи контролю потоку газу. Аналізуючи структурну схему керування автоматизованої системи контролю витoku газу на газорозподільчих станціях, можна зробити декілька висновків. Перш за все, така система є складною та інтегрованою, включаючи в себе різноманітні компоненти, такі як вимірювальні прилади, перетворювачі, сховища та інші системи.

Використання таких систем дозволяє автоматизувати процес контролю потоку газу, забезпечуючи швидку реакцію на потенційно небезпечні ситуації. Крім того, наявність контролерів дозволяє координацію роботи всіх компонентів системи та прийняття ефективних керуючих рішень. Однак важливо враховувати, що успішна робота системи контролю потоку газу значно залежить від правильного проектування, налагодження та підтримки цих компонентів. Також важливо постійно вдосконалювати систему з урахуванням нових технологій та вимог безпеки, щоб забезпечити максимальний рівень безпеки та ефективності управління.

#### **4.4. Розрахунок загальної точності комплексу**

У даному розділі розрахуємо загальне значення точності усієї системи вимірювання. Для того, щоб виконати цей розрахунок необхідно мати значення точності кожного складового компонента системи, у даному випадку це витратомір, датчик тиску та температури, а також обчислювальної системи (обчислювального ядра на базі контролера).

Точність - це показник, який демонструє те, наскільки результат вимірювання або обчислення наближений до істинного значення. Відносна точність (похибка) часто виражається у відсотках від значення, яке піддається вимірювання.

У даному випадку система включає декілька етапів вимірювання та обчислення і кожен пристрій на етапі має власний показник точності (похибки) і остаточний результат буде залежати від значення кожної з них.

Визначення загальної точності системи є важливим оскільки:

1) це важливий параметр забезпечення якості виконання процесів - висока точність необхідна для забезпечення якості виконання різних процесів, відповідно вимірювання з низькою або недостатньою точністю може призвести до помилок у

виконанні технологічних процесів, порушення пропорцій складових сумішей чи рідин тощо;

2) в певних випадках точність системи є прямим показником забезпечення належного рівня безпеки, наприклад в медицині, хімічній промисловості, авіаційних системах та інших;

3) забезпечення оптимального рівня точності вимірювання дозволяє оптимізувати процеси, при цьому забезпечуючи зниження витрат та підвищує ефективність використання ресурсів та матеріалів;

4) також важливим є забезпечення точності обчислювальної системи, так як ці дані представляються для оператора, і він може приймати відповідні рішення щодо виконання процесів або якості їх виконання, які ґрунтуються на цих показниках.

Також для забезпечення оптимального рівня точності вимірювання застосовуються методи калібрування.

Якщо похибки компонентів незалежні, то можна використовувати розрахунок кореневої суми квадратів для визначення загальної похибки системи. Загальний вираз має наступний вигляд:

$$\varepsilon_{\text{загал}} = \sqrt{\varepsilon^2_1 + \varepsilon^2_2 + \varepsilon^2_3 + \dots + \varepsilon^2_n}, \quad (4.1)$$

де

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n$  - значення точності (похибки) вимірювання або обчислення окремих компонентів.

Тому будемо мати наступні складові виразу:

- витратомір з похибкою  $\varepsilon_{\text{витр.}}$ ;
- датчик тиску з похибкою  $\varepsilon_{\text{тиск.}}$ ;
- датчик температури з похибкою  $\varepsilon_{\text{темп.}}$ ;
- точність (похибка) обчислювальної системи  $\varepsilon_{\text{обч. сист.}}$ .

Відповідно будемо мати наступний вираз

$$\varepsilon_{\text{загал}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{витр}}^2 + \varepsilon_{\text{тиск}}^2 + \varepsilon_{\text{темп}}^2 + \varepsilon_{\text{обч.сист.}}^2} . \quad (4.2)$$

Визначимо похибки складових компонентів(для датчиків тиску та температури візьмемо найпоширеніші значення похибки):

- витратомір  $\pm 1\%$  від показання вимірювання[31];
- датчик тиску  $\pm 0,25\%$  від показання вимірювання;
- датчик температури  $\pm 0,5\%$  від показання;
- обчислювальна система  $\pm 0,1\%$ .

Для того, щоб виконати розрахунок правильно показник точності датчика температури взято у відсотках, а не в градусах Цельсія.

