

УДК 681.121

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ДРОСЕЛЬНИХ ВИТРАТОМІРІВ МАЛИХ І МІКРОВИТРАТ ГАЗІВ

© Пістун Є. П., Стасюк І. Д., 2000
Державний університет "Львівська політехніка"

Описані результати виконаних досліджень динамічних властивостей газодинамічних дросельних витратомірів малих і мікровитрат газів. Наведені рекомендації щодо забезпечення необхідних динамічних властивостей таких витратомірів та їх реалізації.

Ефективне проведення технологічних процесів, зокрема у виробництві волоконних світловодів та елементів мікроелектроніки, у значній мірі визначається надійністю та якістю роботи автоматизованих систем контролю й керування цими процесами. Ця обставина зумовлює високі вимоги до засобів контрольно-вимірювальної техніки, які застосовуються в системах автоматизації названих технологічних процесів.

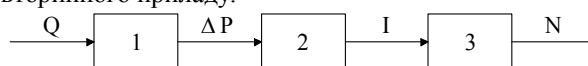
Особливо жорсткі вимоги, поряд із високою точністю вимірювання, ставляться до динамічних характеристик витратомірів малих і мікровитрат газів. Так, наприклад, стала часу витратомірів малих і мікровитрат кисню для технологічного процесу виробництва заготовок волоконних світловодів не повинна перевищувати декількох секунд.

У роботі наведені результати досліджень динамічних властивостей газодинамічних дросельних витратомірів малих і мікровитрат газів [1], які застосовуються в схемах задання, вимірювання та регулювання малих і мікровитрат газів у виробництві волоконних світловодів. Структурна схема такого витратоміра зображена на рис. 1. Він складається із газодинамічного дросельного вимірювального перетворювача витрати (ГДВПВ) 1, вторинного вимірювального перетворювача 2 (використовується диференціальний манометр з уніфікованим електричним вихідним сигналом) і вторинного приладу 3. Камери диференціального манометра підключені до вихідних міждросельних пневматичних камер ГДВПВ. ГДВПВ виконаний на ламінарних дросельних елементах - скляних капілярних трубках - за схемою газодинамічного дросельного вимірювального моста, зображеного на рис. 2.

Динамічні властивості таких витратомірів газів визначаються динамічними характеристиками кожного окремого елемента витратоміра, а саме:

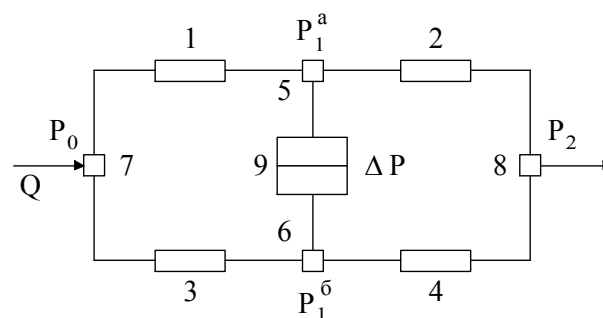
$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p), \quad (1)$$

де $W(p)$ - функція передачі витратоміра газу в цілому; $W_1(p)$, $W_2(p)$ і $W_3(p)$ - функції передачі відповідно ГДВПВ, диференціального манометра і вторинного приладу.



1 - газодинамічний дросельний вимірювальний перетворювач витрати; 2 - диференціальний манометр з уніфікованим електричним вихідним сигналом; 3 - вторинний прилад.

Рис. 1. Структурна схема газодинамічного дросельного витратоміра малих і мікровитрат газу.



1, 2, 3 і 4 - дросельні елементи; 5 і 6 - міждросельні пневматичні камери; 7 і 8 - вхідна і вихідна пневматичні камери; 9 - камери диференціального манометра.

Рис. 2. Мостова вимірювальна схема газодинамічного дросельного витратоміра.

На динамічні властивості ГДВПВ суттєво впливають, крім конструктивних характеристик дросельних елементів, об'єми міждросельних камер. Об'єми ж камер диференціального манометра, у свою чергу, в основному визначають динаміку вторинного вимірювального перетворювача.

