

УДК 681.121.001.4

## ЗАДАВАЧ КРАТНИХ МАЛИХ ВИТРАТ ГАЗУ

© Зеновій Теплюх, Ігор Ділай, 2005

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,  
вул. Устияновича, 5, 79013, Львів, Україна

*Описаний пристрій побудований на дроселях з кратними значеннями газодинамічних опорів (провідностей) і призначений для градування і метрологічної перевірки мікровитратомірів та лічильників різних газів, зокрема у системах обліку природного газу.*

*Описано устройство, построенное на дросселях с кратными значениями газодинамических сопротивлений (проводимостей) и предназначенное для градуировки и метрологической поверки микрорасходомеров, а также счетчиков различных газов, в частности в системах учета природного газа.*

*The described device is constructed on capillaries with values of gas-dynamical resistances (conductors) and assigned for calibration and metrological testing of microflowmeters and gas counters, for example, in the systems of natural gas accounting.*

**Вступ.** Економне та ефективне використання матеріальних та енергетичних ресурсів пов'язане з необхідністю застосування якісних методів вимірювання витрат газу (як великих, так і малих), що, своєю чергою, вимагає відповідного метрологічного забезпечення, тобто високоточних пристроїв для задання (відтворення) миттєвої витрати газу. Особливо актуальними є ці питання для обліку природного газу як основного енергоносія в Україні, оскільки відсутність вказаних пристроїв може призводити до неврахування значної кількості енергії, а, отже, і до неправильного визначення вартості відпущеного/одержаного газу. Застосовувані в Україні зразкові засоби часто-густо не відповідають сучасним вимогам щодо точності, діапазонів вимірювання і експлуатаційних характеристик [1].

Для створення якісних пристроїв задання малих витрат газу перспективним є використання як дозувальних елементів різних типів дроселів [2–4]. У цій роботі, яка є продовженням виконаних раніше нами досліджень (див., наприклад [5]), розглянуті питання побудови задавача малих витрат газу, побудованого на капілярних елементах з кратними значеннями газодинамічних опорів.

Метою роботи є розробка універсального, мобільного, практичного і високоточного пристрою для градування і метрологічної перевірки мікровитратомірів та лічильників різних газів, зокрема для витрат на рівні рекомендованих як мінімальні для лічильника та в околі його порогу чутливості.

**Опис задавача.** Пропонований задавач витрати побудований на дозувальних дросельних елементах з різними, але точно заданими значеннями газодинамічного опору, які дають змогу встановити необхідну витрату певною комбінацією цих дроселів. У зв'язку з цим під час побудови такого задавача першочерговими є питання вибору типу дроселя і його розмірів, вибору оптимальної кількості дроселів, забезпечення постійності значення газодинамічного опору і градування дроселів за витратою.

Взагалі такий задавач можна створювати на базі довільних дроселів, проте, на наш погляд, найперспективнішою є побудова задавачів на базі скляних капілярних трубок. Такі елементи мають істотні переваги перед іншими дросельними елементами, зокрема: вони практично не змінюють форми і розмірів прохідного каналу, технологічно монтуються, їх робоча поверхня міцна і гладка, скло є хімічно інертним матеріалом, а крім того, їх газодинамічний опір (ГДО) можна порівняно просто (і плавно) змінювати, змінюючи довжину прохідного каналу.

ГДО капілярної трубки залежить від діаметра прохідного каналу в четвертому степені та від його довжини в першому степені (приблизно), а також від співвідношення цих розмірів. Тому, вибираючи розміри трубки, необхідно виходити із заданої витрати, конструктивної доцільності, необхідності забезпечення ламінарного режиму протікання газу і обмеженості максимальної довжини реальних скляних капілярних заготовок, а також із необхідності забезпечення

достатньо високої чутливості ГДО до зміни довжини трубки. У зв'язку з цим під час побудови дроселя на базі капілярних трубок може виникати необхідність застосовувати замість одного капіляра пакет паралельно з'єднаних капілярів.

Загальна кількість дроселів схеми задавача (тобто окремих капілярів та пакетів капілярів) визначається діапазоном задаваних витрат, необхідною дискретністю зміни витрати і набору значень ГДО дроселів схеми.

Як відомо, ГДО дроселя, крім конструкції та розмірів прохідного каналу, визначається також видом газу і параметрами його стану. Отже, для забезпечення якісних метрологічних характеристик задавача необхідно жорстко стабілізувати вказані параметри, тобто склад газу, а також температуру і абсолютний тиск в прохідних каналах капілярів.

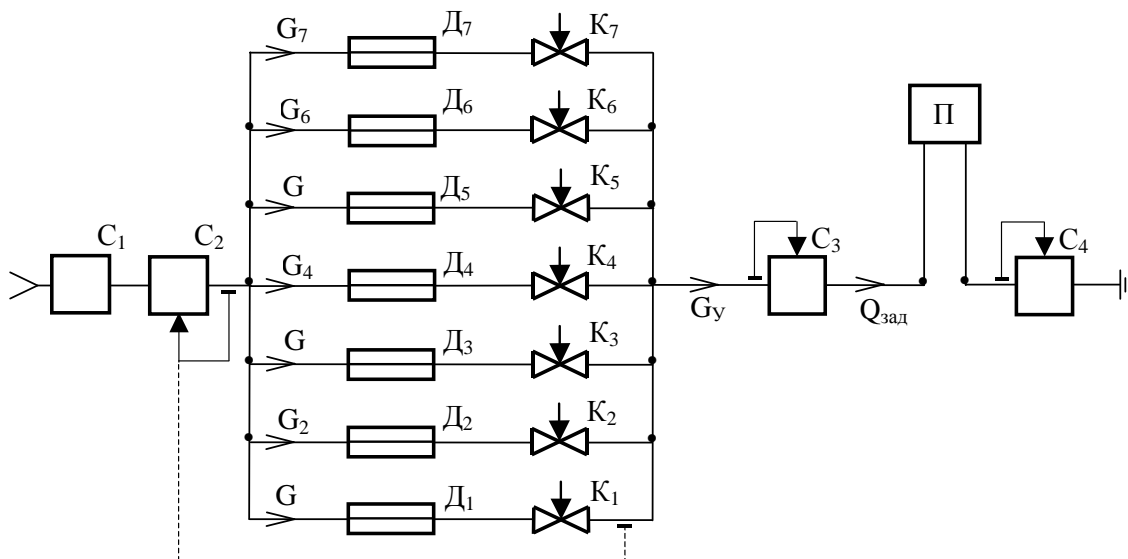
Розроблений нами макет газодинамічного задавача витрати дає змогу змінювати витрату в діапазоні 1...128 л/год з дискретністю 1 л/год. Основа схеми такого пристрою (див. рис.) являє собою паралельне з'єднання вузлів задання витрати, кожен з яких складається з дроселя  $D$  і клапана  $K$ , що дає змогу вмикати/вимикати цей дросель. Дроселі  $D$  виконані або у вигляді окремого капіляра, або у вигляді пакета капілярів. Керовані електрично або іншим способом клапани  $K$  дають змогу дискретно змінювати витрату на виході схеми, а комбінація увімкнених дроселів задає певну витрату. Клапани повинні мати у

відкритому стані ГДО, менший від опору відповідного капіляра принаймні на два-три порядки, а також забезпечувати повну герметичність у закритому стані.

Особливістю схеми є такий підбір опорів дроселів, що об'ємні витрати  $Q_1, \dots, Q_7$  на виході стабілізатора  $C_3$  дорівнюють відповідно 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 л/год, якщо за допомогою клапанів  $K_1, \dots, K_7$  вмикати по черзі відповідні вузли. Газодинамічний опір (і відповідна провідність як величина, обернена до опору) дросельного елемента, що забезпечує мінімальну витрату (1 л/год), визначений як базовий (одиничний). Дозувальні дроселі мають провідності, цілочислово кратні за значенням до вибраного базового. Саме така побудова пристрою дає змогу мінімізувати загальну кількість дроселів схеми.

Вищевказані витрати забезпечують капіляри, прохідні канали яких мають діаметри 0,1...0,4 мм і довжини близько 40...60 мм, що спрощує конструкцію пристрою і робить його порівняно компактним.

Приймач витрати (порівнювальний прилад), тобто зразковий витратомір у разі градування задавача або перевірюваний прилад (витратомір чи лічильник), приєднаний до виходу стабілізатора  $C_3$ . Для забезпечення дотримання вищевказаних витрат  $Q_1, \dots, Q_7$  параметри стану газу в приймачі витрати повинні завжди жорстко відповідати номінальним, тобто номінальним параметрам роботи перевірюваного приладу.



Принципова схема задавача витрат газу з приймачем:  
 $D$  – дросель,  $\Pi$  – приймач,  $C$  – стабілізатор,  $K$  – клапан

Сталість тисків у прохідних каналах задавача забезпечує система стабілізаторів, з яких стабілізатор  $C_1$  підтримує постійний тиск (надлишковий) живлення,  $C_2$  – абсолютний тиск на вході капілярів, стабілізатор  $C_3$  – абсолютний тиск на виході капілярів, а стабілізатор  $C_4$  – абсолютний тиск у приймачі витрати. Практично  $C_1$  являє собою редуктор–стабілізатор тиску,  $C_2$  – стабілізатор абсолютного тиску “після себе” або стабілізатор перепаду тисків (додаткова імпульсна пунктирна лінія на схемі), а  $C_3$  і  $C_4$  – стабілізатори абсолютного тиску “до себе”.

Всі елементи задавача, а також приймач точно витрати поміщені у високоточний термостат для уникнення зовнішніх теплових впливів.

**Методика задання витрати.** Кожен  $i$ -й вузол (дросель–клапан) окремо задає через приймач об’ємну витрату  $Q_i$ , яка визначається залежністю

$$Q_i = 2^{i-1} \text{ л/год} = 2^{i-1} \cdot 10^{-6} / 3,6 \text{ м}^3 / \text{с}; \quad i = \overline{1,7}. \quad (1)$$

Відповідна до витрати  $Q_i$  масова витрата  $G_i$  через  $i$ -й дросель, необхідна для підбору його конструкції, може бути визначена із залежності

$$G_i = Q_i \cdot \rho_p, \quad (2)$$

де  $\rho_p$  – густина газу в приймачі (тобто для тиску  $P_p$  і температури  $T_p$ ).

Для задання певної витрати  $Q_{зад}$  через приймач необхідно зробити вибірку  $n$  елементів (витрат) з набору  $Q_i$  так, щоб сума вибраних елементів утворила  $Q_{зад}$ , тобто

$$Q_{зад} = \sum_{j=1}^n Q_j, \quad (3)$$

де  $Q_j$  – вибрані елементи, тобто витрати через відповідні  $j$ -ті вузли.

Вибірку можна здійснити  $n$ -разовим розрахунком залежності

$$Q^{(k)} = Q^{(k-1)} - Q_i^{\max};$$

$$Q^{(0)} = Q_{зад}; \quad Q_i^{\max} \leq Q^{(k-1)}; \quad k = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Застосовуючи цю залежність на першому кроці для  $Q^{(0)} = Q_{зад}$ , вибирають  $Q_i^{\max}$  і визначають  $Q^{(1)}$ , на другому кроці отримують нове  $Q_i^{\max}$ ,  $Q^{(2)}$  і так продовжують доти, доки  $Q^{(k+1)} = 0$ . Визначені  $n$

значень  $Q_i^{\max}$  (а також елементи  $i$ ) складають вибірки з відповідних наборів ( $Q_i$  та  $i$ ).

