

*І.В. ДЛАЙ*, канд. техн. наук,  
*З.М. ТЕПЛУХ*, д-р техн. наук, НУ "Львівська політехніка"

## **ПРИСТРІЙ З НУЛЬ-ИНДИКАТОРОМ ПОТОКУ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДРОСЕЛІВ З РІВНИМИ ОПОРАМИ**

Исследованы чувствительность дроссельной мостовой схемы с нуль-индикатором потока в выходной диагонали к изменению длины проходного канала подбираемого капиллярного элемента и условия достижения её максимального значения при изготовлении дросселей с равными газодинамическими сопротивлениями.

The throttling bridge circuit sensitivity with null-indicator of flow in the exit diagonal to straightway canal length change of fitted capillary element and conditions of receiving its maximum value for production throttles with equal resistance are investigated.

### **Висвітлення проблеми**

Дроселі з певним значенням газодинамічного опору (ГДО) застосовують у вимірювальній техніці, системах життєзабезпечення, а також для неперервного дозування газів у різних технологічних процесах [1-3]. Визначати ГДО дроселя можна розрахунковим шляхом [4], проте точність такого визначення є низькою (похибка може складати десятки відсотків), що пов'язане передовсім з похибками визначення розмірів прохідного каналу дроселя і параметрів газу. Відомі також різні пристрої для вимірювання ГДО, побудовані переважно з використанням непрямих методів, наприклад, з допомогою вимірювання тисків і витрат [5]. Хоч похибка вимірювання ГДО такими пристроями може бути набагато меншою, ніж при розрахунковому методі, все ж таки здебільшого точність є недостатньою. Важливо відзначити також, що визначення абсолютного значення ГДО дроселя ускладнене через відсутність як теорії таких опорів і загальноприйнятих одиниць вимірювання, так і зразкових дроселів. У зв'язку з вказаним у пневмоавтоматиці віддають перевагу різним пристроям, в яких значення ГДО досліджуваного дроселя оцінюється відносно вибраного опорного (базового) дроселя [6, 7].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для побудови високоточних пристроїв вимірювальної техніки, зокрема, синтезаторів газових сумішей заданого складу, задавачів витрати газу-носія в хроматографах, доцільним є застосування дозуючих елементів з однаковими (кратними) газодинамічними опорами чи провідностями [8, 9]. При цьому слід відзначити новизну і перспективність такого підходу, оскільки дотепер відомі лише намагання застосувати однакові за розмірами прохідних каналів дроселі [2], що не могло забезпечити високої точності дозування рівних витрат газів оскільки в реальних капілярах форма прохідного каналу є нециліндричною і відхилення діаметра в різних точках каналу може перевищувати 10%. Одержання рівноопорних дроселів з найвищою точністю може забезпечити пристрій,

побудований на базі зрівноваженої дросельної мостової схеми [10], з допомогою якого можна підбирати довільну кількість дроселів з рівними ГДО. Найменшу похибку підбору дросельного елемента (капіляра) з опором, рівним опорю базового дроселя, можна отримати за умови максимальної чутливості мостової схеми, яка залежить переважно від розмірів прохідних каналів інших дроселів моста [11]. У роботі [12] показана можливість оптимізації моста за критерієм мінімуму похибки одержання дроселів з рівними ГДО для двох типів показників рівноваги (нуль-індикаторів перепаду тисків і потоку). Умови досягнення найвищої чутливості (до скорочення капіляра) мостової дросельної схеми з нуль-індикатором перепаду тисків у вихідній діагоналі досліджені в роботі [13]. Пропонована стаття є продовженням і розвитком цих досліджень.

**Метою роботи** є дослідження і оптимізування дросельної мостової схеми з нуль-індикатором потоку у вихідній діагоналі за критерієм мінімуму похибки одержання дроселів з рівними газодинамічними опорами.

### **Опис пристрою і моделювання**

Для підбору потрібної кількості рівноопорових дроселів, як уже вказувалося, доцільно застосовувати пристрій, побудований на основі зрівноваженої дросельної мостової схеми, обладнаної у зв'язку з особливостями ГДО дроселів (стискуваність газу, різне співвідношення втрат від в'язкісного тертя та кінцевих ефектів) засобами для стабілізування температури та абсолютних тисків у всіх елементах пристрою [10]. При цих же значеннях вказаних параметрів стану, які задані у пристрої для підбору рівноопорових дроселів, підібрані дроселі повинні працювати у виготовлених газодинамічних пристроях (задавачах, синтезаторах тощо).

Мостова схема пристрою для підбору дроселів у спрощеному представленні [12] містить чотири дроселі  $D_1, \dots, D_4$  і показник рівноваги НІ (нуль-індикатор) у вихідній діагоналі  $a-b$ , який виявляє наявність або відсутність потоку газу, що свідчить відповідно про розбаланс чи рівновагу схеми. Як нуль-індикатор можна застосовувати високочутливий мікровітратомір з мінімальним об'ємом камер, наприклад, об'ємний з рідинним поршнем (плівкою чи стовпчиком рідини), вихідним сигналом якого є переміщення такого рідинного поршня [14] або малоінерційний термоанемометр [15]. Така схема може бути використана для отримання дроселів з рівними опорами (провідностями) довільному з дроселів  $D_1, \dots, D_4$  схеми, тобто як вхідних за напрямком протікання газу в дроселях ( $D_1, D_3$ ), так і вихідних дроселів ( $D_2, D_4$ ).

Процедура одержання дроселів з рівними опорами передбачає кілька етапів: підбір капілярів для побудови моста; первинне зрівноваження моста; заміщення базового дроселя підбираним; зрівноваження схеми нововстановленим дроселем.

Підбір капілярів для побудови моста полягає у виборі номінальних довжин  $l$  та діаметрів  $d$  прохідних каналів усіх капілярів моста. Діаметри каналів

повинні забезпечувати відповідні витрати і можуть бути довільними, проте доцільніше (з точки зору практики) вибирати всі капіляри (як моста, так і капіляри для отримання заміщуваних рівноопорових дроселів) однакового діаметра. Вибір довжини  $l$  та діаметра  $d$  виготовлюваних рівноопорових капілярів визначається умовами їх застосування, а вибором довжин інших трьох капілярів необхідно забезпечити початкову рівновагу моста і достатню чутливість його до скорочення підбираного капіляра. При цьому для забезпечення початкового рівноважного стану схеми довжини дроселів  $D_1$  і  $D_3$ , а також  $D_2$  і  $D_4$  треба брати попарно рівними. Правильний підбір капілярів повинен забезпечувати близький до рівноважного стан моста.

Первинне зрівноваження схеми здійснюють скороченням (підпилюванням, шліфуванням торця) довжини одного або обох капілярів подільника (подільників) доти, поки нуль-індикатор зафіксує відсутність потоку газу у вихідній діагоналі  $a-b$ , що свідчить про рівновагу схеми. Щойно тоді міст є готовий до виготовлення дроселів з однаковим ГДО.

Процес заміщення полягає в тому, що на місце одного з дроселів  $D_1, \dots, D_4$  встановлюють дросель з опором дещо більшим від опору дроселя, який заміщають. Оскільки найпростіше взяти нововстановлюваний (підбираний) дросель з діаметром, рівним діаметру заміщуваного дроселя, то довжина нововстановлюваного дроселя має бути дещо більшою, наприклад на 1-2 мм, ніж довжина заміщуваного (базового) дроселя.

Останній етап процедури одержання дроселя з опором, рівним опору заміщуваного дроселя, полягає у зрівноваженні схеми шляхом скорочення вказаним способом нововстановленого дроселя до відновлення попереднього стану рівноваги.

Нехай, як приклад, потрібно виготовити дросель з опором, рівним опору  $R_1$  дроселя  $D_1$ . Для цього у попередньо зрівноважену схему на місце  $D_1$  ставлять капіляр з опором  $\check{R}_1$  дещо більшим за  $R_1$ , тобто  $\check{R}_1 = R_1 + \Delta R_1$ , де  $\Delta R_1$  - відхилення (фактично перевищення) від опору  $R_1$ , яке визначається в основному недосконалістю розрахункової моделі або експерименту, а також недосконалістю форми каналів капілярів. При цьому дроселі  $D_2, D_3, D_4$  залишаються незмінними. Заміна капіляра з опором  $R_1$  на капіляр з опором  $\check{R}_1$  викликає розбаланс схеми, тобто появу витрати  $q$  у вихідній діагоналі, що зафіксує нуль-індикатор. Далі незначним поступовим скороченням довжини  $l_1$  капілярного елемента з початковим опором  $\check{R}_1$  знову зрівноважують схему, тим самим зменшуючи  $\Delta R_1$  до значення, яке визначається порогом чутливості моста, який у свою чергу залежить від чутливості  $S_{cx}$  дросельної схеми моста. Оскільки похибка виготовлення капілярних трубок з однаковим ГДО з допомогою такого моста суттєво залежить від його чутливості до скорочення довжини прохідного каналу капілярної трубки, то важливо проаналізувати від чого залежить ця чутливість і на основі цього розробити рекомендації щодо оптимізування дросельної мостової схеми.

Газодинамічний міст пристрою фактично складається з двох послідовно

з'єднаних перетворювачів – дросельної схеми та показчика рівноваги, кожен з яких має свою чутливість. Враховуючи це для чутливості газодинамічного моста можемо записати співвідношення

$$S_M = S_{cx} \cdot S_n, \quad (1)$$

де:  $S_M = dv / dl$  – чутливість моста;  $v$  – вихідний сигнал показчика рівноваги (переміщення вказівника показчика, цифровий відлік тощо);  $l$  – довжина капіляра, ГДО якого потрібно підігнати;  $S_{cx} = dq / dl$  – чутливість дросельної схеми;  $S_n = dv / dq$  – чутливість показчика рівноваги.

Чутливість  $S_n$  показчика рівноваги є величиною, яка визначається типом вибраного нуль-індикатора, тобто є фактично заданою. Тому, як випливає з (1), максимальна чутливість  $S_M$  моста може існувати лише за умови досягнення максимальної чутливості  $S_{cx}$  дросельної схеми. У зв'язку з цим постає задача оптимального вибору параметрів схеми.

Аналіз чутливості  $S_{cx}$  дросельної схеми вимагає побудови математичної моделі моста з проточним каналом у вихідній діагоналі [16]. При цьому слід нагадати, що у незрівноваженому стані існує перетік газу з однієї міждросельної камери в іншу, тобто зміна довжини  $l$  підбираного капіляра призводить до зміни тисків  $P_a$  і  $P_6$ , а відповідно і до зміни величини (або і напрямку) потоку у вихідній діагоналі моста, тобто модель моста має враховувати опір  $R_{a6}$  показчика рівноваги. Для спрощення аналізу замістимо нуль-індикатор витрати  $q$  у вихідній діагоналі моста капіляром  $D_5$ , що цілком допустимо оскільки перепад  $\Delta P_{a6} = P_a - P_6$ , а відповідно і витрата  $q$  є малими.

На основі закону збереження маси (масової витрати  $G$  через капіляр [17]) для вузлів  $a$  і  $b$  схеми маємо:

$$\left. \begin{aligned} G_1 + q &= G_2; \\ G_3 - q &= G_4; \\ q &= G_5. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де:  $G_i = A_i \cdot (\dot{Z}_i - 1)$ ;  $A_i = a \cdot l_i$ ;  $a = 4\pi\mu / m$ ;  $\dot{Z}_i = (1 + Z_i)^{1/2}$ ;  $Z_i = Y_i \cdot B_i$ ;

$$Y_i = K_i \cdot X; K_i = m d_i^4 / l_i^2; i = \overline{1,5}; X = (512 \Re T \mu^2)^{-1};$$

$$B_1 = P_1^2 - P_a^2; B_2 = P_a^2 - P_2^2; B_3 = P_1^2 - P_6^2; B_4 = P_6^2 - P_2^2; B_5 = P_6^2 - P_a^2.$$

Математична модель такого моста є системою трьох нелінійних рівнянь з трьома невідомими ( $q$ ,  $P_a$  і  $P_6$ ). Оскільки із цієї системи вираз для вихідного сигналу ( $q$ ) схеми не можна представити у явному вигляді, то для одержання аналітичного виразу чутливості  $S_{cx}$  застосуємо відоме правило:

$$S_{cx} = \frac{\partial q}{\partial P_a} \cdot \frac{\partial P_a}{\partial l} + \frac{\partial q}{\partial P_6} \cdot \frac{\partial P_6}{\partial l}. \quad (3)$$

Враховуючи нелінійність опорів дроселів слід окремо розглянути чутливості  $S_{cx}$  для вхідних і вихідних дроселів.

Для всіх представлених нижче прикладів моделювання чутливості  $S_{cx}$  моста прийнято, що робочим середовищем є азот; температура  $T$  всіх елементів схеми стабілізована на рівні 300 К; тиск  $P_1$  на вході моста рівний 180 кПа, а на виході -  $P_2 = 120$  кПа; діаметри прохідних каналів дроселів у плечах моста  $d_1 = \dots = d_4 = 0,15$  мм. Про інші умови чи параметри для кожного випадку вказано додатково.

### Дослідження чутливості підбору вхідних капілярів

В разі підбирання дроселів з ГДО рівним опорю капіляра  $D_1$  чутливість  $S_{cx1}$  мостової схеми має вигляд

$$S_{cx1} = \frac{\partial q}{\partial P_a} \cdot \frac{\partial P_a}{\partial l_1} + \frac{\partial q}{\partial P_6} \cdot \frac{\partial P_6}{\partial l_1}. \quad (4)$$

Вирази для  $\partial q / \partial P_a$  і  $\partial q / \partial P_6$  одержані із третього рівняння системи (2) мають вигляд

$$\frac{\partial q}{\partial P_a} = -\frac{A_5^2 \cdot Y_5}{q + A_5} \cdot P_a; \quad \frac{\partial q}{\partial P_6} = \frac{A_5^2 \cdot Y_5}{q + A_5} \cdot P_6. \quad (5)$$

Вирази для  $\partial P_a / \partial l_1$  і  $\partial P_6 / \partial l_1$  можна одержати диференціюванням перших двох рівнянь системи (2) відносно довжини  $l_1$  прохідного каналу підбираного дроселя і розв'язуванням одержаної системи двох лінійних алгебраїчних рівнянь відносно цих похідних у вигляді:

$$\partial P_a / \partial l_1 = F \cdot (H + h_5); \quad (6)$$

$$\partial P_6 / \partial l_1 = F \cdot h_5, \quad (7)$$

$$\text{де } F = \left( \frac{G_1}{l_1} - \frac{a A_1 Z_1}{G_1 + A_1} \right) \cdot [P_a \cdot H \cdot (H + 2h_5)]^{-1}; \quad H = \frac{A_1^2 \cdot Y_1}{G_1 + A_1} + \frac{A_2^2 \cdot Y_2}{G_2 + A_2}; \quad h_5 = A_5^2 \cdot Y_5.$$

$$P_a = \left[ \frac{P_1^2 \cdot d^4 + P_2^2}{V} + \frac{2(I-1)}{Y_2 \cdot V^2} \cdot \left( W - \left[ W^2 + Y_2 \cdot V \cdot d^4 \cdot (P_1^2 - P_2^2) \right]^{1/2} \right) \right]^{1/2}, \quad (8)$$

де  $I = l_1 / l_2$ ;  $d = d_1 / d_2$ ;  $V = 1 + d^4$ ;  $W = I + d^4$ .

Залежності (6) і (7) представлені з врахуванням того, що схема перебуває в стані рівноваги, для якого  $G_1 = G_3$ ,  $G_2 = G_4$ ,  $A_1 = A_3$ ,  $A_2 = A_4$  і  $P_a = P_6$ , тобто чутливість  $S_{cx1}$  визначається значенням похідної від  $q(l_1)$  в точці рівноваги моста. Оскільки в збалансованій схемі немає потоку у вихідній діагоналі, то в цьому стані схему можна розглядати як утворену двома однаковими подільниками тиску ( $D_1$ - $D_2$  і  $D_3$ - $D_4$ ), в яких значення міждросельного тиску  $P_a$  описується залежністю (8) [17].

Аналітична залежність чутливості  $S_{cx1}$  до зміни довжини  $l_1$  підбираного капілярного елемента отримана після підстановки виразів (5)-(7) в (4) має вигляд

$$S_{cx1} = a \cdot \left[ 1 - \zeta_1^{-1} \right] \cdot \left[ \frac{l_5}{d_5^4} \cdot \left[ \frac{d_2^4}{l_2} \cdot \frac{d^4}{l \cdot \zeta_1} + \frac{d_1^4}{l_1} \cdot \frac{l}{d^4 \cdot \zeta_2} \right] + 2 \right]^{-1} \quad (9)$$

Формула (9) відображає залежність чутливості  $S_{cx1}$  мостової схеми від розмірів прохідних каналів капілярів  $D_1, \dots, D_4$ , тисків  $P_1, P_2$  живлення моста, температури  $T$  і параметрів  $M, \mu$  газу. Дослідження показують, що  $S_{cx1}$  сильно залежить від співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів та тисків живлення і мало залежить від виду газу (параметричного комплексу  $X$ ). Вибір тисків живлення є обмеженим (умовами використання підібраних дроселів, наявністю ламінарного потоку в капілярі та іншими факторами), тому співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів є основними факторами, які впливають на чутливість мостової схеми. На рис. 1, *a-3, a* на базі залежності (9) представлено графіки залежності чутливості  $S_{cx1}$  від співвідношення довжин дроселів моста (капіляри усіх плечей моста мають однакові діаметри прохідних каналів).

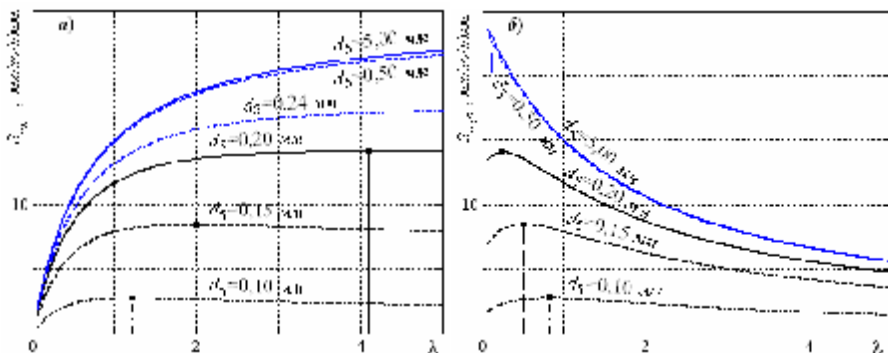


Рис. 1. Залежність чутливості  $S_{cx}$  від співвідношення  $\lambda = l_1/l_2 = l_3/l_4$  довжин капілярів моста для різних діаметрів  $d_5$  прохідного каналу протічного елемента при підбиранні: *a* – вхідних дроселів схеми ( $l_1 = l_5 = 60$  мм); *б* – вихідних дроселів схеми ( $l_2 = l_5 = 60$  мм)

Як видно із рис. 1,  $S_{cx1}$  сильно залежить як від параметра  $\lambda$ , так і від діаметра  $d_5$  прохідного каналу капіляра у вихідній діагоналі моста, при цьому їх зростання призводить до зростання абсолютного значення чутливості та зміщення його максимального значення вправо. Так наприклад, максимальні значення чутливостей схеми та оптимальні значення співвідношення довжин  $\lambda$  для  $d_5 \in \{0,10; 0,15; 0,20; 0,24\}$  мм відповідно складають  $S_{cx1} \in \{2,72; 8,47; 14,07; 17,60\}$  (мг/год)/мм та  $\lambda \in \{1,22; 2,01; 4,11; 9,42\}$ , а відповідні значення довжин вихідного капіляра  $l_2 \in \{49,18; 29,89; 14,62; 6,37\}$  мм. Із графіків випливає, що для досягнення найбільшої чутливості величина  $\lambda$  має бути максимально можливою (реально це відповідає довжині  $l_2$

прохідних каналів вихідних дроселів на рівні 4-6 мм), а діаметр  $d_5$  має бути більшим за 0,5 мм.

Графіки  $S_{cx1}=f(\lambda)$ , незважаючи на конструктивний характер співвідношення  $\lambda$ , не охоплюють усього можливого діапазону, оскільки теоретично  $\lambda \in (0; \infty)$ . Тому одержані результати наочніше представлені на рис. 2а залежністю чутливості  $S_{cx1}$  від значення міждросельного тиску  $P_{ap}$  зрівноваженого моста, який однозначно відображає параметр  $\lambda$ , але є зручнішим тим, що  $P_{ap} \in (P_2; P_1)$ , тобто має визначені обидві границі.

З рис. 2, а видно, що збільшення діаметра  $d_5$  дроселя у вихідній діагоналі моста призводить до зменшення значення міждросельного тиску  $P_{ap}$ , яке відповідає максимуму чутливості схеми, тобто до зміщення вліво тиску  $P_{ap}$  в бік вихідного тиску  $P_2$  живлення моста. Так, наприклад, для  $d_5 \in \{0,10; 0,15; 0,20; 0,24\}$  мм тиск  $P_{ap} \in \{150,2; 143,7; 136,3; 131\}$  кПа. Отже, для досягнення найбільшої чутливості тиск  $P_{ap}$  повинен бути близьким до вихідного тиску  $P_2$ .

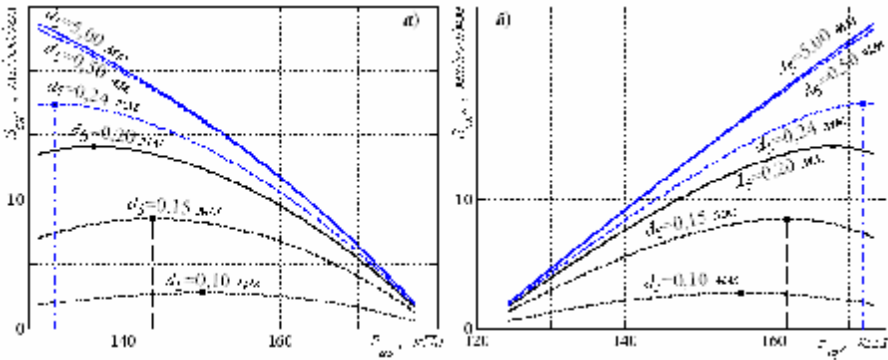


Рис. 2. Залежність чутливості  $S_{cx}$  від міждросельного тиску  $P_{ap}$  при зміні довжин  $l$  непостійних дроселів схеми для різних діаметрів  $d_5$  прохідного каналу протічного елемента при підбиранні:

а - вхідних дроселів схеми ( $l_1 = l_5 = 60$  мм); б - вихідних дроселів схеми ( $l_2 = l_5 = 60$  мм)

Вплив довжини каналу підбраного вхідного дроселя на чутливість схеми представлений графіками на рис.3. Зокрема з графіків  $S_{cx1} = f(P_{ap})$  (див. рис. 3, а) видно, що збільшення довжини прохідного каналу капіляра призводить до суттєвого зменшення чутливості.

На графіках  $S_{BM} = f(p_{ae})$  рис. 4а чутливість відображена безрозмірним параметром  $S_{BM}$ , який представляє собою відношення абсолютної чутливості  $S_{cx}$  до максимально можливої в заданих умовах (вид газу, розміри капілярів, тиски живлення, температура) чутливості  $S_{max}$ , тобто  $S_{BM} = S_{cx} / S_{max}$ . Крім цього свою перевагу для наочності залежності чутливості від параметрів моста має безрозмірний відносний міждросельний тиск  $p_{ae} = (P_{ap} - P_2) / \Delta P_{ж}$ , який визна-

чають як різницю міждросельного тиску і тиску на виході моста до перепаду тиску на мості і який відображає співвідношення конструктивних розмірів прохідних каналів капілярів робочого подільника і завжди знаходиться в межах (0; 1). Саме тому залежності чутливості на графіках рис. 4 представлені як функції  $p_{av}$ . З графіків рис. 4 видно, що характер залежностей практично не залежить від умов експерименту.

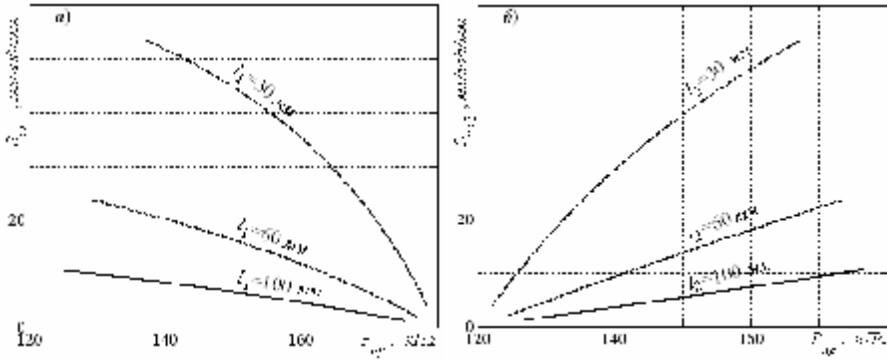


Рис. 3. Залежність чутливості  $S_{cx}$  від міждросельного тиску  $P_{ap}$  для різних довжин  $l$  прохідного каналу постійного дроселя при підбиранні: *a* – вхідних дроселів схеми ( $l_1 = l_3$ ); *б* – вихідних дроселів схеми ( $l_2 = l_4$ ) для капіляра з розмірами прохідного каналу  $d_5 = 2,0$  мм,  $l_5 = 60$  мм у вихідній діагоналі моста

Вказані закономірності повністю справедливі і для вхідного дроселя  $D_3$ , оскільки в стані рівноваги мостової схеми подільники  $D_1$ - $D_2$  і  $D_3$ - $D_4$  є ідентичні.

### Аналіз чутливості підбору вихідних капілярів

Аналітичний вираз чутливості  $S_{cx2}$  до зміни довжини  $l_2$  підбраного дроселя  $D_2$  згідно з (3) має вигляд

$$S_{cx2} = \frac{\partial q}{\partial P_a} \cdot \frac{\partial P_a}{\partial l_2} + \frac{\partial q}{\partial P_b} \cdot \frac{\partial P_b}{\partial l_2}. \quad (10)$$

Застосувавши вищеописаний підхід до отримання чутливості схеми для підбору вихідних капілярів отримаємо:

$$S_{cx2} = \frac{1 - Z_2^{-1}}{1 - Z_1^{-1}} \cdot S_{cx1}. \quad (11)$$



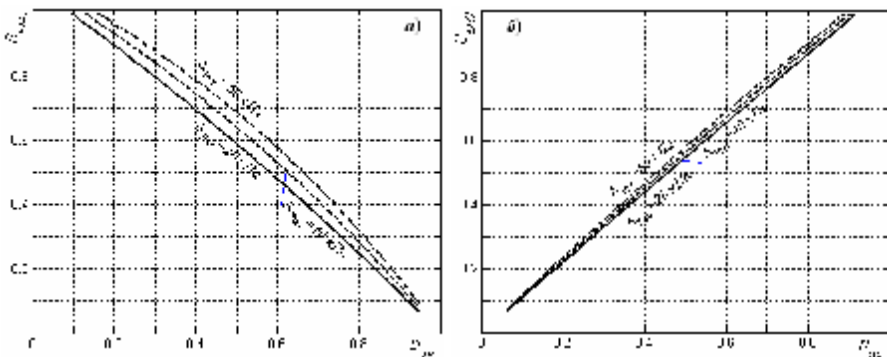


Рис. 4. Залежність чутливості  $S_{вм}$  від безрозмірного комплексу  $p_{ав}$  при підбиранні:  $a$  – вхідних ( $l_1 = l_3 = 60$  мм) і  $б$  – вихідних ( $l_2 = l_4 = 60$  мм) капілярів моста при встановленому у його вихідній діагоналі капілярі ( $d_5 = 1,0$  мм,  $l_5 = 60$  мм) для різних тисків живлення  $\Delta P_{ж}$  моста

За допомогою формули (11) побудовані графіки (див. рис. 1, б-4, б) залежності чутливості  $S_{сх2}$  від: співвідношення довжин  $\lambda$ , тиску  $P_{ар}$ , тиску живлення і довжини підбраного вихідного дроселя схеми.

З наведених графіків видно, що ці залежності мають подібний характер, за винятком того, що зміщення максимуму чутливості  $S_{сх2}$  в порівнянні з  $S_{сх1}$  відбувається в протилежному напрямку, тобто в бік тиску  $P_1$  живлення моста, причому абсолютні значення чутливості є практично на такому ж рівні. Так наприклад, максимальні значення чутливостей схеми та оптимальні значення співвідношення довжин  $\lambda$  для  $d_5 \in \{0,10; 0,15; 0,20\}$  мм відповідно складають  $S_{сх2} \in \{2,72; 8,47; 14,07\}$  (мг/год)/мм для  $\lambda \in \{0,82; 0,50; 0,24\}$ , а відповідні значення довжин непостійного капіляра  $l_1 \in \{49,18; 29,89; 14,07\}$  мм.

