

УДК 621.3.089

М.П. СВИТА
ТОВ "НВФ "ПРОБА", м. Київ
Н.М. ЗАЩЕПКИНА

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ
ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ
ГАЗІВ ПНЕВМОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ**

Розглянуто принцип вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів за допомогою диференціальних перетворювачів тиску і усереднювальних напірних трубок. Наведені переваги використання усереднювальних напірних трубок. Проведено порівняння двох серій мостових тензорезистивних датчиків тиску від компанії «Honeywell», які можуть бути використані під час розробки витратомірів газів, основаних на пневмометричному методі. Показані позитивні та негативні характеристики датчиків. Запропоновано використовувати автоматичний метод установки нуля диференціальних датчиків при вимірюванні швидкості та об'ємної витрати газів в ході неперервного технологічного процесу.

Ключові слова: диференціальний датчик, тиск, швидкість, об'ємна витрата, напірна трубка, пневмометричний метод, усереднювальна трубка.

M.P. SVYTA
LLC "RPC "PROBA"
N.M. ZASHCHEPKINA

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

**USE OF DIFFERENTIAL PRESSURE SENSORS FOR MEASURING SPEED
AND VOLUME FLOW OF GASES BY PNEUMOMETRIC METHOD**

The purpose of the work is to consider the principle of measuring the velocity and volume flow of gases by means of differential pressure transducers and averaging pressure tubes. Advantage in the use of averaging pressure tubes. Conduct a comparison of two series of bridge pressure sensors from Honeywell, which can be used in the development of speed and volume flow meters based on the pneumometric method. Show positive and negative sensor characteristics. Suggest to use an automatic method for setting the zero voltage of differential sensors when measuring the velocity and volume of gases during a continuous process. The principle of measuring the velocity and volume flow of gases by means of differential pressure transducers and averaging pressure tubes is considered. The advantages of using averaging pressure tubes are given. Positive and negative characteristics of differential pressure sensors are shown. The paper considers the pneumometric method of measuring the velocity and volume flow of gases. The advantages of the use of averaging pressure tubes and miniature differential pressure sensors from Honeywell, the 24PC and CPC series are given. The principle of operation of pressure sensors is described. His electric circuit is shown, their characteristics are presented. Schematically shows software and hardware solutions for compensation of voltage bias zero and hysteresis of differential pressure sensors, control system of the device. The practical scheme of thermocompensation of sensors using a precision thermistor is shown. It is proposed to eliminate the hysteresis and the voltage zero displacement of differential pressure sensors by periodically connecting static pressure to both sensor connectors using an electromagnetic valve. This way you can significantly improve the accuracy of the measurement.

Key words: differential sensor, pressure, velocity, volume flow, pressure tube, pneumometric method, averaging tube.

Вступ

Сучасні диференціальні датчики тиску (далі – ДДТ) знайшли широке коло застосувань в ході вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів, завдяки простоті їх використання і високій точності вимірювань. Масове виробництво ДДТ компаніями Honeywell, Freescale, Sensirion, Omron та ін., основаних на тензорезистивному або п'єзорезистивному ефекті та ін., призвели до появи великої кількості приладів для вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів. Ці прилади використовують в своїй роботі метод змінного перепаду тиску, який утворюється безпосередньо в напірній (пневмометричній) трубці або на звужуючому пристрої (діафрагмі). Цей перепад тиску на фоні великого статичного тиску відчувають ДДТ. Змінний перепад тиску або динамічний тиск в напірній трубці утворюється як різниця між повним і статичним тиском [1]. Змінний перепад тиску на звужуючому пристрої утворюється як різниця між статичним тиском перед звужуючим пристроєм і після нього [2].

Використання напірних трубок при вимірюванні більш доцільне, так як вони утворюють значно менший опір в трубопроводі газовому потоку ніж звужуючі пристрої, що дозволяє зменшити витрати тиску при транспортуванні газу. Конструкцій напірних трубок дуже багато. Серед найрозповсюджених є конструкції Міот, Піто, Гінцветмет, НИИОГАЗ [1, 3]. Ці трубки використовують для точкового вимірювання швидкості газового потоку в газозоді [7]. Можливе також використання усереднювальних напірних трубок, які дозволяють отримати середнє значення динамічного тиску по всьому поперечному перерізу газозоду. Це дозволяє вимірювати середню швидкість і об'ємну витрату газу. Напірні трубки в порівнянні зі звужуючими пристроями мають багато переваг. Серед них простота виготовлення, обслуговування і монтажу на об'єктах, можливість виготовлення трубки для будь-яких діаметрів газозоду. Головне обмеження при використанні пневмометричного методу, швидкість газового потоку повинна бути

більшою за 2 м/с. Принцип вимірювання швидкості та об'ємної витрати пневмометричним методом за допомогою ДДТ і усереднювальної напірної трубки представлено на рис. 1.