Так, для  $Q_{зад} = 49$  отримуємо:  $Q^{(1)} = 49 - 32 = 17$ ;  $Q^{(2)} = 17 - 16 = 1$ ;  $Q^{(3)} = 1 - 1 = 0$ . Звідси вибірки мають вигляд  $Q_i = \{32, 16, 1\}$  та  $i = \{6, 5, 1\}$ . Отже, для встановлення через приймач витрати 49 л/год необхідно відкрити клапани  $K_6$ ,  $K_5$  та  $K_1$ .

**Розрахунок та підгонка капілярів задавача.** Попередній підбір капілярів здійснюють розрахунково (похибка до 2%) з витратної характеристики капіляра, яка має вигляд [6,7]:

$$G = A \cdot (\sqrt{Z+1} - 1), \quad (5)$$

де  $G$  – масова витрата газу;  $A = 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot l / m$  – коефіцієнт витрати капіляра;  $\mu$  – динамічна в’язкість газу при температурі  $T$  газу;  $l$  – довжина прохідного каналу капіляра;  $m$  – коефіцієнт кінцевих ефектів капіляра;  $Z = Y \cdot B$  – комплекс розмірів прохідного каналу і параметрів газу в ньому;  $Y = K \cdot X$  – комплекс розмірів каналу, параметрів виду газу і температури;  $K = m \cdot d^4 / l^2$  – конструктивний комплекс капіляра;  $d$  – діаметр прохідного каналу капіляра;  $X = 1 / (512 \cdot R_T \cdot T \cdot \mu^2)$  – параметричний комплекс газу;  $R_T$  – газова стала;  $B = P_1^2 - P_2^2$  – комплекс тисків;  $P_1$  і  $P_2$  – тиск газу на вході й на виході капіляра відповідно.

З (4) можна отримати формули для визначення діаметра і довжини прохідного каналу капіляра у вигляді

$$d = a_d \cdot [(G/A + 1)^2 - 1]^{1/4}; \quad (6)$$

$$l = a_l \cdot W \cdot d^4 / G - b_l \cdot G, \quad (7)$$

де

$$a_d = [l^2 / (m \cdot W)]^{1/4}; \quad a_l = 2 \cdot \pi \cdot \mu;$$

$$b_l = \frac{m}{4 \cdot a_l}; \quad W = X \cdot B.$$

Для проектування капіляра на необхідну кратну витрату  $G$  (або  $Q$ ) задають доцільну довжину  $l$  і з допомогою (6) визначають розрахунковий діаметр  $d$  капіляра. Далі підбирають найближчу за номінальним діаметром капілярну трубку і для цього номінального діаметра за допомогою (7) визначають розрахункову довжину  $l$  капіляра. Оскільки нарощувати довжину капілярної трубки неможливо, підгонку здійснюють

лише її скороченням (відламуванням, підпилюванням, шліфуванням тощо). У зв'язку з наявністю неконтрольованих відхилень діаметра щодо номінального, а також неточністю залежності (5) придатний для підгонки до заданої витрати капіляр отримують відламуванням від заготовки дещо довшого капіляра, ніж розрахований за (7).

Остаточну підгонку капіляра до заданої витрати здійснюють підпилюванням (шліфуванням) його торця з одночасним контролем витрати газу через нього або його газодинамічного опору.

Точно підігнати (проградувати) дросельні елементи можна за допомогою високоточного плівкового витратоміра [8]. Сумарна похибка вимірювання такого витратоміра може не перевищувати 0,06 %, зокрема для метану під тиском, близьким до атмосферного, проте у зв'язку з необхідністю вимірювань витрат, які значно відрізняються за величиною, такий підбір може вимагати застосування кількох витратомірів з різними діапазонами вимірювання.

Другий спосіб градування дросельних елементів полягає у підбиранні за допомогою плівкового витратоміра тільки одного з дроселів задавача (або якоїсь частини з них), а решта дроселів підбирають встановленням відповідного співвідношення газодинамічних опорів дроселів у каналах. Точну підгонку кратних опорів здійснюють за допомогою спеціального пристрою для встановлення рівності газодинамічних опорів [9]. Цей пристрій дає змогу підігнати опір двох дроселів (або кількох паралельно з'єднаних дроселів і окремого дроселя) з дуже високою точністю, наприклад, відносна похибка відхилення газодинамічних опорів підібраних капілярних трубок може не перевищувати 0,001 % [10]. Таким способом встановлене співвідношення провідностей дроселів схеми визначає і точно встановлене значення заданих витрат.

У цьому задавачі для градування дроселів на витрати 1, 2, 4 л/год можна застосовувати плівковий витратомір, оскільки чутливість до зміни витрати через відповідні капіляри при їх скороченні становить 1,9...1,7 %/мм, а для капілярів на більші витрати є недостатньою для плівкового витратоміра. У зв'язку із цим дроселі на витрату  $Q \geq 8$  л/год доцільно будувати у вигляді пакета капілярів, до складу якого входить капіляр на  $Q \leq 4$  л/год для доведення до потрібної витрати через цілий пакет. Градування таких пакетів доцільно виконувати за допомогою пристрою для встановлення рівності газодинамічних опорів.

**Оцінювання похибок.** На значення витрати на виході запропонованого задавача істотний вплив можуть чинити температура і тиск газу.

Температура газу у задавачі залежить від температури довкілля і газу живлення. Тому температура в приміщенні повинна підтримуватися сталою, наприклад, на рівні  $22 \pm 2$  °С, температура газу живлення має бути доведена до температури приміщення (наприклад, витримкою у цьому приміщенні не менше від доби), температура всередині корпусу задавача має бути стабілізована з точністю  $\pm 0,2$  К, має бути забезпечений достатній для доведення температури газу живлення до рівня температури всередині корпусу задавача теплообмін між потоком газу та повітрям в задавачі. Система термостабілізації включає в себе високостабільний термометр з похибкою  $\pm 0,05$  К, позиційний регулятор температури, нагрівний елемент, вирівнювач температури (вентилятор) і теплообмінник.

До основних чинників впливу належать також зміни тиску живлення газу, тиску у приймачі, а також барометричного тиску. Задача знешкодження цих факторів розв'язана за допомогою системи стабілізування абсолютних тисків на входах і на виходах дроселів, та у приймачі, побудованої на базі стабілізаторів тисків, наприклад, типу СДГ, САД, СПД [11]. Крім того, вибір стабілізаторів повинен передбачати можливість компенсації змін стабілізованих тисків внаслідок зміни витрати газу [12].

Оцінювання похибок задавача було виконане з включенням похибки плівкового витратоміра, похибок підгонки опорів дроселів однакового опору, а також з урахуванням похибок впливу завод. Так, зокрема, відносна похибка задання витрати не перевищує 0,2 %, а відтвореність – 0,05 %.

**Висновки.** Запропонований задавач має високі метрологічні та експлуатаційні властивості і може бути використаний, зокрема, для метрологічного забезпечення мікровитратомірів та лічильників різних газів.

Визначальною особливістю задавача є його побудова на базі дроселів з кратними значеннями газодинамічних опорів.

1. Яковлев В. И др. Автоматизированная установка для проверки счётчиков газа // *Вісник НУ № 452, 2002. С. 189–194.* 2. Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количества.* – Л. 1989. 3. Френкель Б.А. *Измерение расхода жидкостей и газов в малотоннажных производствах и на экспериментальных установках.* – М. 1989. 4. Дебрянська Р.,

Стасюк І. Газодинамічні задавачі-витратоміри в системі метрологічного забезпечення побутових лічильників кількості газу // Вісник НУ № 476, 2003. С. 32–36. 5. А. с. 1325420 СССР, МКІ<sup>4</sup> G05D 7/01. Задатчик-стабілізатор малых и микро-расходов газа / Е.П. Пистун, И.Д. Стасюк, З.Н. Теплюх – № 4032745/24-24; Заявл.05.03.86; Опубл.23.07.87, Бюлл. №27. 6. Пистун Е.П., Стасюк И.Д., Теплюх З.Н. Исследование расходных характеристик дроссельных элементов измерительных устройств // Контрольно-измерительная техника. Вып. 38. Львов, 1985, с.44-46. 7. Теплюх З.М. Розрахунок ламінарного подільника тиску // Вісник ДУ “Львівська політехніка” №273, – 1993, – С. 42–44. 8. Теплюх З.М., Парнета О.З. Високоточний

плівковий витратомір // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 506. 2004. С. 275–282. 9. Теплюх З., Пистун Є., Ділай І. Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // Вимірювальна техніка та метрологія. Вып. 59. – 2002, – С. 178...182. 10. Івахів О.В., Теплюх З.М. Підгонка опору дроселів за допомогою газодинамічного моста // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 475, 2003, С. 15–21. 11. Прохоров В.А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств. – М. 1984. 12. Пистун Е.П., Теплюх З.Н., Брылинский Р.Б. Исследование погрешностей стабилизаторов абсолютного давления в газоанализаторах // Контрольно-измерительная техника. Вып. 40. Львов, 1986. С.23–27.

УДК 621.391.1

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЧАСТОТНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ

© Олег Куцевол, Микола Куцевол, Володимир Поджаренко, 2005

Вінницький національний технічний університет,  
вул. Хмельницьке шосе, 95, 286021, Вінниця, Україна

*Розроблено математичну модель частотної залежності тангенса кута діелектричних втрат зерна пшениці.*

*Разработана математическая модель частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь зерна пшеницы.*

*The mathematical model of a frequency dependence of loss angle of a grain wheat is designed.*

Визначення апроксимувальної функціональної залежності за наявності ряду випадкових значень  $X$  та  $Y$  з мінімальною похибкою апроксимації – це одна з важливих задач метрології та техніки вимірювання.

Сучасна техніка вимірювання вимагає подання основних метричних характеристик засобу вимірювання у вигляді стандартної функціональної залежності. Відомо [3], що в ідеальному випадку математична модель може бути подана у вигляді лінійного рівняння:

$$Y = k \cdot X,$$

де  $X$  – вхідний сигнал засобу вимірювання;  $Y$  – вихідний сигнал засобу вимірювання;  $k$  – коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача.

За рахунок наявності адитивної похибки  $\pm \Delta_\alpha$  у реальному засобі вимірювання функція перетворення (математична модель) буде вже подана у вигляді залежності:

$$Y = k \cdot X \pm \Delta_\alpha.$$

Значення відносної адитивної похибки у такому разі буде виглядати як гіперболічна залежність:

$$\delta_\alpha = \frac{\Delta_\alpha}{X},$$

з якої можна бачити, що відносна адитивна похибка зростає у разі зменшення абсолютного значення  $X$ . Своєю чергою, наявність мультиплікативної похибки призводить до зміни крутості функції перетворення засобу вимірювання:

$$Y = (k \pm \alpha) \cdot X.$$

де  $\pm \alpha \cdot X$  – абсолютна мультиплікативна похибка.

Реальний засіб вимірювання має одночасно дві складові похибки: адитивну і мультиплікативну [6].

Під час вивчення похибки пристрою виникає проблема окремого визначення адитивної і мультиплікативної складових похибки. Для цього функцію перетворення подають у вигляді залежності:

$$Y = (k \pm \alpha) \cdot X \pm \Delta_\alpha,$$

з якої абсолютна сумарна похибка має вигляд:

$$\Delta_\Sigma = \pm \alpha \cdot X \pm \Delta_\alpha,$$

а відносна:

$$\delta_\Sigma = \pm \alpha \pm \frac{\Delta_\alpha}{X}.$$