Особливістю виконання витратоміра газу є те,

що кожна камера диференціального манометра разом із відповідною міждросельною пневматичною камерою ГДВПВ утворюють єдину загальну пневматичну камеру певного об'єму. Ці дві загальні пневматичні камери під час дослідження динамічних властивостей витратоміра можуть бути враховані або в ГДВПВ, або в диференціальному манометрі, або ж окремо в ГДВПВ і в диференціальному манометрі згідно з об'ємами складових, що утворюють загальні камери. У зв'язку з тим, що динамічні властивості диференціальних манометрів вивчені недостатньо і що основною складністю під час вивчення їх динамічних властивостей є саме врахування об'ємів камер диференціального манометра, то видається за доцільне динамічні властивості камер диференціального манометра враховувати у ГДВПВ.

Отже, під час досліджень динамічних властивостей витратоміра об'єми його загальних пневматичних камер були віднесені до ГДВПВ. У цьому випадку функцію передачі $W_2(p)$ диференціального манометра можна описати пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі, що дорівнює

$$K_2 = \frac{\Delta I}{\Delta(\Delta P)},$$

де ΔI і $\Delta(\Delta P)$ - зміни відповідно вихідного і вхідного сигналів диференціального манометра.

Якщо прийняти, що вторинний прилад так само може бути реалізований у вигляді пропорційної ланки, то з врахуванням викладеного розглянемо динамічні характеристики ГДВПВ.

ГДВПВ (рис. 2) складається із двох паралельних віток, утворених відповідно: перша вітка - дроселями 1 і 2, а друга - дроселями 3 і 4. Між цими дроселями включені міждросельні пневматичні камери 5 і 6. Ці камери разом з камерами диференціального манометра і з'єднуючими їх пневмопроводами утворюють проточні пневматичні камери постійного об'єму і з постійними ламінарними опорами на вході та виході.

Отже вимірювальна схема витратоміра газу, який містить ГДВПВ і диференціальний манометр, представляє собою дві паралельно включені пневматичні камери, причому тиски перед дроселями на вході газу в камери рівні між собою тиски за дроселями на виході газу з камер також рівні і, крім того, стабілізовані.

З врахуванням паралельного включення пневматичних камер і вимірювання перепаду тиску в цих камерах функція передачі ГДВПВ може бути визначена як

$$W_1(p) = W_a(p) - W_o(p), \quad (2)$$

де $W_a(p)$ і $W_o(p)$ - функції передачі відповідно вер-

хньої і нижньої пневматичних проточних камер разом із їх дросельними елементами.

Розглянемо динамічні властивості окремої загальної проточної пневматичної камери ГДВПВ, зображеної на рис. 3. Під час стаціонарного режиму руху витрата газу через проточну камеру і дроселі 1 і 2, що її утворюють, постійна. Тиски P_0 , P_1 і P_2 також постійні. Тиск P_1 в камері може змінюватися залежно від зміни тисків P_0 і P_2 . Отже, камера з вихідним тиском P_1 має два входи: тиски P_0 і P_2 . Якщо тиск P_2 стабілізувати ($P_2 = const$), що здійснено в розглядуваному пристрої за допомогою стабілізатора абсолютного тиску, то тиск P_1 буде змінюватися лише завдяки зміні тиску P_0 .



Рис. 3. Пневматична камера постійного об'єму з ламінарними дросельними елементами на її вході та виході.

Зміна тиску P_1 у вказаній камері здійснюється безпосередньо за рахунок зміни маси газу в цій камері, що в свою чергу можливе лише завдяки зміні співвідношення припливу і стоку газу, тобто за рахунок зміни в часі t масових витрат газу Q_{M_1} і Q_{M_2} відповідно через перший і другий дроселі камери. З врахуванням викладеного зміна маси газу в камері виразиться як

$$\Delta M(t) = \int_0^t [Q_{M_1}(t) - Q_{M_2}(t)] dt. \quad (3)$$

Зміна маси газу ΔM у камері зумовить зміну в ній тиску ΔP_1 , тобто:

$$\Delta M(t) = \Delta P_1(t) \cdot \frac{V}{R\Theta}, \quad (4)$$

де V - об'єм пневматичної камери (загальний об'єм міждросельної камери, камери диференціального манометра і з'єднуючого їх пневмопроводу); R - газова стала; Θ - абсолютна температура газу в камері.

Із (3) і (4) маємо, що:

$$\Delta P_1(t) \cdot \frac{V}{R\Theta} = \int_0^t [Q_{M_1}(t) - Q_{M_2}(t)] dt. \quad (5)$$

Диференціюючи (5), знаходимо, що

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot \frac{dP_1(t)}{dt} = Q_{M_1}(t) - Q_{M_2}(t), \quad (6)$$

або з врахуванням визначення $Q_{M_1}(t)$ і $Q_{M_2}(t)$ за допомогою рівняння Пуазейля [2]

$$Q_{M_1}(t) = K_1 [P_0(t) - P_1(t)]; \quad (7)$$

$$Q_{M_2}(t) = K_2[P_1(t) - P_2], \quad (8)$$

отримаємо, що

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot \frac{dP_1(t)}{dt} = K_1 P_0(t) - (K_1 + K_2)P_1(t) + K_2 P_2. \quad (9)$$

У вище наведених рівняннях K_1 і K_2 згідно з рівняннями Пуазейля визначаються так:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\pi d_1^4 \rho_1}{128 \mu L_1}; \\ K_2 &= \frac{\pi d_2^4 \rho_2}{128 \mu L_2}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де d_1 і L_1 - відповідно діаметр прохідного перетину і довжина каналу дросельного елемента, розміщеного на вході газу в камеру; ρ_1 - середня густина газу по довжині каналу цього дросельного елемента; d_2 , L_2 і ρ_2 - вище перераховані величини для дросельного елемента, розміщеного на виході газу із камери; μ - коефіцієнт динамічної в'язкості газу при температурі Θ .

Із рівняння (9) знаходимо, що

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot \frac{dP_1(t)}{dt} + (K_1 + K_2)P_1(t) = K_1 P_0(t) + K_2 P_2. \quad (11)$$

Рівняння (11) описує динаміку вказаної камери.

Із цього рівняння видно, що тиск P_1 для заданих дросельних елементів визначається тисками P_0 і P_2 .

З врахуванням перетворень Лапласа по t із (11) отримаємо, що

$$\frac{V}{R\Theta} \cdot p P_1(p) + (K_1 + K_2)P_1(p) = K_1 P_0(p) + K_2 P_2,$$

звідки

$$\left[\frac{V}{R\Theta(K_1 + K_2)} \cdot p + 1 \right] \cdot P_1(p) = \frac{K_1}{K_1 + K_2} \cdot P_0(p) + \frac{K_2}{K_1 + K_2} \cdot P_2. \quad (12)$$

Коефіцієнт біля першої похідної у рівнянні (12) має розмірність часу і представляє собою сталу часу T розглядуваної камери

$$T = \frac{V}{R\Theta(K_1 + K_2)}, \quad (13)$$

а коефіцієнт біля $P_0(p)$ - це коефіцієнт підсилення K для вхідної величини P_0 , який дорівнює

$$K = \frac{K_1}{K_1 + K_2}. \quad (14)$$

Отже функція передачі розглядуваної камери для каналу $P_0 \rightarrow P_1$ буде такою:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (15)$$

а камера є інерційною ланкою першого порядку.

У ГДВПВ згідно з рис. 2 є дві протічні пневматичні камери, які визначають його динаміку згідно з рівняннями (2). Ці камери аналогічні камері, розглянутій на рис. 3.

У зв'язку з цим функція передачі верхньої камери (рис. 2) за аналогією з (15) має такий вигляд:

$$W_a(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1}, \quad (16)$$

а нижньої камери відповідно

$$W_b(p) = \frac{K_b}{T_b p + 1}, \quad (17)$$

де

$$K_a = \frac{K_1}{K_1 + K_2}; K_b = \frac{K_3}{K_3 + K_4}; \quad (18)$$

$$T_a = \frac{V_a}{R\Theta(K_1 + K_2)}; T_b = \frac{V_b}{R\Theta(K_3 + K_4)},$$

K_1, K_2, K_3 і K_4 - провідності дросельних елементів, які визначаються згідно з рівняннями

$$K_i = \frac{\pi d_i^4 \rho_i}{128 \mu L_i}, i = 1, 2, 3, 4; \quad (19)$$

V_a і V_b - об'єми відповідно верхньої і нижньої пневматичних камер.

Отже, функція передачі ГДВПВ згідно з (2), (16) і (17) має такий вигляд:

$$W_1(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1} - \frac{K_b}{T_b p + 1} = \frac{K_a - K_b + (K_a T_b - K_b T_a)p}{T_a T_b p^2 + (T_a + T_b)p + 1}. \quad (20)$$

Із (20) випливає, що динаміка ГДВПВ залежно від співвідношення об'ємів пневматичних камер, геометричних розмірів дросельних елементів і теплофізичних параметрів газу, може відповідати як аперіодичній ланці другого порядку, так і такій же ланці з випередженням. Для усунення випередження необхідно забезпечити виконання такої умови:

$$K_a T_b - K_b T_a = 0, \quad (21)$$

що можна забезпечити відповідним вибором об'ємів камер для заданих дросельних елементів. Крім того, із (20) видно, що інерційність ГДВПВ визначається складовими T_a і T_b , а їх можна змінювати шляхом вибору об'ємів V_a і V_b кожної камери ГДВПВ. Із викладеного випливає, що для забезпечення динамічних характеристик ГДВПВ, які задовольняють вимогам сучасних технологій, необхідно забезпечити виконання умови (21), а також забезпечити мінімально можливий об'єм камер V_a і V_b .

Особливо слід відзначити варіант ГДВПВ, у якому сталі часу T_a і T_b рівні між собою. У цьому випадку із (20) отримаємо, що

$$W_1(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (22)$$

де $K = K_a - K_b$ і $T = T_a = T_b$. Звичайно, цей варіант є найбільш прийнятним під час створення ГДВПВ. При цьому за допомогою зменшення складових T_a і T_b і забезпеченні їх рівності, як правило, завжди можна створювати ГДВПВ з динамічними властивостями, які задовольняють вимогам технологій сучасних виробництв.

Так, наприклад, значення об'ємів пневматичних камер ГДВПВ у витратомірі кисню з діапазоном вимірювань $0 \dots 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0 \dots 18 \text{ л/год}$), при яких ГДВПВ відповідала б аперіодичній ланці першого порядку, а його стала часу не перевищувала б 1 с , повинні дорівнювати: $V_a = 149,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $V_b = 148,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Функція передачі диференціального манометра згідно з прийнятою методологією віднесення динаміки його камер у функцію передачі ГДВПВ буде відповідати пропорційній ланці, а саме:

$$W_2(p) = K_d, \quad (23)$$

$$\text{де } K_d = \frac{\Delta I}{\Delta(\Delta P)}.$$

Динаміка вторинних приладів вже достатньо вивчена. Вона описується функцією передачі або пропорційної ланки, або аперіодичної ланки першого порядку.

Із вище викладеного випливає, що інерційність витратоміра газу буде залежати в основному від динамічних властивостей ГДВПВ і вторинного приладу.

Виконані дослідження можуть знайти застосування під час розробки і створення газодинамічних дросельних витратомірів і задавачів малих і мікровитрат газів.

І. А. С. № 1278584 (СССР). Устройство для измерения малых расходов // Е. П. Пистун, И. Д. Стасюк. Бюл. № 47, 1986. 2. Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. - М.: Изд-во АН СССР, 1961.