Підставляємо визначені показники у формулу. Відповідно отримуємо наступний вираз:

$$\varepsilon_{\text{загал}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{витр}}^2 + \varepsilon_{\text{тиск}}^2 + \varepsilon_{\text{темп}}^2 + \varepsilon_{\text{обч.сист.}}^2} = \sqrt{1^2 + 0,25^2 + 0,5^2 + 0,1^2} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{\text{загал}} = \sqrt{1^2 + 0,25^2 + 0,5^2 + 0,1^2} = \sqrt{1 + 0,0625 + 0,25 + 0,01} = \sqrt{1,3225} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{\text{загал}} = \sqrt{1,3225} = 1,15\% . \quad (4.5)$$

Згідно розрахунку можна зазначити, що загальна похибка вимірювального комплексу становить приблизно  $1,15\%$ . Це значення вказує на те, наскільки точним є остаточний результат вимірювання усієї системи враховуючи похибки окремих її складових.

Отриманий показник загальної точності системи є прийнятим для більшості промислових та інших застосувань. Але остаточний висновок завжди залежить від конкретних вимог галузі, де такий комплекс може застосовуватися.

## 4.5 Програма обчислення даних вимірювального комплексу

Далі перейдемо до реалізації роботи обчислювальної системи.

Для імплементаційної частини було обрано мову програмування Python. Python варто обирати для розробки обчислювальних програм через його простий і зрозумілий синтаксис, який робить код легким для написання і читання. Завдяки великій кількості бібліотек для наукових і інженерних задач, Python дозволяє швидко і ефективно виконувати складні обчислення. Він також сприяє швидкій розробці та тестуванню програм, що робить його ідеальним вибором для подібних завдань.

Принцип роботи програми такий, що обчислювальна система буде отримувати вихідний сигнал із трьох приладів, а саме витратоміру, датчиків тиску та температури. Перед тим як починати розробку програми розберемося із тим, які є найрозповсюдженіші вихідні сигнали у витратоміра.

**Аналоговий сигнал струму 4...20мА.** Це один з найпоширеніших типів сигналів, який використовується у промисловій автоматизації для передачі даних про вимірювання. Сигнал 4...20мА забезпечує надійну передачу даних на великі відстані і стійкий до електромагнітних завад. Діапазон 4-20 мА дозволяє системі розпізнавати обрив дроту, оскільки значення струму нижче 4 мА сигналізує про несправність. У витратомірі цей сигнал пропорційно змінюється в залежності від виміряного параметру, наприклад, витрати газу.

**Частотні або імпульсні сигнали.** Цей тип сигналу використовується для передачі даних про витрату шляхом генерації імпульсів з певною частотою. Кожен імпульс відповідає певному об'єму рідини або газу, що пройшов через витратомір. Наприклад, один імпульс може відповідати 0,01 кубічного метра газу. Частота цих імпульсів може варіюватися залежно від швидкості потоку, що дозволяє точно вимірювати витрату за короткий період часу. Імпульсні сигнали часто використовуються у системах, де потрібна висока точність і швидка реакція на зміну витрат.

**Цифровий сигнал із протоколами HART, RS 485.** Цифрові протоколи передачі даних, такі як HART (Highway Addressable Remote Transducer) і RS 485, використовуються для двонаправленої комунікації між витратоміром і контролером або іншим обладнанням. Стандарт HART розширює аналоговий сигнал від 4 до 20 мА

змодульованою цифровою передачею сигналу[33]. RS-485 використовується для обміну даними між декількома пристроями по одній двопровідній лінії зв'язку (витої пари) у напівдуплексному режимі[34]. Передача здійснюється тільки в одному напрямку. Під час передачі даних прийом неможливий. Для того, щоб прийняти дані, необхідно переключити приймач у режим прийому.

Отже, нехай в програмі, витратомір матиме імпульсний вихідний сигнал. Один імпульс дорівнюватиме  $0,01 \text{ м}^3$ . Формулу для розрахунку миттєвої об'ємної витрати газу можна записати наступним чином:

$$Q_v = \frac{V}{\Delta t}, \quad (4.6)$$

де

$V$  – об'єм газу, що відповідає одному імпульсу ( $\text{м}^3$ );

$\Delta t$  – час між двома послідовними імпульсами (с).

Також наша обчислювальна система повинна розраховувати значення масової витрати газу. Оскільки об'єм газу може змінюватися від температури або тиску, тоді як маса залишається постійною, давайте також будемо визначати масову витрату. Масова витрата газу визначається як добуток об'ємної витрати на густину газу. Це можна записати формулою:

$$Q_m = Q_v \rho. \quad (4.7)$$

Далі потрібно розрахувати густину природного газу. Для цього розрахуємо молярну масу природного газу за формулою:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i, \quad (4.8)$$

де

$n$  – кількість компонентів природного газу;

$\mu_i$  – молярна маса компоненту(дивитися таблицю 1);

$r_i$  – об'ємна частка цього ж компоненту.

