

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ

УДК 681.2.53.082.3:543.08

ДРОСЕЛЬНИЙ МІСТ З НУЛЬ-ІНДИКАТОРОМ ПЕРЕПАДУ ТИСКІВ

Ї Ділай Ігор, Теплох Зеновій, 2008

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

Для підвищення точності одержання рівнопорових дроселів досліджена чутливість зрівноваженої дросельної мостової схеми з нуль-індикатором перепаду тисків у вихідній діагоналі до зміни довжини прохідного каналу одного з капілярів схеми. Запропоновані методи оптимального підбору дроселів моста.

С целью повышения точности получения дросселей с равными сопротивлениями исследована чувствительность уравновешенной дроссельной мостовой схемы с нуль-индикатором перепада давлений в выходной диагонали к изменению длины проходного канала одного из капилляров схемы. Предложены методы оптимального подбора дросселей моста.

In the article the sensitivity of balanced throttling bridge circuit with pressure difference zero-indicator in the output diagonal to length change of straightway canal one pair of capillary circuit is investigated for increasing the precision gaining of equal resistance throttles. The methods of optimum fit bridge throttles are offered.

Вступ. *Об'єкт і предмет дослідження.* 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 розрахунково [4], проте точність такого визначення є низькою (похибка може становити десятки відсотків), що пов'язано 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, за допомогою вимірювання тисків і витрат [5]. Хоч похибка вимірювання ГДО може бути набагато меншою, ніж за розрахункового методу, все-таки точність здебільшого 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, зокрема на різних газах. У зв'язку з вказаним у пневмоавтоматиці надають перевагу різним пристроям, в яких значення ГДО досліджуваного дроселя оцінюється щодо вибраного опорного (базового) дроселя [6, 7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для побудови високоточних пристроїв вимірювальної техніки, зокрема задавачів витрати газу–носія у хроматографах, синтезаторів газових сумішей заданого складу, доцільне застосування дозувальних елементів з однаковими (кратними) газодинамічними опорами чи провідностями [8]. Необхідно відзначити новизну і перспективність такого підходу, оскільки дотепер відомі лише намагання застосувати однакові за розмірами прохідних каналів дроселі [2], що не могло забезпечити дозування з високою точністю рівних витрат газів. Одержання рівнопорових дроселів з найвищою точністю може забезпечити пристрій, побудований на базі зрівноваженої дросельної мостової схеми [9], за допомогою якого можна підбирати довільну кількість дроселів з рівними ГДО. У роботі [10] встановлено, що найменшу похибку підбору дросельного елемента (капіляра) з опором, що дорівнює опору базового дроселя, можна отримати за умови максимальної чутливості мостової схеми, яка залежить переважно від розмірів прохідних каналів інших дроселів моста. Пропонована стаття є продовженням і розвитком цих досліджень.

Метою роботи є дослідження та оптимізування дросельної мостової схеми з нуль-індикатором перепаду тисків за критерієм максимальної чутливості вихідного сигналу (перепаду тисків) схеми до зміни довжини прохідного каналу капіляра.

Побудова схеми та її властивості. Дросельна мостова схема для одержання дроселів з рівними опорами у спрощеному варіанті містить чотири дроселі D_1, \dots, D_4 і показчик рівноваги НІ (нуль-індикатор) дифманометричного типу, який виявляє наявність або відсутність перепаду тисків у вихідній діагоналі моста, що свідчить відповідно про розбаланс чи рівновагу схеми (рис.1). Як дроселі D_1, \dots, D_4 первинної схеми доцільно застосувати капілярні елементи (наприклад, скляні капілярні трубки), оскільки ними можна найточніше зрівноважувати газодинамічний міст. Як нуль-індикатор необхідно застосовувати високочутливий дифманометр з мінімальним об'ємом камер, зокрема мембранний чутливий елемент з перетворювачем переміщення-ємність [11–13].