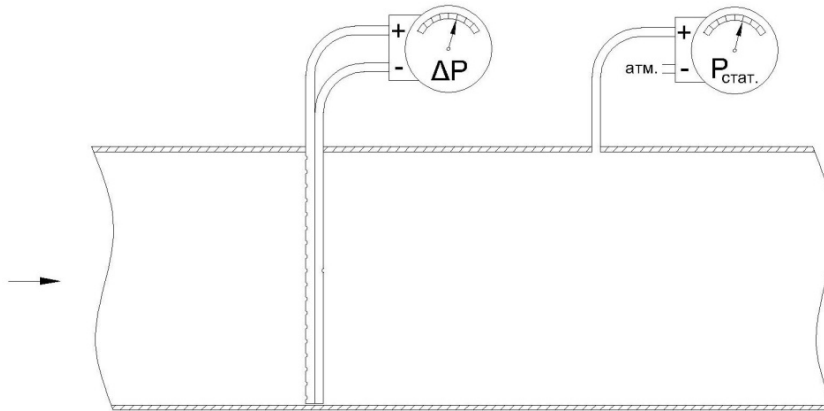


Рис. 1. Вимірювання перепаду тиску в усереднювальній напірній трубці і вимірювання статичного тиску за допомогою ДДТ

Формула для вимірювання швидкості газового потоку пневмометричним методом, V [м/с], має вигляд [1]:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P \cdot K}{0,3593 \cdot \rho \cdot \left(\frac{Pa + Pc}{273,15 + T}\right)}} \quad (1)$$

де ΔP – динамічний тиск, який створюється газовим потоком в напірній трубці, [мм вод. ст.];
 K – коефіцієнт напірної трубки, безрозмірна величина;
 $g = 9,81$ [м/с²];
 Pa – атмосферний тиск, [мм рт. ст.];
 ρ – щільність газу за нормальних умов ($P=760$ мм рт. ст., $t=0$ °С), [кг/м³], наприклад для повітря $\rho=1,293$ кг/м³;

Pc – статичний тиск газового потоку, [мм рт. ст.];
 T – температура газового потоку, [°С].

Формула для розрахунку об'ємної витрати Q , [м³/год], має вигляд [1]:

$$Q = Vc \cdot S \cdot 3600 \quad (2)$$

де Vc – середня швидкість в перерізі газоходу, [м/с];
 S – площа поперечного перерізу газоходу, [м²].

З формули (1) видно що для розрахунку швидкості треба вимірювати: динамічний тиск, статичний тиск, атмосферний тиск і температуру газу. Також, треба знати коефіцієнт напірної трубки, який визначається при метрологічній атестації і щільність газу за нормальних умов. Для вимірювання динамічного тиску та статичного тиску використовують ДДТ.

Постановка проблеми

Серійно виготовляється дуже багато різних ДДТ, вони відрізняються діапазонами вимірювання, чутливістю, точністю, умовами використання. Конструктивно, ДДТ випускаються у різних виконаннях, вони мають різні габарити, масу, вихідні інтерфейси. Можливість роботи при високих статичних тисках, наявність термокомпенсації і способів установки нуля диференційного тиску, роблять такі датчики закінченими вузлами вимірювачів швидкості та об'ємної витрати газів. Моделі які містять всі ці переваги в одному конструктиві (корпусі) мають великі розміри, масу, споживання струму, дорого коштують і як правило використовуються у складі розгалужених АСУТП систем, і не використовуються у портативному приладобудуванні. На рис. 2 показані різні моделі ДДТ.

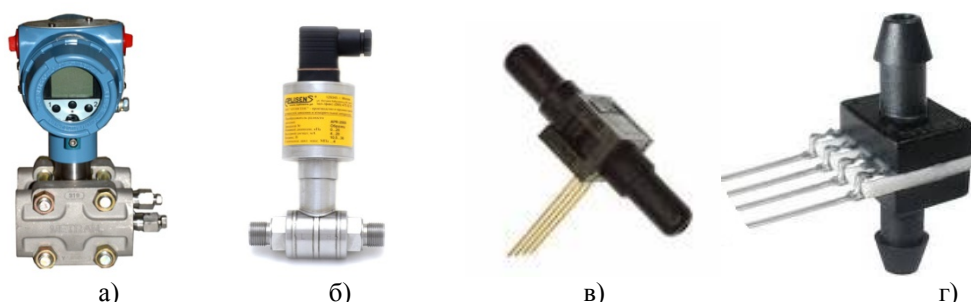


Рис. 2. ДДТ різних виробників: а) Метран 150CDR, б) Aplisens APR2000, в) Honeywell 24PC, г) Honeywell CPC

