

Наукові та практичні проблеми виробництва приладів та систем

5. Zakrevskiy O.F. Eddy-current probe for conductive objects displacement in space measurement. / Zakrevskiy O.F. // Scientific proceedings. – 2011. – № 1 (121). – p. 28 - 31.

Надійшла до редакції
20 грудня 2011 року

©Закревський О.Ф., 2012

УДК 681.121

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПІЗНЕННЯ В ПЕРЕДАЧІ ТИСКУ ІМПУЛЬСНИМИ ТРУБКАМИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ГАЗУ, ЯКІ БАЗУЮТЬСЯ НА МЕТОДІ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

Коробко І. В.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
м. Київ, Україна

Стаття направлена на розв’язання задачі точного вимірювання витрати і кількості природного газу витратомірами та лічильниками, що базуються на методі змінного перепаду тисків, при змінних у часі потоках. В роботі розглядаються питання оцінки величини запізнення при вимірюванні витрати та кількості природного газу в наслідок запізнення у пневматичних системах передачі різниці тисків від камер урівноважування звужуючих пристроїв до чутливих елементів диференційних манометрів. Величина запізнення впливає на динамічні характеристики системи вимірювання витрати та кількості газу і відповідно на точність вимірювання. Особлива увага приділена дослідженню впливу геометричних параметрів системи передачі та вимірювання різниці тисків на величини запізнення в їх передачі до чутливих елементів диференційних манометрів. Розглянуто питання визначення величини запізнення для пневматичних систем вимірювання із підігрівом диференційних манометрів та без нього.

Ключові слова: витрата газу, звужуючі пристрої, імпульсна трубка, динамічні характеристики, запізнення передачі різниці тисків.

Вступ. Постановка проблеми

Облік енергоносіїв має надзвичайно велике значення для їх економії і раціонального використання. Стан обліку енергоносіїв насамперед визначається технічною базою обліку, зокрема наявністю відповідних методів і технічних засобів обліку. Проведений аналіз існуючих приладів та систем вимірювання витрати показує, що для вимірювання витрати та кількості природного газу найбільшого застосування набули вимірювальні перетворювачі: змінного перепаду тиску (ЗПТ) із стандартними пристроями звуження потоку (діафрагми), тахометричні та ультразвукові.

Широке застосування витратомірів з пристроями звуження потоку пояснюється їх дешевизною, простотою конструкції, високою надійністю, можливістю використання як для малих, так і для великих витрат різноманітних середовищ, практично за будь-яких тисків і температур. Особливо важливою перевагою таких приладів є те, що вони застосовуються без індивідуального градування.

Одним з основних недоліків вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ) ЗПТ є їх не великі динамічні властивості. Основною складовою динамічних похибок витратомірів ЗПТ є запізнення в передачі тиску через імпульсні (з'єднувальними) трубки від камер усереднення (КУ) звужуючих пристроїв до камер диференційних манометрів (КДМ).

В наслідок тертя тиск у пневматичних системах передається не миттєво, а із запізненням. Запізнення в передачі тиску призводить до суттєвих похибок в роботі пневматичних і вимірювальних систем.

Постановка задачі

На сьогодні ще відсутня прийнятна методологія визначення запізнення передачі різниці тисків від камер усереднення витратомірів та лічильників змінного перепаду тиску до чутливих елементів диференційних манометрів.

Питання дослідження закономірностей протікання рідин та газів по трубопроводах за різної динаміки їх плинуну висвітлені в роботах: Дж. Бэтчелора, В. А. Вилдака, А. С. Ибералья, Е. З. Рабиновича, Р. Р. Чугаева, И. Л. Повха, А. Н. Пантрашева, Є. П. Пістуна, Ф. Д. Матіка та інших.

Для пневматичних систем Вілдхак [1] запропонував визначати δp за допомогою рівняння

$$\delta p = \lambda \frac{dp_{ky}}{dt}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт запізнення.

Коефіцієнт запізнення λ Вілдхак рекомендував визначати за формулою

$$\lambda = \frac{128\mu l Q}{\pi d^4 p_0}, \quad (2)$$

де Q – приєднаний об'єм; l – довжина з'єднувальної (імпульсної) трубки; μ – коефіцієнт в'язкості; d – внутрішній діаметр імпульсної трубки; p_0 – початковий тиск.

Формула (1) була виведена при припущеннях, що течія у трубці ламінарна і закон Пуазейля для цих умов справедливий. Але точність визначення запізнення за виразом (1) досить низька.

Необхідно також відзначити, що до сих пір не враховувалося той факт, що пневматичні системи передачі тисків від звужуючих пристроїв до вимірювальних перетворювачів різниці тисків, є складними системами.