Вказані закономірності справедливі і для вихідного дроселя  $D_4$ , так як в рівноважному стані подільники  $D_1$ - $D_2$  і  $D_3$ - $D_4$  моста є ідентичні.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

За допомогою пристрою, побудованого на базі мостової дросельної схеми з нуль-індикатором потоку у вихідній діагоналі, можна здійснювати підбір дросельних елементів із рівними ГДО на одному газі із значно вищою як у відомих методах точністю, оскільки підбір капілярних елементів здійснюється без вимірювання абсолютних значень газодинамічних опорів, тисків, витрат чи розмірів прохідних каналів капілярів.

Досліджена чутливість мостової схеми є однією із важливих величин, від якої залежить похибка підбирання рівноопорних дроселів, а оцінка самої похибки підбирання таких дроселів є наступним етапом дослідження.

**Перелік літератури:** 1. *Санкин Я.Л. и др.* Устройство приготовления и подачи газовой смеси в культиватор клеток // Пневматические системы управления биологическими процессами. М., 1987, с.99. 2. Патент 2136703 Великобританії. Mixing of gaseous substances / G.F.Gorin, A.Barcellona, A.Lausarot / 23 Feb 1983. 3. *Теплюх З.* Синтезатори перевірювальних сумішей приладів контролю ефективності горіння палива // Транспортування, контроль якості облік енергоспожив. Львів, 1998, с.179-184. 4. *Коган И.Ш.* Методика точного расчета круглого канала при ламинарном течении. Preprints of VIII Fluidic Conference, Bucuresti, 1980, т.1, с.11-19. 5. *Ибрагимов И.А., Фарзиев Н.Г., Илясов Л.В.* Элементы и системы пневмоавтоматики. – М.: Высшая школа, 1985. – 544 с. 6. А. с. 911546 СССР, G05G 5/00. Устройство для калибровки пневматических резисторов / В.П. Димитренко, А.П. Колойденко – Бюлл. № 9, 1982. 7. А. с. 23697 НРБ, G 05 L 7/00. Метод и уред за измерване на пневматично съпротивление / *Маналов Н.Т., Петрова Е.Г., Янков А.Е.* – № 33729, заявл. 13.07.76, оп. 30.11.1979. 8. *Теплюх З.М.* Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // Вісник НУ "Львівська політехніка" №551, "Автоматика, вимірювання та керування", – 2006, с.87-94. 9. *Ділай І.В., Теплюх З.М.* Задавач-стабізатор витрати газу-носія для хроматографа // Вісник НУ "Львівська політехніка" №561, "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – Львів, 2006, с.67- 70. 10. *Теплюх З., Пистун Є., Ділай І.* Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 59, НУ "Львівська політехніка", – 2002, с.178-182. 11. *Ділай І.В., Теплюх З.М.* Дросельні синтезатори газових сумішей заданого складу // Вісник Тернопільського державного технічного університету №3, 2008, с.165-171. 12. *Ділай І.В., Теплюх З.М.* Газодинамічний зрівноважений міст для одержання дроселів з рівними опорами // Вісник НУ "Львівська політехніка" №617, "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація", – 2008, с.183-189. 13. *Ділай І.В., Теплюх З.М.* Дросельний міст з нуль-індикатором перепаду тисків // Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип.69, НУ "Львівська політехніка", – 2008, с.90-97. 14. *Ділай І.В., Теплюх З.М., Парнета О.З.* Розрахунок і оптимізація конструкції мірних трубок плівкових витратомірів // Вісник НУ "Львівська політехніка" №581, "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація", – 2007, с.104-110. 15. *Богатыренко К.И. и др.* Об использовании термоанемометрических датчиков в угломерных зондах // Энергетическое машиностроение: Респ. межвед. научн.-техн. сборник. Вип.28 / Харьк. политехн. ин-т. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1979. – С.106-109. 16. *Пистун Е.П., Теплюх З.Н.* Математическое моделирование газодинамических дросельных мостовых измерительных схем // Автоматика, №3. – К: Наукова думка, 1985. – С. 38-42. 17. *Теплюх З.М.* Розрахунок ламінарного подільника тиску // Вісник ДУ "Львівська політехніка" №273 / Теплоенергетичні системи та пристрої. – Львів, 1993. – С. 42-44.

*Надійшла в редколегію 9.12.08*