Більш цікавими для розробників є мініатюрні ДДТ, які дозволяють створити прилади з конкурентною ціною, меншими габаритами, а весь допоміжний функціонал виконати завдяки програмно-апаратним рішенням. Дуже цікаві з даної точки зору є ДДТ, від компанії Honeywell зображені на рис. 2 в, г [5, 6]. Чутливий п'єзорезистивний елемент таких ДДТ, являє собою чотири резистора, розташованих на поверхні кремнієвої діафрагми, включених по мостовій схемі Уїтстона. Тиск, який прикладається до діафрагми, призводить до зміни опору резисторів, яке перетворюється в електричний сигнал. Вихідна напруга при цьому пропорційна напрузі живлення і прикладеного до діафрагми тиску. На рис. 3 зображена електрична принципова схема живлення мостових ДДТ від джерела постійного струму.

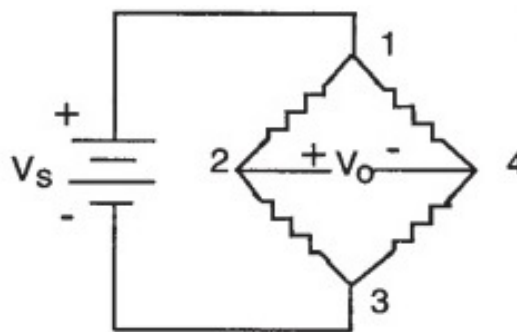


Рис. 3. Електрична принципова схема живлення ДДТ. V_s – джерело живлення, V_o – вихідна напруга ДДТ, 1–4 – виводи ДДТ

Метою статті є порівняння ДДТ серій 24РС і СРС від компанії «Honeywell» які доречно застосовувати при розробці вимірювачів швидкості та витратомірів газів. Запропонувати автоматичний програмно-апаратний метод установки нуля ДДТ для компенсації температурного дрейфу напруги зміщення нуля та гістерезису.

Результати роботи

Основні технічні характеристики ДДТ для вимірювання динамічного тиску, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ДДТ для вимірювання ΔP , від Honeywell

Назва моделі	Максимальний робочий тиск, [кПа]	Максимальний допустимий статичний тиск, [кПа]	Напруга живлення, [В]	Максимальна вихідна напруга при максимальному робочому тиску і номінальному живленні, [мВ]	Чутливість, при номінальному живленні, [мВ/кПа]
24PCE	$\pm 3,5$	103	2,5 - 12	± 35	± 10
CPCL04	± 1	340	3 - 16	± 25	± 25

Основні технічні характеристики ДДТ для вимірювання статичного тиску, наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики ДДТ для вимірювання статичного тиску, від Honeywell

Назва моделі	Максимальний робочий тиск, [кПа]	Максимальний допустимий статичний тиск, [кПа]	Напруга живлення, [В]	Максимальна вихідна напруга при максимальному робочому тиску і номінальному живленні, [мВ]	Чутливість, при номінальному живленні, [мВ/кПа]
24PCC	± 103	310	2,5 - 12	± 225	$\pm 2,2$
CPCL60	$\pm 413,7$	1241	3 - 16	± 90	$\pm 0,22$

Представленні ДДТ мають багато переваг, а саме:

- Широкий діапазон напруг живлення ДДТ
- Лінійність - $\pm 0,25\%$
- Гістерезис - $\pm 0,15\%$
- Час відклику - 1 мс
- Нестабільність характеристики - 0,5%/рік
- Діапазон робочих температур - від -40 до + 85 °С
- Серія СРС має термокомпенсацію, серія 24РС не має.

Недоліками даних ДДТ є:

- Гістерезис, хоч він і не значний, але при вимірюванні малих перепадів тиску (малих швидкостей газового потоку), він може внести велику похибку. Так, при швидкості 2 м/с в напірній трубці при нормальних умовах, утворюється тиск $\sim 2,5$ Па.
- Напруга зміщення нуля ДДТ, при зміні температури - ± 1 мВ, це значна величина, яка потребує програмно-апаратних рішень по установці нуля ДДТ.
- В серії 24РС відсутня термокомпенсація, це також треба враховувати для усунення похибки, спричиненої змінами температури.