Таблиця 1. – Молярна маса та об'ємна частка компонентів природного газу[35]

Компонент	Молярна маса, кг/кмоль	Об'ємна частка
Метан	16,04	0,85
Етан	30,07	0,1
Пропан	44,10	0,02
Бутан	58,12	0,01
Пентан	72,15	0,0005
Азот	28,01	0,01
Вуглекислий газ	44,01	0,005

Розрахуємо молярну масу природного газу, беручи дані про молярну масу та об'ємну часту з таблиці 1.

$$\mu = (0.85 \times 16.04) + (0.10 \times 30.07) + (0.02 \times 44.10) + (0.01 \times 58.12) + (0.005 \times 72.15) + (0.01 \times 28.01) + (0.005 \times 44.01)$$

$$\mu = 13.634 + 3.007 + 0.882 + 0.5812 + 0.36075 + 0.2801 + 0.22005$$

$$\mu = 18.9651 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}. \quad (4.9)$$

Далі знайдемо індивідуальну газову сталу, використовуючи формулу:

$$R_i = \frac{R}{\mu}, \quad (4.10)$$



де  $R$  – універсальна газова стала, що дорівнює  $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

Якщо перевести універсальну газову сталу в СІ отримаємо  $8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Підставимо значення:

$$R_i = \frac{8,31 \cdot 10^3}{18,9651} = 438,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (4.11)$$

Тепер скористаємось ідеальним газовим рівнянням, яке виражає зв'язок між тиском ( $P$ ), об'ємом ( $V$ ), кількістю речовини ( $n$ ) та температурою ( $T$ ):

$$PV = nRT. \quad (4.12)$$

Ми можемо переписати це рівняння для визначення об'єму, який займає один кіломоль газу:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(1 \text{ моль}) \times 438,2 \times T}{P} = \frac{438,2 \times T}{P}. \quad (4.13)$$

Отримавши рівняння для знаходження об'єму, який займає один кіломоль газу, можна визначити густину природного газу:

$$\rho = \frac{P\mu}{438,2 \times T} = \frac{18,965 \times P}{438,2 \times T}. \quad (4.14)$$

Відповідно для того, щоб знайти масову витрату газу потрібно

Розрахувавши густину природного газу, можемо сформулювати формулу, за якою обчислювальна система буде визначати масову витрату газу:

$$Q_m = \frac{Q_V \times P \times 18,965}{T \times 438,2}, \quad (4.15)$$

де

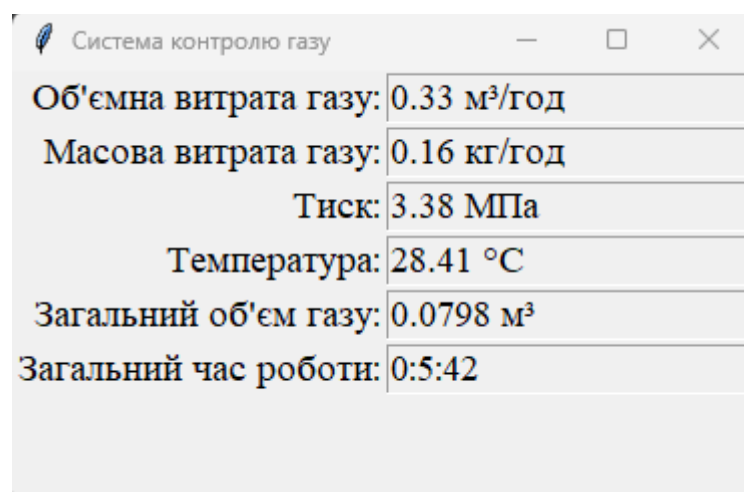
$Q_V$  – об’ємна витрата природного газу;

$P$  – значення тиску отримане з датчику тиску;

$T$  – значення температури отримане з датчику температури.

Отже, напишемо класи, які будуть імітувати роботу витратоміру, датчика тиску та температури. Клас витратоміру буде надсилати імпульси класу обчислювача з інтервалом від 0,01 до 0,2 секунд. Клас датчику температури буде кожної секунди надсилати дані про температуру. Ідентично буде працювати і датчик тиску. Варто зазначити, що класи датчиків температури і тиску будуть генерувати середні робочі значення випадковим чином, щоб імітувати роботу датчиків.