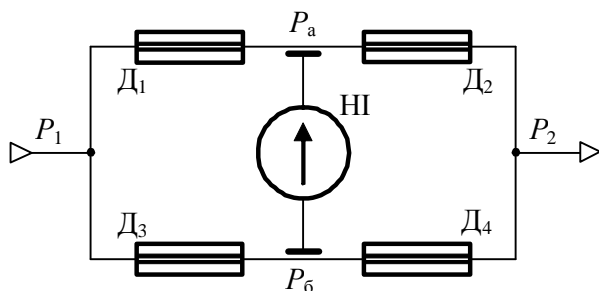


Рис. 1. Схема газодинамічного моста

Описаний міст фактично є паралельним з'єднанням двох незалежних один від одного подільників тиску: перший утворений послідовним з'єднанням дроселів D_1 і D_2 , а другий – D_3 , D_4 . Тому для дослідження властивостей схеми достатньо розглядати лише той подільник, в якому початково встановлений опорний (базовий) капіляр, а відтак на його місце почергово встановлюють капіляри, які підганяють за величиною опору до опору базового капіляра.

Мостова 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 у дроселях (D_1, D_3), так і вихідних дроселів (D_2, D_4). Одержання

дроселів з рівними опорами передбачає кілька етапів: первинний підбір капілярів; підбір (проекування) подільників моста; побудова моста та його первинне зрівноваження; заміщення базового дроселя підбираним; зрівноваження схеми нововстановленим дроселем.

Первинний підбір капілярів полягає у виборі номінальної довжини l рівноопорових дроселів і номінальних діаметрів d прохідних перерізів каналів усіх дроселів. Вибір довжини l рівноопорових дроселів визначається умовами їхнього застосування. Діаметри каналів дроселів повинні забезпечувати відповідні витрати і можуть бути довільними, проте доцільніше (з погляду практики) вибирати всі капіляри однакового діаметра як первинного моста, так і капіляри для отримання замішуваних рівноопорових дроселів.

Підбір подільників полягає у виборі співвідношень $y_1 = l_2 / l_1$ довжин l_1, l_2 дроселів D_1, D_2 і $y_2 = l_4 / l_3$ довжин l_3, l_4 дроселів D_3, D_4 . Виділимо такі варіанти вибору цих співвідношень.

Загалом, коли діаметри капілярів різні, співвідношення y_1, y_2 також можуть бути різними і їх вибирають з умови рівноваги моста (рівності міждросельних тисків P_a і P_6), тобто

$$P_a = P_6. \tag{1}$$

Очевидно, що міст може виявитися несиметричним щодо абсолютних тисків P_1 і P_2 живлення на вході і виході моста, тобто таким, коли $P_a \neq (P_1 + P_2) / 2$, що є цілком можливим для виготовлення дроселів з однаковим ГДО. З електричних вимірювань відомо, що максимальну чутливість до електричного опору має симетричний міст [14]. Для забезпечення симетричності зрівноваженого моста за рис. 1 вибрані різні діаметри і довжини капілярів моста повинні відповідати умові

$$P_a = P_6 = (P_1 + P_2) / 2. \tag{2}$$

У разі вибору усіх капілярів з однаковим діаметром і довільних міждросельних тисків (але при тому $P_a = P_6$) з інтервалу $[P_2; P_1]$ умова рівноваги моста має вигляд

$$y_1 = y_2. \tag{3}$$

Умовою рівноваги симетричного моста, побудованого на капілярах однакового діаметра, є

$$y_1 = y_2 = 2 \check{Z} / (Y_2 B_1 - \check{Z}^2), \tag{4}$$

де $\check{Z} = (Y_2 B_2 + 1)^{0.5} - 1$; $Y_2 = m X (d^2 / l_2)^2$; $X = M / (4,257 \cdot 10^6 T \mu^2)$; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу при температурі T [15]; M – молекулярна маса; $B_1 = P_1^2 - P_a^2$; $B_2 = P_a^2 - P_2^2$; m – коефіцієнт кінцевих ефектів.

Практичним варіантом вибору співвідношень довжин капілярів однакового діаметра є

$$y_1 = y_2 = 1. \quad (5)$$

Отже, для отримання дроселів з рівними чи кратними опорами і провідностями міст можна будувати з дотриманням однієї з умов (1) – (5). Очевидно, що чутливість моста для цих варіантів буде різною і залежатиме від співвідношення геометричних розмірів прохідних каналів капілярних елементів.