В ході безперервного технологічного процесу на точність вимірювання буде суттєво впливати зміна

температури навколо ДДТ. При зміні температури буде виникати дрейф напруги зміщення нуля ДДТ. Це приведе до похибки вимірювання динамічного тиску в усереднювальній напірній трубці, а також швидкості потоку та об'ємної витрати. В таких випадках треба виконати термостатування ДДТ від джерел тепла в корпусі та з зовні приладу. За допомогою системи керування (мікроконтролера), потрібно відслідковувати зміну температури в корпусі приладу або періодично корегувати нуль ДДТ, для досягнення максимальної точності вимірювання [10].

Запропоновано, гістерезис і напругу зміщення нуля ДДТ усувати методом періодичного підключення статичного тиску до обох штуцерів ДДТ за допомогою електромагнітного клапану, це показано на рис. 4. А також використовувати програмно-апаратні рішення для компенсації напруги зміщення нуля ДДТ та гістерезису системою керування приладу, наведені нижче.

Прилад повинен працювати у двох режимах, режимі вимірювання і режимі встановлення нуля ДДТ. В режимі вимірювання клапан закритий і змінний перепад тиску потрапляє на ДДТ. В режимі встановлення нуля ДДТ, електромагнітний клапан відкривається, таким чином статичний тиск потрапляє на обидва штуцери ДДТ, після чого схема керування повинна запам'ятати або зкомпенсувати напругу зміщення.

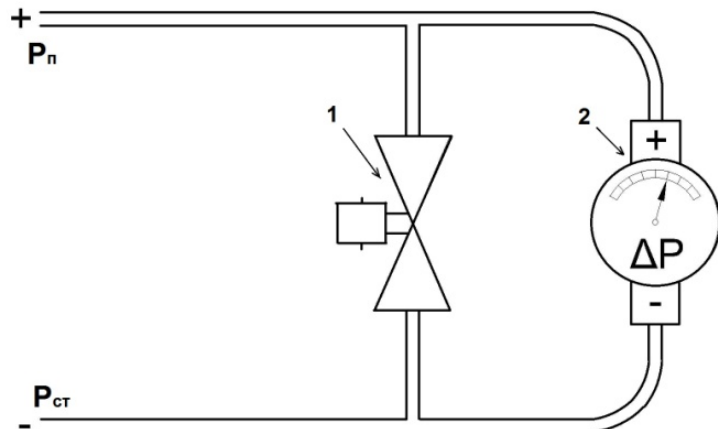


Рис. 4. Обнулення тиску ДДТ за допомогою електромагнітного клапану: 1 – Електромагнітний клапан, 2 – ДДТ вимірювання динамічного тиску, P_n – повний тиск усереднювальній напірній трубці, $P_{ст}$ – статичний тиск усереднювальній напірній трубці

Типова структурна схема вимірювання тиску зображена на рис. 5.

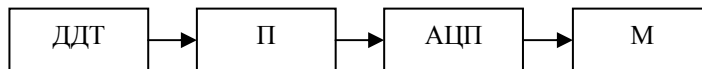


Рис. 5. Структурна схема каналу вимірювання тиску, на основі ДДТ: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер

Компенсування напруги зміщення ДДТ, можна організувати наступними методами:

1. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер запам'ятовує код значення АЦП і приймає його за нуль. В режимі вимірювання потрібно із поточного коду виміру відняти запам'ятоване значення нуля. Головне обмеження даного методу це передбачення значень напруг зміщення нуля (коду АЦП), щоб не потрапити в насичення по коду АЦП.

2. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер виробляє модулем цифро-аналогового перетворювача або модулем широтно-імпульсної модуляції сигнал, яким прагне збалансувати вимірювальний міст ДДТ, таким чином встановити код АЦП в нуль. Цей спосіб зображено на рис. 6.

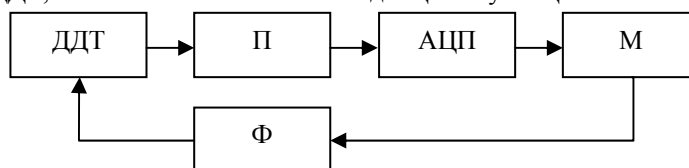


Рис. 6. Балансування мосту ДДТ за допомогою сигналу з мікроконтролера: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер, Ф – фільтр

3. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер виробляє цифрові сигнали управління мікросхемою цифрового потенціометра, завдяки яким прагне збалансувати вимірювальний міст ДДТ, таким чином встановити код АЦП в нуль. Цей спосіб зображено на рис. 7.