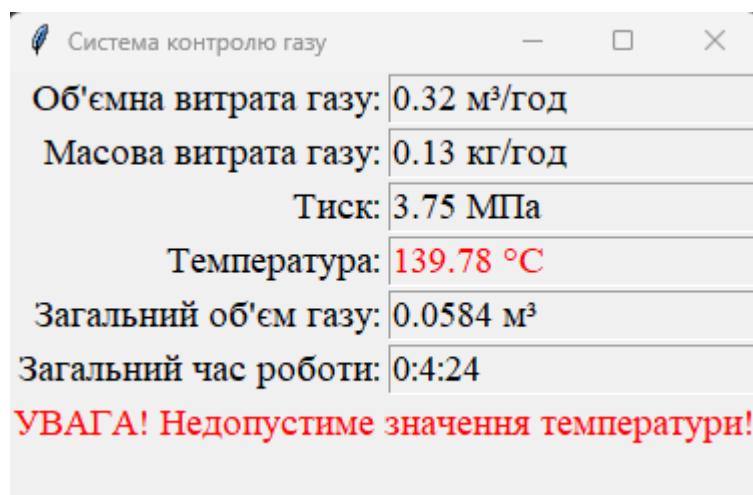
Далі створюємо клас для самої обчислювальної системи. Цей клас буде отримувати дані з датчиків, та вираховувати наступні параметри: об’ємну витрату газу, масову витрату, тиск, температуру, загальний об’єм газу та загальний час роботи системи. На рисунку 10 можемо спостерігати модальне вікно з результатами роботи програми.



Система контролю газу	
Об’ємна витрата газу:	0.33 м³/год
Масова витрата газу:	0.16 кг/год
Тиск:	3.38 МПа
Температура:	28.41 °C
Загальний об’єм газу:	0.0798 м³
Загальний час роботи:	0:5:42

Рис 10. Модальне вікно з показниками обчислювальної системи

Також варто зазначити, що код обчислювальної системи аналізує показники температури та тиску і в разі виходу цих показників з робочого діапазону буде виведене відповідне повідомлення на екран, а поле із показником з недопустимим значенням буде позначене червоним, як на рисунку 11. Варто зазначити, що для випадків із недопустимим значенням тиску вчиняються ідентичні дії.



Система контролю газу	
Об'ємна витрата газу:	0.32 м³/год
Масова витрата газу:	0.13 кг/год
Тиск:	3.75 МПа
Температура:	139.78 °C
Загальний об'єм газу:	0.0584 м³
Загальний час роботи:	0:4:24
<b>УВАГА! Недопустиме значення температури!</b>	

Рис 11. Недопустиме значення температури

Підсумуємо в чому заключається принцип роботи обчислювальної системи. Комплекс вимірювання витрати природного газу має три основні прилади вимірювання: витратомір, датчик тиску, датчик температури. Кожен з цих датчиків підключений до обчислювальної системи. Обчислювач постійно знаходиться в робочому стані та отримує відповідні показники від кожного з приладів.

З витратоміру обчислювач отримує імпульсний сигнал, обробляє його та робить розрахунок об'ємної витрати газу та масової витрати газу. Кожен раз, коли обчислювач отримує імпульс і розраховує об'ємну витрату газу – це значення записується, для того щоб мати інформацію про загальний об'єм газу, який виміряли.

Датчики температури та тиску в свою чергу вже надсилають виміряну температуру і тиск відповідно, тому щодо цих показників ніяких розрахунків проводити не потрібно (показники температури і тиску використовуються для вимірювання масової витрати газу).

Також, не менш важливий пункт – це те, що обчислювач, крім вищеперечислених даних також вираховує та зберігає параметр загального часу роботи обчислювальної системи.

Моніторинг допустимих значень можна розвинути таким чином, щоб помилка не просто виводилась на дисплей обчислювача, а ще й сповіщала про це відповідальних людей чи відразу запускала автоматизовані процеси.

Отже, в цьому розділі нам вдалося розробити програму для обчислення витрат природного газу. Цей компонент дуже важливий у комплексі вимірювання витрат природного газу, адже він дозволяє моніторити усі необхідні дані комплексу та у разі недопустимих значень завчасно повідомити про несправність.

## Висновки

Було надано теоритичні основи вимірювання природного газу та описано типи витратомірів, їхню характеристику, принцип роботи. Аналогічні дії були зроблені для датчиків тиску та температури, було розглянуто, які існують типи та чим вони відрізняються.

У наступних розділах було детально розглянуто компоненти, які входять до комплексу вимірювання витрати природного газу. Було зроблено порівняння різних типів датчиків. Також розібралися із вихідними сигналами витратомірів.

Розглянули принцип роботи комплексів вимірювання витрати природного газу. Розрахували молярну масу природного газу, для подальшого визначення густини, а потім і масової витрати газу, маючи об'ємну. В останньому розділі продемонстровано як працює розроблена програма для обчислювальної системи. Програма отримує вихідні сигнали від витратоміру, датчиків температури та тиску. На основі цих даних обчислюються наступні значення: миттєва об'ємна витрата природного газу, миттєва масова витрата природного газу, загальний розрахований об'єм газу. Крім цього обчислювач слідкує за показниками тиску та температури, а також виводиться на екран загальний час роботи системи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Возняк Л.В., Гімер П.Р., Мердух М.І., Паневник О.В. Гідравліка, навчальний посібник. — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. — 327, 78-80
2. <https://www.italgaz.com.ua/gas-meter/industrial-gas-meter/rabo-elster-rotary-gas-meter.html>
3. <http://sick.in.ua/flowsic600-quatro/>
4. <https://www.casc.endress.com/en/field-instruments-overview/flow-measurement-product-overview/Product-Vortex-flowmeter-Prowirl-72F?t.tabId=product-overview>
5. <https://uk.silverinstruments.com/coriolis-gas-flow-meter.html>
6. <https://uk.silverinstruments.com/product/electronic-rotameter.html>
7. <https://uk.silverinstruments.com/gas-flow-meter.html>
8. <https://studfile.net/preview/16462739/page:30/>
9. <https://vest-m.com.ua/uk/gazifikacyia/schetchiki-gazovye/lgk/gazoviy-1%D1%96chilnik-turb%D1%96nniy-promprilad-g-400-lg-k-100-ex-dn-100.html>
10. <https://www.drurylandetheatre.com/uk/ultrasonic-gas-flow-meter-b-series/>
11. Кремльський П.П., Розходомери і лічильники кількості речовин: Довідник: Кн. 1.
12. Кремльський П.П., Розходомери і лічильники кількості речовин: Довідник: Кн. 2.
13. [https://eco-paper.kpi.ua/images/documents/metodichki/eco/2k/TOZA\\_KP.pdf](https://eco-paper.kpi.ua/images/documents/metodichki/eco/2k/TOZA_KP.pdf)
14. <https://studfile.net/preview/8834964/page:9/>
15. <https://studfile.net/preview/5194010/page:70/>
16. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b384ead6-8522-4047-9827-a10d21396130/content>
17. <https://studfile.net/preview/8960189/>
18. [http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user\\_upload/data\\_gc/grad\\_school/Dis\\_Ste\\_cenko.pdf](http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/grad_school/Dis_Ste_cenko.pdf)
19. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3e67ba65-5fe1-4c88-bca2-c31671ef6c07/content>
20. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/740397dc-3cbf-4856-a815-3e698e0b2fd6/content>

21. [https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/47043/1/%D0%A4%D0%90%D0%95%D0%A2\\_2020\\_173\\_%D0%84%D0%BC%D0%B5%D1%86%D1%8C%D0%94%D0%92.pdf](https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/47043/1/%D0%A4%D0%90%D0%95%D0%A2_2020_173_%D0%84%D0%BC%D0%B5%D1%86%D1%8C%D0%94%D0%92.pdf)
22. <https://uk.sdchenxuan.com/news/what-are-types-of-pressure-sensors>
23. <https://ua.solidat.net/pressure/pressure-series/capacitive-pressure-sensor-factory.html>
24. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
25. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2e918202-7c77-4484-a426-b0806c3863b6/content>
26. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTA7tyscwHe5yjRLL2U7BhTXLrJg2npJ9cVvg&s>
27. <https://web.kpi.kharkov.ua/ea/wp-content/uploads/sites/25/2017/01/KonspIsp-Sert-3-290706-3-U.pdf>
28. <https://ao-tera.com/ua/technology/types-of-temperature-sensors>
29. <https://ukrspecavtomat.com.ua/uk/products-category/termopreobrazovateli-soprotivleniya/>
30. <https://www.ifdcsms.com.ua/uk/news/312/povirka-kompleksiv-vymiriuva>
31. <https://uk.silverinstruments.com/4turbine-flow-meter.html>
32. <https://uk.silverinstruments.com/Gas-flowmeter-with-4-20mA-output.html>
33. <https://www.avigan.com.ua/page/hart-protokol/mp/1250/>
34. <https://vkmodule.com.ua/Description/Description2.html>
35. <https://gas-and-oil-systems.vercel.app/gas-physics-details>

## Додатки

### Додаток А

*код надається за запитом до авторів*