Побудова моста здійснюється на базі капілярів з конструктивними характеристиками прохідних каналів, які відповідають вказаним вимогам й уможливають зрівноваження схеми. 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, доки нуль-індикатор перепаду тисків у вихідній діагоналі моста не зафіксує рівність міждросельних тисків P_a і P_b . Тільки тоді міст готовий до виготовлення дроселів з однаковим ГДО.

Заміщення полягає у 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, що дорівнює 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, що дорівнює опорю заміщуваного дроселя, полягає у зрівноваженні схеми скороченням вказаним способом нововстановленого дроселя до відновлення попереднього стану рівноваги.

Нехай, як приклад, потрібно виготовити дросель з опором, що дорівнює опорю 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 $\check{R}_1 = R_1 + \Delta_{R1}$, де Δ_{R1} – відхилення (фактично перевищення) від опорю R_1 , величина якого (відхилення) визначається переважно недосконалістю розрахункової моделі або експерименту, а також недосконалістю форми каналів капілярів. Дросель D_2 залишається постійним. Заміна капіляра з опором R_1 на капіляр з опором \check{R}_1 викликає появу перепаду $\Delta_{Pa\check{b}} = P_a - P_{\check{b}}$. Далі незначним поступовим скороченням довжини l_1

капілярного елемента з початковим опором \check{R}_1 знову зрівноважують схему, тим самим зменшуючи Δ_{R1} до значення, яке визначається порогом чутливості моста, який, своєю чергою, залежить від чутливості S_{cx} дросельної схеми. Оскільки похибка виготовлення капілярних трубок з однаковим ГДО за допомогою такого моста істотно 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.

Враховуючи, що газодинамічний міст складається з двох послідовно з'єднаних перетворювачів – дросельної мостової схеми і покажчика рівноваги моста, кожен з яких має власну чутливість, можна записати таке співвідношення [14]

$$S_m = S_{cx} S_n, \quad (6)$$

де $S_m = dv / dl$ – чутливість газодинамічного моста; v – вихідний сигнал покажчика рівноваги (наприклад, переміщення вказівника покажчика, цифровий відлік); l – довжина прохідного каналу капілярного елемента, ГДО якого потрібно підігнати; $S_{cx} = d \Delta_{Pa\check{b}} / d l$ – чутливість дросельної мостової схеми; $\Delta_{Pa\check{b}}$ – вихідний сигнал дросельної схеми; $S_n = dv / d \Delta_{Pa\check{b}}$ – чутливість покажчика рівноваги.

Чутливість S_n покажчика рівноваги є величиною, яка визначається типом вибраного приладу і є фактично заданою. Тому, як випливає з (6), максимальну чутливість S_m моста можна забезпечити лише за умови досягнення максимальної чутливості S_{cx} схеми. У зв'язку з цим постає задача оптимального вибору параметрів схеми.

Чутливість S_{cx} такої схеми визначається похідною різниці тисків у вимірювальній діагоналі по довжині l прохідного каналу підбраного у подільнику D_1 – D_2 дроселя і дорівнює:

$$S_{cx} = d \Delta_{Pa\check{b}} / dl = dP_a / dl. \quad (7)$$

Міждросельний тиск P_a описується залежністю [16], записаною у вигляді:

$$P_a = [\alpha - \beta \check{y} L E]^{1/2}, \quad (8)$$

де $\alpha = (P_1^2 + b P_2^2) / \check{b}$; $b = (d_2 / d_1)^4$; $\check{b} = b + 1$; $\beta = 2 / (L \check{b})$; $L = X K_1 \check{b}$; $K_1 = m d_1^4 / l_1^2$; $\check{y} = 1 - y_1$; $L = y_1 + b$; $E = (1 + \gamma / L^2)^{1/2} - 1$; $\gamma = L P_{12} b$; $P_{12} = P_1^2 - P_2^2$.

Для усіх наведених нижче прикладів моделювання чутливості S_{cx} моста прийнято: плинне робоче тіло – це азот; температура усіх елементів

схеми стабілізована на рівні $T=300$ К; тиск на виході моста $P_2=120$ кПа. Про інші умови чи параметри у кожному випадку вказано додатково.

Чутливість схеми при підборі вхідних дроселів.