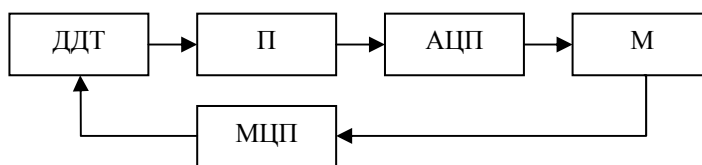


Рис. 7. Балансування мосту ДДТ за допомогою мікросхеми цифрового потенціометра: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер, МЦП – мікросхема цифрового потенціометра

Похибка пов'язана з чутливістю характеристики ДДТ до змін температури вирішується включенням послідовно з датчиком терморезистора, що має негативний температурний коефіцієнт [4]. Практична схема такої термокомпенсації з використанням прецизійного терморезистора типу 2M1501 фірми «Dale Electronics»,

Інс» представлена на рис. 8.

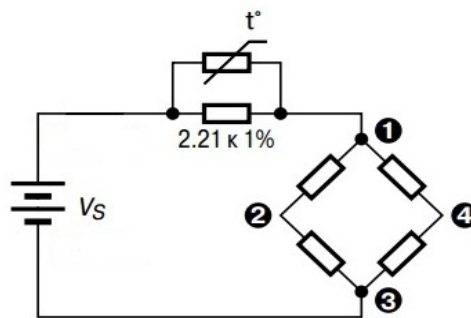


Рис. 8. Термокомпенсація ДДТ за допомогою терморезистора: V_S – джерело живлення, 1–4 – виводи ДДТ

Висновки

В роботі показані переваги використання усереднювальних напірних трубок для вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів. Порівняно ДДТ серій 24PC та CPC від компанії «Honeywell», розглянуті їх переваги і недоліки. Запропоновано використовувати автоматичний метод для установки нуля ДДТ на основі електромагнітного клапану. Показані програмно-апаратні рішення які можуть бути використані при розробці вимірювачів швидкості та витратомірів газів.

Література

- ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. Межгосударственный стандарт. – [Дата введения с 01.01.1991 г.].
- ДСТУ 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. – [Чинний з 01.04.2010 р.]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с. – (Національний стандарт України).
- ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. Межгосударственный стандарт. – [Дата введения с 01.01.1981 г.].
- Рабодзей А.Н. Библиотека электронных компонентов. Выпуск 15: Датчики фирмы «Honeywell» / А.Н. Рабодзей. – М. : ДМК Пресс, 2016.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. CPC/CPCL series.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. 24PC series.
- ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. Государственный стандарт союза ССР. – [Дата введения с 01.07.1980 г.].
- Кулебякин В.В. Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов : учебно-методическое пособие / Кулебякин В.В. – Минск : БНТУ, 2017.
- Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока / Петунин А.Н. – М. : «Машиностроение», 1972. – 332 с.
- Шонфелдер Г. Измерительные устройства на базе микропроцессора ATmega / Шонфелдер Герт, Шнайдер Корнелиус ; пер. с нем. – СПб : БХВ-Петербург, 2014. – 249 с.

References

- Nature protection. Atmosphere. Methods for determination of velocity and flowrate of gas-and-dust streams from stationary sources of pollution. GOST 17.2.4.06-90 - [Date of introduction from 01.01.1991], Interstate standard.
- Measurement of flow rate and quantity of liquid and gas with the use of standard narrowing devices. Part 1. DSTU 8.586.1-2005 (ISO 5167-1: 2003) - [effective as of 01.04.2010] -K. : Derzhspozhyvstandart Ukraine 2010, 98 p., National Standard of Ukraine.
- Ventilation systems. Methods of aerodynamic tests. GOST 12.3.018-79- [Date of introduction from 01.01.1981], Interstate standard.
- Library of electronic components. Issue 15: Sensors from Honeywell Inc. Workers - M.: DMC Press. 2016
- Operating manual. Honeywell sensing and control. CPC/CPCL series.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. 24PC series.
- State system for ensuring uniformity of measurements (GSI). Fluid and gas flow rate. Method of performing measurements on the speed at one point of the pipe section. GOST 8.361-79 - [Date of introduction from 01.07.1980], State standard of the Union of Soviet Socialist Republics.
- Kulebyakin V. Methods and instruments for measuring the flow of liquids and gases - Methodological manual, Minsk BNTU 2017.
- Petunin AN Methods and techniques for measuring the parameters of the gas flow - M., "Mechanical Engineering", 1972. - 332 p.
- Schonfelder G. Measuring devices based on microprocessor ATmega: Per. with Germany / Schonfelder Gert, Schneider Cornelius - SPB. : BHV-Petersburg, 2014. - 249 p.

Рецензія/Peer review : 17.8.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко