

І.М. Колядинський, А.М. Коровицький
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ ПОХИБОК ТЕПЛООВОГО ВИТРАТОМІРА-ЗАДАВАЧА МАСОВОЇ ВИТРАТИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ F260

© Колядинський І.М., Коровицький А.М., 2013

У роботі розглянуто вплив температури та тиску на точність роботи витратоміра-задавача масової витрати F260. Експериментально встановлено обсяг дестабілізації значення витрати, внаслідок зміни температури приладу та зміни тиску в системі. Досліджено структуру і принцип роботи капілярного термічного сенсора у приладі. Встановлено умови, за яких похибка у роботі приладу не перевищує $\pm 1\%$ від повної шкали. Наведено рекомендації щодо налаштування приладу для якісної роботи.

Ключові слова: витратомір, капілярний термічний сенсор, похибка, калібрування.

The influence of temperature and pressure on the accuracy of the mass flow controller F260 was considered in the paper. Destabilization amount of the flow rate due to changes in device heating temperature and pressure changes were determined in the working system experimentally. Investigation of the structure and operation principle of the thermal sensor in the device was provided. Establish conditions when the error in the instrument does not exceed $\pm 1\%$ of full scale. Recommendations to configure the device for high-quality work were provided.

Key words: mass flow controller, capillary thermal sensor, error, calibration.

Вступ

Сучасне виробництво є складною, багатокомпонентною системою. Покращення точності керування параметрами перебігу технологічних процесів дозволяє підвищити якість та повторюваність результатів. У напівпровідниковій, хімічній та електромеханічній промисловості достатньо велика кількість технологічних процесів перебігає з використанням газових потоків. Витрата потоку є одним з найважливіших параметрів, який потребує точного керування у таких процесах. Сьогодні існує багато приладів, які виконують функцію керування та реєстрацію витрати газових потоків. Задавачі масової витрати термічного типу (MFC – Mass Flow Controller) є зручним засобом для обліку та контролю газових потоків у технологічних системах [1].

Постановка задачі

Результати наших попередніх досліджень [2], з модернізації вакуумного універсального поста ВУП-5М, показали, що використання витратоміра-задавача масової витрати F260 істотно покращує стабільність роботи системи при магнетронному розпорощенні, та дає змогу реалізувати автоматизацію процесу подачі робочого газу. На основі наведеної інформації виникає потреба в дослідженні впливу дестабілізуючих факторів, які можуть викликати відхилення у стабільності та точності роботи модернізованої системи загалом.

Отже, метою роботи є:

- встановити вплив температури приладу, на виникнення похибки у керуванні масовою витратою газового потоку;
- дослідити вплив зміни тиску вхідного та вихідного потоку, у системі, на роботу приладу;
- визначити умови експлуатації приладу, за яких його похибка не перевищуватиме $\pm 1\%$ від повної шкали.

Матеріали дослідження

Розв'язання поставленої задачі здійснювалось за допомогою витратоміра-задавача газових потоків термічного типу F260 (рис.1, а) [3]. Задавачі цього типу є доволі зручними для забезпечення газопостачання у технологічних процесах, котрі супроводжуються незначними потоками газу і потребують високої точності керування їх витратою.

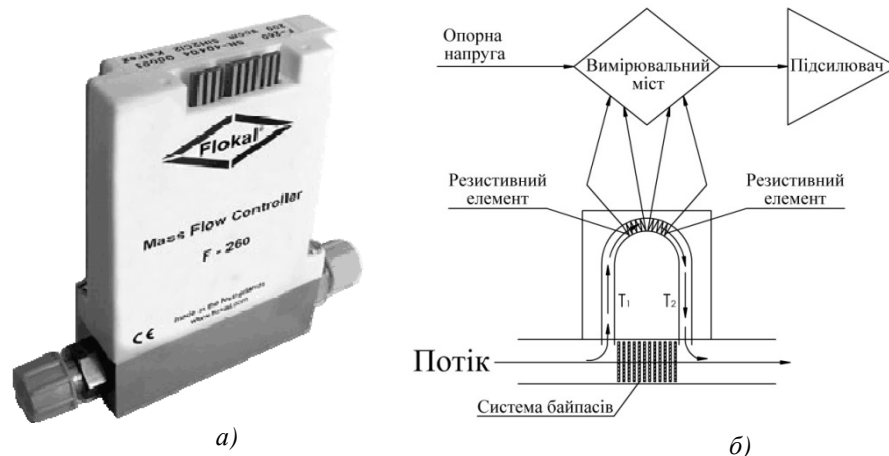


Рис. 1. Витратомір-задавач масової витрати F260: а) загальний вигляд витратоміра-задавача масової витрати F260; б) схема капілярного термічного сенсора витратоміра-задавача масової витрати F260

F260 здійснює облік витрати потоку за допомогою сенсорного елемента термічного типу. Сенсори термічного типу мають: компактні розміри, високу точність вимірювання, незначний час відгуку та низький рівень енергоспоживання [4]. Схема капілярного термічного сенсора відображена на рис. 1, б.

Принцип роботи капілярних термічних сенсорів заснований на залежності масової витрати потоку (q_m) від співвідношення теплових характеристик потоку: втрати тепла (Q_h) при проходженні через капілярну трубку та, відповідно, різниці температури (ΔT) потоку на вході та виході з капілярної трубки. Математично залежність витрати потоку, що перебігає, можна записати у вигляді [5]:

$$q_m = \frac{Q_h}{K \cdot C_p \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

де q_m – масова витрата газового потоку; Q_h – втрата тепла потоку, при проходженні через капілярну трубку сенсора; K – коефіцієнт витрати, що залежить від параметрів капілярної трубки сенсора; C_p – питома теплоємність при постійному тиску; ΔT – різниця температури між обмотками капілярної трубки;

Визначення різниці температур потоку на вході та виході капілярної трубки здійснюється за допомогою встановлених на ній резистивних елементів, які виготовлені з спеціального сплаву Resistherm. Резистивні елементи входять до складу вимірювального моста аналітичної частини витратоміра-задавача масової витрати, та підігривають потік на вході та виході з капілярної трубки

(рис. 1 б). За відсутності потоку, вимірювальний міст залишається збалансованим (рис. 2). З появою потоку, виникає різниця температур на резистивних елементах, відповідно, і зміна їх опору, що призводить до розбалансування електричного кола вимірювального моста. Розбалансування кола дозволяє встановити точне значення миттєвої витрати потоку, що проходить через прилад [5].

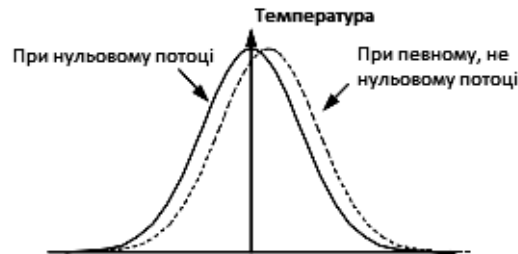


Рис. 2. Різниця температур резистивних елементів капілярного термічного сенсора

Керування потоком у витратомірі-задавачі масової витрати F260 виконується за допомогою термічного клапана [6], який здійснює перекриття каналу для перебігу потоку в основі приладу. Максимальний потік, на який розрахований прилад: 5000 норм. см³/хв.

Дослідження впливу температури на похибку роботи приладу

Для дослідження впливу температури на роботу витратоміра-задавача масової витрати F260 була змонтована експериментальна установка, схема якої відображена на рис. 3.

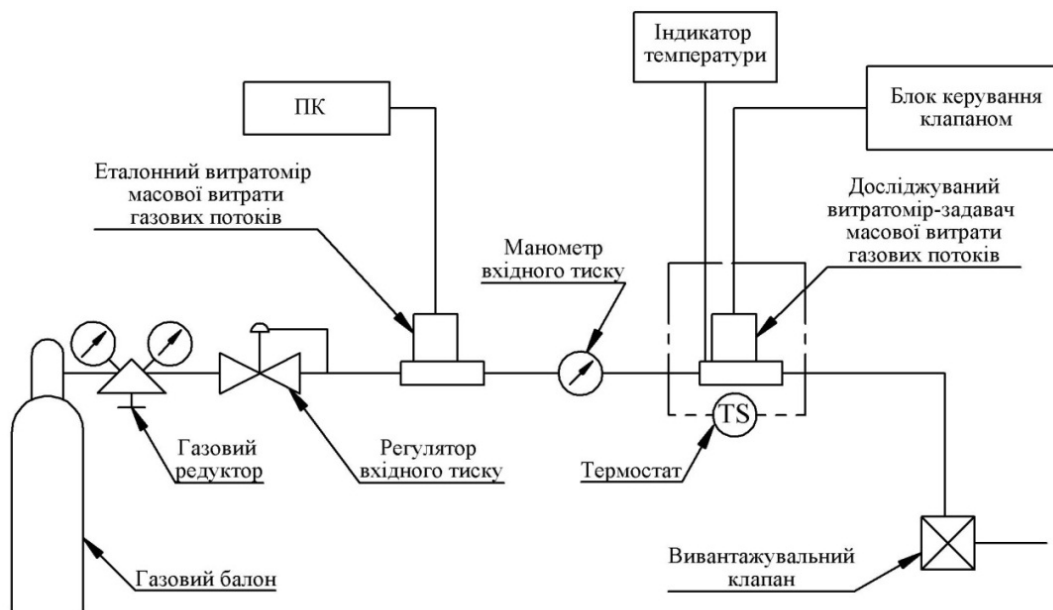


Рис. 3. Експериментальна установка для дослідження впливу зміни температури на роботу витратоміра-задавача масової витрати F260

У експериментальній системі був встановлений еталонний високоточний витратомір Brooks 5863S для визначення зміни витрати. Діапазон вимірювання еталонного витратоміра становили 1500 норм. см³/хв., максимальний тиск може сягати 300 Бар та максимальний диференціальний тиск (між входом та виходом приладу) 100 Бар, зі збереженням точності роботи: $\pm 0,25\%$ від повної шкали [7]. Температура еталонного приладу Brooks 5863S залишалася незмінною протягом всього

експерименту і становила 20°C. В якості досліджуваного приладу використовувався витратомір-задавач масової витрати F260, відкалібрований під максимальну витрату 1400 норм. см³/хв., при температурі 20°C та робочий газ азот. Керування температурою прогрівання досліджуваного приладу здійснювалось за допомогою термостату. Реєстрацію температури виконував індикатор Doric Trendicator 415A.

При подачі газу до системи, за допомогою регулятора тиску встановлювався надлишковий тиск 2 Бар. Під'єднаний до еталонного витратоміра комп'ютер реєстрував витрату в системі. Індикатор температури з'єднувався з основою досліджуваного приладу за допомогою термопари хромель-алюмель. Потік азоту в системі задавався витратоміром-задавачем масової витрати F260. Керування здійснювалось по контрольних точках 25%, 50%, 75% та 100% від максимальної витрати, під яку був відкалібрований досліджуваний прилад. Після проходження через систему, газ потрапляв до атмосфери через спеціально встановлений вивантажувальний клапан.

Результати експерименту

Отримані результати дослідів занесені до табл. 1 у відсотковій залежності. Як зазначалося вище, досліджуваний прилад був відкалібрований при температурі 20°C, а тому значення витрати при цій температурі прийняті за еталонні.

Таблиця 1

Результати експерименту з дослідження впливу зміни температури прогрівання на роботу витратоміра-задавача масової витрати F260

Відхилення від номінального потоку, по контрольним точкам, %	Температура прогрівання приладу, °C													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
100%	0,93	0,71	0,57	0,00	0,07	0,21	0,71	0,93	1,14	2,50	3,14	4,36	5,14	7,86
75%	0,64	0,50	0,29	0,00	0,21	0,29	0,64	0,78	1,07	2,28	2,64	3,57	4,50	6,49
50%	0,86	0,57	0,36	0,00	0,21	0,43	0,50	0,50	0,64	0,93	1,07	1,36	1,57	2,07
25%	0,71	0,36	0,14	0,00	0,28	0,36	0,43	0,64	1,00	1,42	1,71	1,92	1,99	2,21

У результаті зниження температури прогрівання приладу до 5°C відбувається зростання витрати з максимально допустимою похибкою +1% від повної шкали. Подальше охолодження приладу викликає перевищення допустимої похибки витрати.

При зростанні температури прогрівання приладу – можемо відмітити обернену залежність. І при досягненні температури понад 40 °C похибка перевищує допустимий діапазон у $\pm 1\%$ від повної шкали.

На основі встановлених даних можна відзначити, що оптимальне значення витрати з мінімальним відхиленням отримане в інтервалі прогрівання приладу 20–25 °C. Графічно зміну показів приладу від температури прогрівання відображено на рис. 4. Для побудови графіка використовувалось відсоткове співвідношення зміни витрати у контрольній точці керування потоком 75%.

На основі отриманих результатів можемо встановити, що діапазон робочих температур приладу становить 5–40 °C.

Дослідження впливу тиску газового потоку на похибку роботи приладу

Для дослідження похибок роботи приладу, зумовлених зміною тиску робочого газу, експериментальна система була перебудована, згідно з схемою, відображеною на рис. 5. Оцінка впливу зміни тиску потоку на роботу приладу, здійснювалась за допомогою керування та реєстрації надлишкового тиску на вході та виході системи.

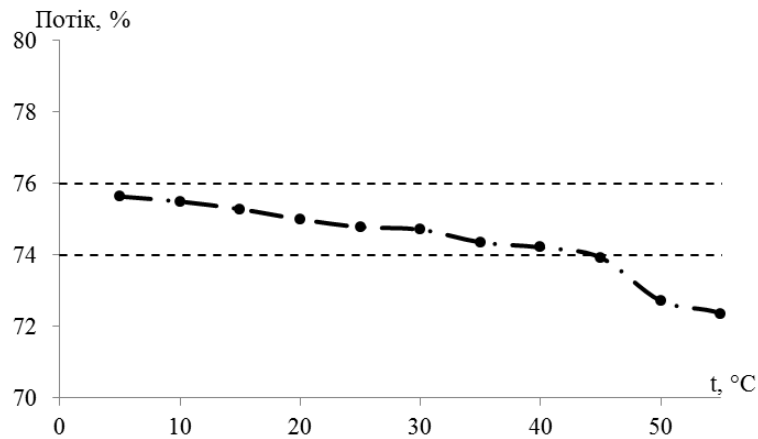


Рис. 4. Графічна залежність витрати газу у системі від температури приладу у контрольній точці 75% від максимальної витрати.

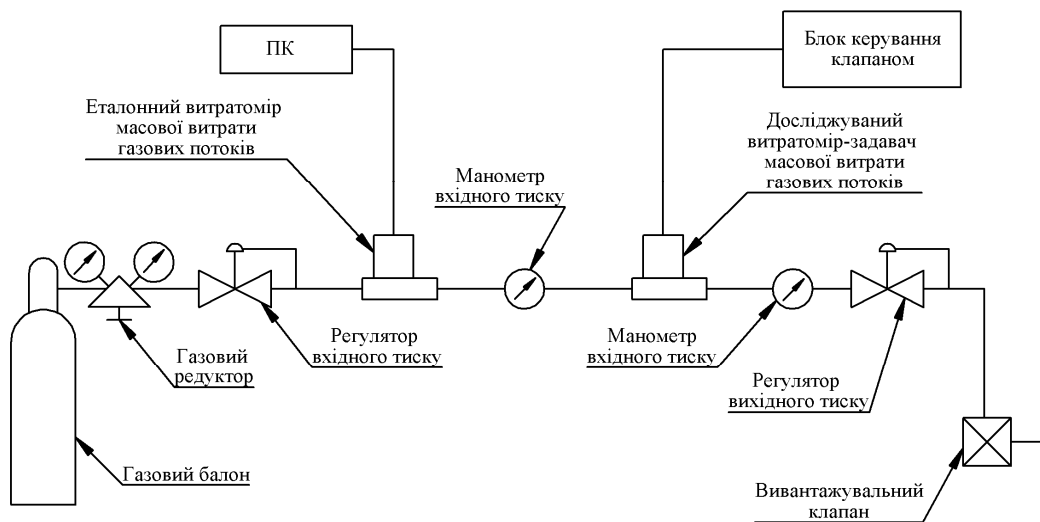


Рис. 5. Експериментальна установка для дослідження впливу зміни тиску робочого потоку на керування витратою за допомогою витратоміра-задавача газових потоків F260

Витратомір-задавач F260 був відкалібрований під максимальну витрату 600 норм. см³/хв., при вхідному надлишковому тиску 2 Бар., та робочий газ азот. Експеримент здійснювався у три етапи, при різних значеннях надлишкового тиску на виході: без встановлення надлишкового тиску на виході, з надлишковим тиском 0,5 Бар та з надлишковим тиском 1 Бар. На кожному етапі встановлювався диференціальний тиск (між входом та виходом приладу) до 3 Бар, з кроком в 0,5 Бар. Реєстрація значення витрати потоку у системі відбувалася після остаточної стабілізації тиску і встановлення стаціонарного потоку.

Результати експерименту

Усереднені результати експерименту занесені до табл. 2, у відсотковому співвідношенні. Оскільки для проведення експерименту досліджуваний прилад був відкалібрований при вхідному надлишковому тиску 2 Бар, значення витрати при цьому тиску прийняті за еталонні.

На основі отриманих результатів можемо відзначити незначну зміну витрати при перепаді тиску робочого газу у системі. Протягом експерименту похибка у витраті потоку не перевищувала встановлений діапазон $\pm 1\%$ від повної шкали.

Залежність витрати від зміни тиску в системі

Відхилення від номінального потоку, по контрольним точкам, %	Диференціальний тиск (між входом та виходом приладу), Бар					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
100%	0,005	0,058	0,150	0,299	0,279	0,267
75%	0,056	0,011	0,146	0,220	0,231	0,237
50%	0,047	0,015	0,142	0,189	0,169	0,202
25%	0,054	0,006	0,084	0,090	0,081	0,111

У середньому похибка становить 0,044% від повної шкали, при зміні тиску на 1 Бар. Графічно зміну середнього значення витрати потоку внаслідок зростання диференціального тиску у системі відображено на рис. 6. Для побудови графіку використовувалось відсоткове співвідношення зміни витрати у контрольній точці 75%.

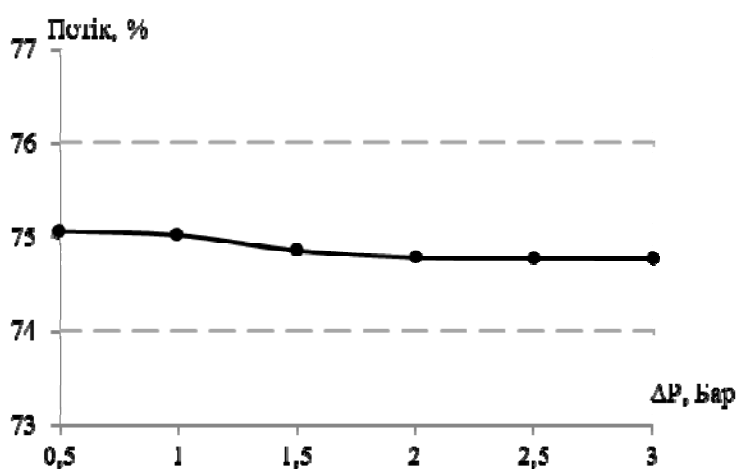


Рис. 6. Графічна залежність впливу зміни тиску робочого потоку на керування витратою за допомогою витратоміра-задавача газових потоків F260

Висновки

На основі результатів проведених досліджень можемо відзначити незначний вплив дестабілізуючих факторів на точність роботи приладу. Діапазон робочих температур витратоміра-задавача масової витрати F260 становить 0–40 °С. При дотриманні цих температурних умов похибка роботи приладу не перевищує ± 1 % від повної шкали. Середнє відхилення в залежності від зміни температури у встановленому робочому діапазоні становить 0,087 % від повної шкали при зміні температури на 1°С. Зміна тиску потоку робочого газу у системі викликає незначні відхилення при дотриманні диференціального тиску (між входом та виходом приладу) у системі. Середнє відхилення залежно від зміни тиску становить 0,044 % від повної шкали при зміні тиску на 1 Бар.

Необхідно відзначити, що для покращення точності роботи, чи адаптації до умов експлуатації витратоміра-задавача масової витрати F260 варто відтворювати умови експлуатації при калібруванні приладу.

1. Hardy J. E. *Flow measurement methods and applications.* / J. E. Hardy, J.O. Hylton, T.E. McKnight, C.J. Remenyik, F.R. Ruppel. – New York : Wiley, 1999. – 255р. 2. Коровицький А.М. Оптимізація технології отримання стабільного плазмового розряду у вакуумній камері ВУП15М при магнетронному напиленні / Коровицький А.М., Коменда Т.І., Калуш О.З., Колядинський І.М.,

Панасюк І.М. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань “Машинобудування та металообробка”, “Інженерна графіка”, “Металургія та матеріалознавство”). Вип. 27. – Луцьк 2010. – С. 147–150. 3. Flokal B.V. – MFC & accessories [електронний ресурс] – 2011р., Режим доступу: http://www.flokal.eu/html/products/mfc260_.htm_4. Nguyen N.T. Micromachined flow sensors – review, *Flow Meas. Instrum.* Vol. 8 (1997) 7–16. 5. Roger C. Baker *Flow measurement handbook : industrial designs, operating principles, performance, and applications* / Roger C. Baker. – Cambridge University Press: 2000 – 521р. 6. Колядинський І.М. Розробка системи клапана для контролера газових потоків F 260 / Колядинський І.М. , Коровицький А.М., Коменда Т.І., Панасюк І.М., Сахарчук В.В. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань “Машинобудування та металообробка”, “Інженерна графіка”, “Металургія та матеріалознавство”). Вип. 31. – Луцьк, 2011. – С. 161–165. 7. Brooks Instrument – Data Sheet DS-TMF-5800S-MFC-eng [електронний ресурс] – 2008 р., Режим доступу: <http://www.brooksinstrument.com/documentation-a-downloads.html?task = finish&cid =23&catid=42>.