Чутливість S_{cx1} дросельної мостової схеми до зміни довжини l_1 вхідного за напрямом протікання газу дроселя D_1 одержуємо із залежностей (7) і (8) у вигляді

$$S_{cx1} = dP_a / dl_1 = \beta E [\tilde{y} b / (E+1) - L] / (2l_1 P_a). \quad (9)$$

Формула (9) відображає залежність чутливості S_{cx1} зрівноваженої мостової схеми від розмірів прохідних каналів капілярів D_1, D_2 , тисків P_1, P_2 живлення моста, температури T і параметрів M, μ

газу. За допомогою цієї формули побудовані графіки (рис. 2, а) залежності чутливості S_{cx1} до скорочення вхідного капіляра D_1 від довжини l_2 другого (постійного) капіляра D_2 подільника для вказаних умов моделювання. Як видно з графіків, ці залежності мають явно виражені екстремуми, які відповідають максимальній чутливості моста. Так, наприклад, для тисків живлення $P_1 = \{180; 160; 140\}$ кПа максимум чутливості відзначається для довжин $l_2 = \{46,30; 50,77; 55,25\}$ мм, а величина чутливості при цьому $S_{cx1} = \{235; 160; 82\}$ Па/мм. Вказані результати, зокрема висока чутливість S_{cx1} , підтверджують реальну можливість одержання з високою точністю дроселів з рівними опорами.

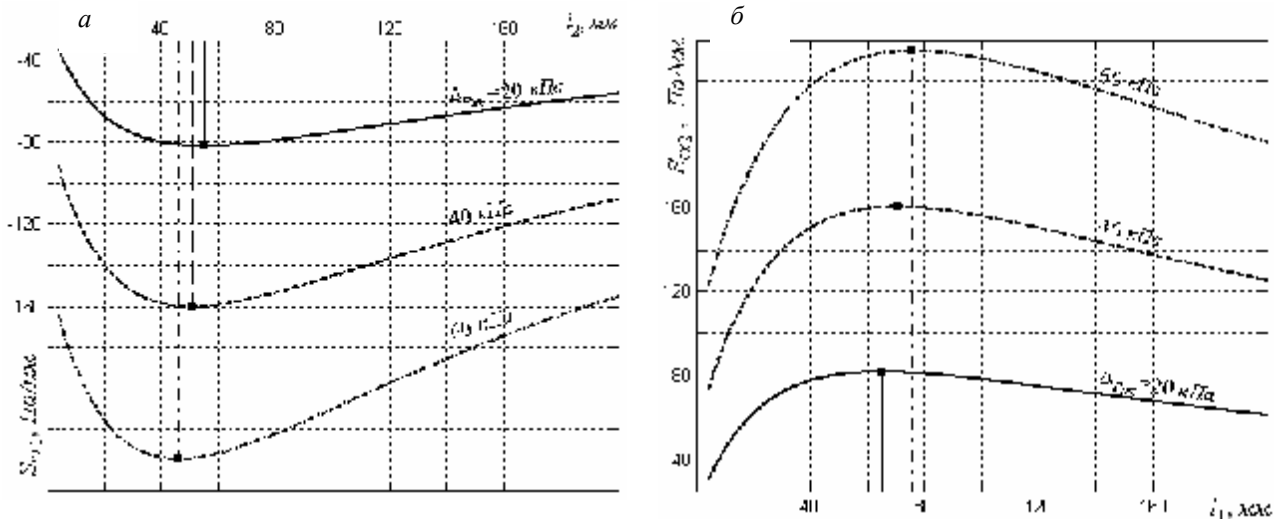


Рис.2. Залежність чутливості S_{cx} від довжини постійного капіляра (вихідного (а) і вхідного (б)) для різних $\Delta P_{жс}$ моста при виготовленні вхідного (а) і вихідного (б) капіляра довжиною $l=60$ мм; $d_1=d_2=0,15$ мм

Умову екстремуму функції S_{cx1} можна знайти з рівняння $d S_{cx1} / d y_1 = 0$, яке після відповідних перетворень набуває вигляду

$$\sum_{i=0}^3 (a_i E^i) = 0, \quad (10)$$

де $a_3 = l_1 L^2 S_{cx2} / P_a$; $a_2 = B - a_3 (\xi - 3)$; $a_1 = 2 B - \tilde{y} b - a_3 (2 \xi - 3)$; $a_0 = B - 2 \tilde{y} b - a_3 (\xi - 1)$; $B = L(1 - b)$; $\xi = \tilde{y} b / L$.