Метою даної роботи є розробка теоретично обґрунтованого методу визначення запізнення в пневматичних системах вимірювання витрати та кількості природного газу, що базується на застосуванні методів змінного перепаду тисків.

Визначення моделі поправки на запізнення

При вимірюванні витрати та кількості природного газу КУ тисків звужуючих пристроїв з'єднуються за допомогою імпульсних трубок із вимірювальними КДМ.

При виникненні перепаду між тисками КУ і КДМ газ у з'єднувальній трубці почне переміщатися, причому цей процес буде продовжуватися до тих пір, поки тиск у КДМ не зрівняється з тиском КУ. Поправка на запізнення показів диференційного манометра дорівнює перепаду тисків

$$\delta p = p_{ky} - p_{kdm},$$

де p_{ky} – тиск природного газу у КУ;

p_{kdm} – тиск природного газу у КДМ.

Для визначення виникаючої в цьому випадку поправки на запізнення скористаємося рівнянням руху Ейлера [2]. Оскільки в даному випадку потік газу можна вважати одномірним і направленим по вісі x , яка співпадає з віссю імпульсної трубки, то рівняння Ейлера набуде виду

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = X - V \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (3)$$

де X – зовнішня сила, що діє на одиницю маси газу;

V – середня по перерізу швидкість руху газу по імпульсній трубці.

Основною зовнішньою силою, яка діє на газ, що протікає по імпульсній трубці, є опір тертя. Втрати натиску в наслідок тертя можна визначити за виразом [3-4]

$$h_t = \frac{p_{ky} - p_{kdm}}{\gamma} = \psi \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (4)$$

де γ – питома вага вимірювального середовища;

ψ – безрозмірний коефіцієнт тертя;

g – прискорення сили тяжіння.

З виразу (4) силу опору тертя, яка віднесена до одиниці маси газу ($m = \frac{1}{g}$)

можна представити залежністю

$$X = \psi \frac{V^2}{2d}. \quad (5)$$

Таким чином, з врахуванням виразу (5), рівняння руху (3) набуде виду

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \psi \frac{V^2}{2d} - V \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial t}. \quad (6)$$

Дослідження показали, що для пневматичних імпульсних трубок швидкість потоку газу по їх довжині змінюється мало. Оскільки навіть у крайніх випадках для систем вимірювання витрати та кількості природного газу із застосуванням методів змінного перепаду тисків p_{kdm} відрізняється від p_{ky} не більше ніж на 8-10%, то можна вважати швидкість потоку по довжині імпульсної трубки сталою, тобто

$$\frac{\partial V}{\partial x} \approx 0. \quad (7)$$

Аналіз динамічних характеристик плинних потоків природного газу, витрату яких необхідно вимірювати, показує, що їх динамічні характеристики змінюються в невеликому діапазоні. Виходячи з цього, можна вважати, що зміна швидкості руху газу в часі є величиною другого порядку малості. Тоді

$$\frac{\partial V}{\partial t} \approx 0. \quad (8)$$

Враховуючи вирази (7) та (8), рівняння (6) набуде виду

$$\frac{dp}{dx} = \Psi \frac{\rho V^2}{2d}. \quad (9)$$

За ламінарної течії газу по прямих трубопроводах коефіцієнт тертя Ψ виражається через число Рейнольдса Re формулою Пуазейля

$$\Psi = \frac{64}{Re}.$$

Число Re визначається за виразом

$$Re = \frac{Vd}{\vartheta}, \quad (10)$$

де ϑ – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Кінематична в'язкість визначається через динамічну в'язкість μ відношенням

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}. \quad (11)$$

Практично в пневматичних системах диференційних манометрів застосовуються зігнуті трубки. Відповідно, навіть у випадку ламінарної течії (а тим більше турбулентної) коефіцієнт тертя Ψ буде більшим за $\frac{64}{Re}$. А тому доцільно

застосовувати для визначення коефіцієнту тертя Ψ наступний вираз

$$\Psi = \frac{k}{Re}, \quad (12)$$

$k = const > 64$ для ламінарної течії і є функцією δp за турбулентної течії.

Враховуючи вирази (12), (11) та (10), рівняння (9) набуде виду

$$\frac{dp}{dx} = k \frac{\mu}{2d} V. \quad (13)$$

Інтегруючи залежність (13) по всій довжині трубки l , отримаємо

$$p_{ky} - p_{kdm} = \delta p - k \frac{\mu l}{2d^2} V. \quad (14)$$

У виразі (14) швидкість плинного газу по імпульсній трубці V – величина невідома. Для її визначення необхідно скористатися рівнянням приросту густини газу, який поступає у вимірювальну камеру диференційного манометра

$$\frac{d\rho_{kdm}}{dt} = \frac{\pi d^2}{4Q} \rho V, \quad (15)$$

де Q – об’єм вимірювальної камери диференційного манометра.

При інженерних розрахунках об’ємом трубопроводу здебільшого нехтують, тому що в пневматичних системах диференційних манометрів, для яких необхідно враховувати запізнення, він досить малий в порівнянні з об’ємом вимірювальної камери диференційного манометра. В окремих випадках, коли об’єм вимірювальної камери диференційного манометру малий, до цього об’єму додають половину об’єму імпульсної трубки.

Якщо прилад не має обігріву, то температура газу у вимірювальній камері диференційного манометру і на ділянці трубопроводу поблизу приладу можна вважати однаковими і наближено вважати $\rho_{kdm} = \rho$. Процес заповнення приладу газом можна вважати політропічним, тобто

$$\frac{p}{\rho^n} = const, \quad (16)$$

де n – показник політропії.

Враховуючи вираз (16), залежність (15) після перетворень набуде виду

$$V = \frac{4Q}{\pi n d^2 \rho_{kdm}} \cdot \frac{dp_{kdm}}{dt}. \quad (17)$$

Підставивши залежність (17) в рівняння (14) отримаємо

$$\delta p = 2k \frac{\mu l Q}{\pi n d^2 \rho_{kdm}} \cdot \frac{dp_{kdm}}{dt}. \quad (18)$$

Для випадків, коли можна знехтувати теплопередачею між трубопроводом і газом, що протікає по ньому, температура трубопроводу близька температурі газу у камері врівноважування звужуючого пристрою, можна вважати процес заповнення вимірювальної камери диференційного манометру ізотермічним, тоді $n = 1$.

Якщо прилад підігривається, то

$$\rho = \rho_{kdm} \left[1 + \alpha (T_{kdm} - T_{ky}) \right], \quad (19)$$

де ρ_{kdm} – густина газу у вимірювальній камері диференційного манометру;

α – коефіцієнт об’ємного розширення газу;

T_{kdm} – температура газу у вимірювальній камері диференційного манометру;

T_{ky} – температура газу у камері врівноважування звужуючого пристрою.

Враховуючи вираз (19), при наявності підігріву в знаменник формули (18) необхідно ввести співмножник $\left[1 + \alpha (T_{kdm} - T_{ky}) \right]$.

Для пневматичної системи вимірювання витрати та кількості природного газу за допомогою методу змінного перепаду тиску, враховуючи вираз (18), формулу для визначення коефіцієнту запізнення можна навести у вигляді

$$\lambda = 2k \frac{\mu l Q}{\pi n d^4 \rho_{kdm}}. \quad (20)$$

Аналізуючи формули (20) та (21) можна зробити висновки, що запізнення у

системах передачі різниці тисків від камер урівноважування звужуючих пристроїв до чутливих елементів диференційних манометрів прямо пропорційні довжині імпульсних трубок і об'єму виміральної камери диференційних манометрів та обернено пропорційні внутрішньому діаметру імпульсної трубки в четвертій степені.

Висновки

Отримані математичні залежності запізнення передачі тиску від камер урівноважування звужуючих пристроїв до чутливих елементів диференційних манометрів дозволяють ефективно здійснювати оцінку величин запізнення і на їх основі аналізувати чинники, які впливають на інерційні характеристики виміральної системи.

Для зменшення запізнення необхідно зменшувати довжину імпульсних трубок, об'єм камер приладів, що приєднуються, уникати згину ліній трубок, та збільшувати їх внутрішній діаметр. При чому збільшення внутрішнього діаметру імпульсної трубки є найбільш ефективним засобом в наслідок того, що величина запізнення обернено пропорційна діаметру трубопроводу в четвертій степені.

Подальші дослідження будуть направлені на розробку математичних моделей запізнення передачі тиску із врахуванням внутрішнього та зовнішнього станів імпульсних трубок.

Література

1. Wildhack W.A. Pressure drop in Tubling in Aircraft Instrument Installation //Technical Note NASA. – 1937, № 593.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебн. для вузов. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
3. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – 3-е изд. – Л.: Государственное издательство физ.-мат. лит-ры, 1961. – 504 с.
4. Рабинович Е.З. Гидравлика. – 3-е изд. – М.: Государственное издательство физ.-мат. лит-ры, 1961. – 408 с.

*Надійшла до редакції
20 травня 2012 року*

© Коробко І. В., 2012