Числове розв'язування рівняння (10) дає оптимальне значення співвідношення y_1 , яке для заданих параметрів стану робочого середовища і тисків живлення P_1, P_2 моста забезпечує найвищу чутливість схеми при підборі дроселів з опором, що дорівнює опорі дроселя D_1 . Так для вказаних тисків максимум чутливості одержуємо для $y_1 = \{0,772; 0,846; 0,921\}$.

Як впливає з наведених даних, величина чутливості S_{cx1} безпосередньо залежить від величини живлення моста – перепаду тисків $\Delta P_{жс} = P_1 - P_2$ і тому є певний сенс ввести поняття відносної чутливості $S_{вжс} = S_{cx} / \Delta P_{жс}$ [м⁻¹]. На рис. 3 показано графіки залежності чутливості $S_{вжс1}$ від співвідношення довжин y_1 дроселів робочого подільника і величини живлення $\Delta P_{жс}$ моста. Ці графіки мають універсальніший характер, ніж залежності $S_{cx1} = f(l_2)$. Як видно з графіків, відносна чутливість мало залежить від тисків живлення і для вказаного діапазону $\Delta P_{жс}$ може характеризуватися усередненим значенням, а її максимум становить $S_{вжс}^{max} \approx 4$ м⁻¹.

Для оцінки чутливості газодинамічного моста до довжини прохідного каналу капілярного елемента

потрібно проаналізувати також вплив на чутливість абсолютних значень діаметрів і довжин прохідних каналів підбраних капілярів. Такі залежності показані на рис. 4 і 5. На рис. 4 відображена залежність чутливості $S_{вжс}$ від міжросельного тиску $P_{ар}$ зрівноваженого моста, який ($P_{ар}$) однозначно відображає параметр y_1 , але є зручнішим тим, що $P_{ар} \in [P_2; P_1]$, тобто має визначені обидві границі. Крім того, графіки $S_{вжс} = f(P_{ар})$ наочніше демонструють можливі зміни чутливості у подільнику. Перевагу для наочності залежності чутливості від параметрів моста має безрозмірний відносний міжросельний тиск $p_{ав} = (P_{ар} - P_2) / \Delta P_{ржс}$, який відображає співвідношення

конструктивних розмірів прохідних каналів капілярів робочого подільника і завжди лежить у межах $[0; 1]$. Саме тому залежності чутливості на графіках рис. 5 подані як функції $p_{ав}$.

З графіків (рис. 4) видно, що у разі збільшення діаметрів прохідних каналів капілярів чутливість моста зменшується, а її екстремум істотно зміщується від тиску $P_{ар} = 150$ кПа (середини інтервалу $[P_2; P_1]$) у бік тиску $P_{ар} = P_2 = 120$ кПа і при тому зменшується кривизна графіка чутливості. Причинами цих явищ є зростання турбулентних втрат при збільшенні діаметрів і нелінійність витратної характеристики капіляра.

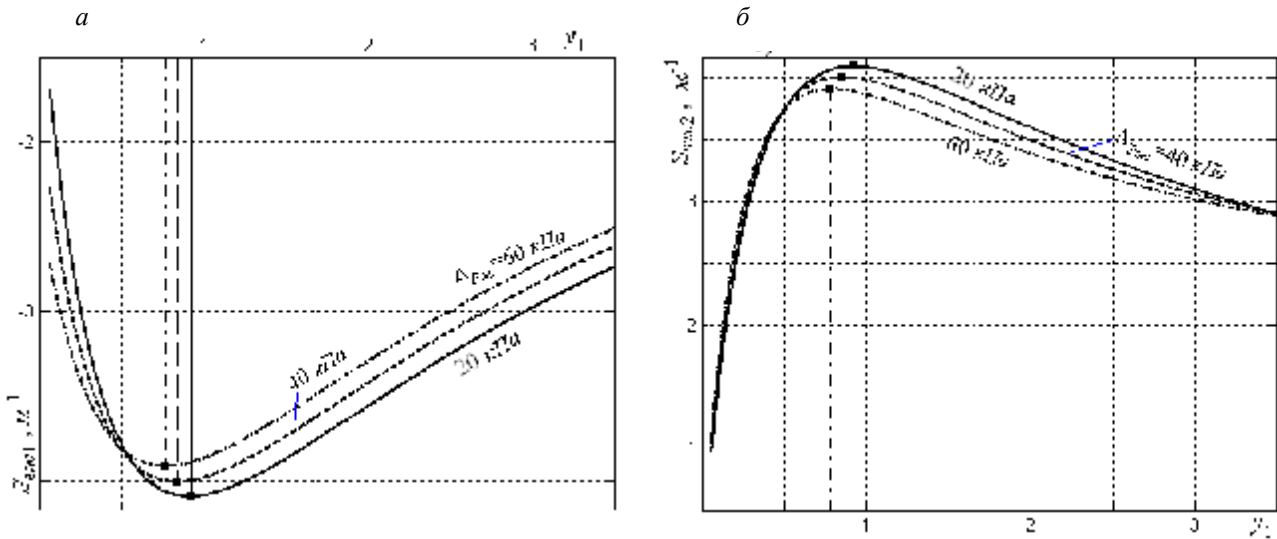


Рис.3 Залежність відносної чутливості $S_{вжс}$ від співвідношення y_1 довжин капілярів робочого подільника моста ($d_1=d_2=0,15$ мм) для виготовлення вхідного (а) і вихідного (б) капіляра; $l=60$ мм

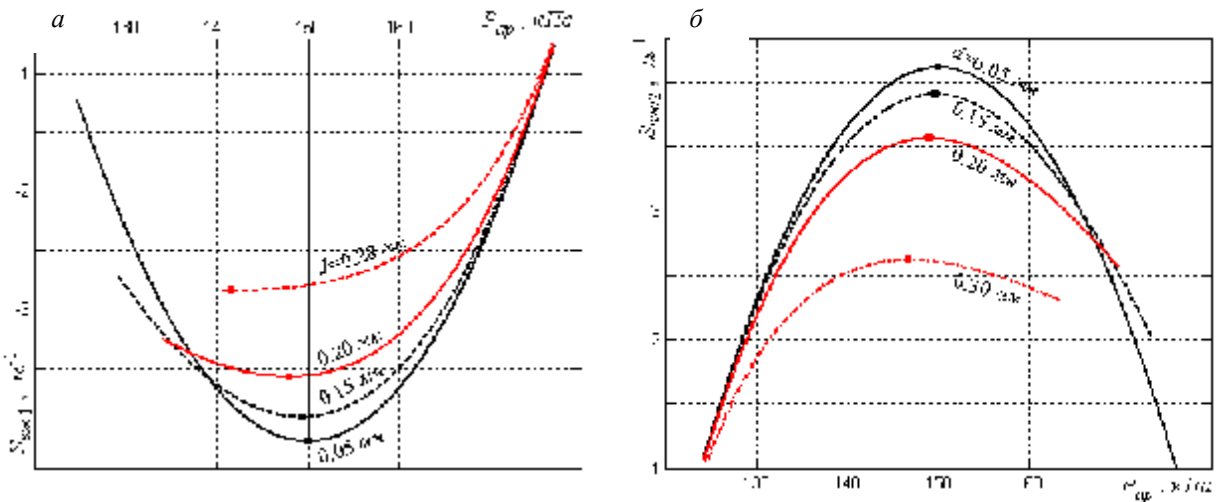


Рис. 4. Залежність чутливості $S_{вжс}$ від тиску $P_{ар}$ робочого подільника з капілярами різних діаметрів ($d=d_1=d_2$) для виготовлення вхідного (а) і вихідного (б) капіляра довжиною $l=60$ мм; $D_{ржс} = 60$ кПа

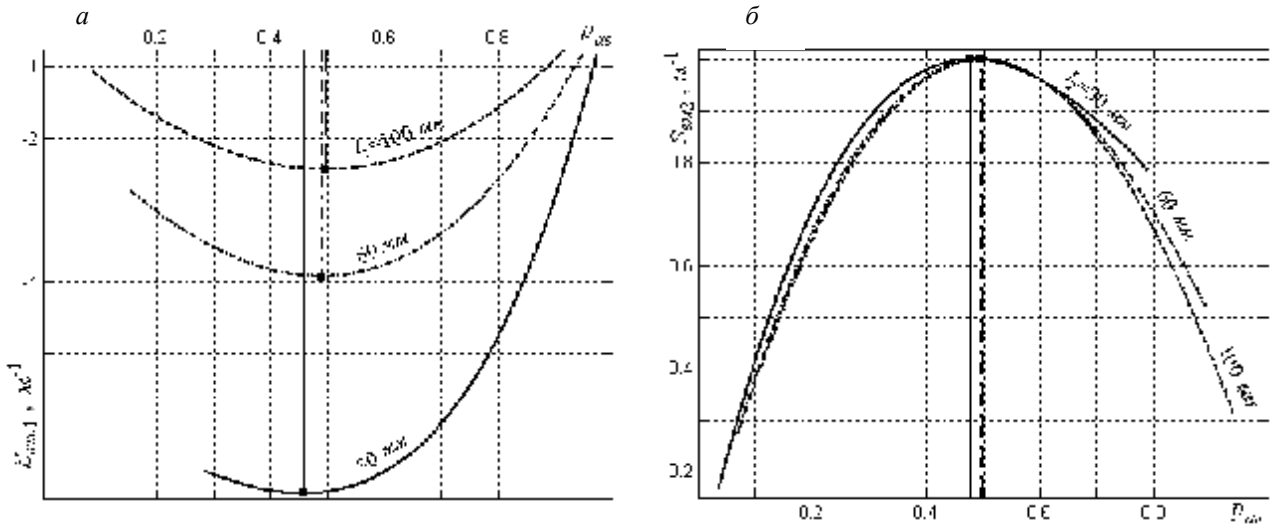


Рис. 5. Залежність чутливості $S_{вж1}$ (а) і $S_{вж2}$ (б) від безрозмірного комплексу $p_{ав}$ для виготовлення вхідного (а) і вихідного (б) капіляра. $d_1 = d_2 = 0,15$ мм; $D_{рж} = 60$ кПа

Характер залежності чутливості моста від довжини прохідного каналу підбраного капіляра поданий графіками на рис. 5. Зокрема, з графіків $S_{вж1} = f(p_{ав})$ рис. 5, а випливає, що збільшення довжини капіляра зумовлює істотне зменшення чутливості з одночасним зменшенням кривини та зміщенням екстремуму від стану симетрії моста, тобто від $p_{ав} = 0,5$.

Чутливість схеми при підборі вихідних дроселів. Чутливість $S_{сх2}$ дросельної мостової схеми до зміни довжини l_2 вихідного за напрямом протікання газу дроселя D_2 одержуємо також із залежностей (7) і (8) у вигляді

$$S_{сх2} = dP_a / dl_2 = \beta E [\tilde{y} / (E+1) + L] / (2 l_1 P_a). \quad (11)$$

За допомогою цієї формули можна отримати числові значення чутливості $S_{сх2}$ до скорочення вихідного капіляра D_2 робочого подільника для заданих умов моделювання.

Співвідношення u_1 , яке забезпечує максимальну чутливість $S_{сх2}$, можна знайти з рівняння $dS_{сх2} / d u_1 = 0$, яке після відповідних перетворень набуває вигляду

$$\sum_{i=0}^3 (k_i E^i) = 0, \quad (12)$$

де $k_3 = -l_1 L^2 S_{сх1} / P_a$; $k_2 = B + k_3 (L+3)$; $k_1 = 1 + u_1 - 2 B - k_3 (2L+3)$; $k_0 = u_1 - b (\tilde{y} + b) - k_3 (L+1)$; $L = \tilde{y} / L$.

Числове розв'язування рівняння (12) дає оптимальне значення співвідношення u_1 , яке для заданих параметрів стану робочого середовища і тисків

живлення P_1, P_2 моста забезпечує найвищу чутливість схеми при підборі дроселів з опором, що дорівнює опору дроселя D_2 .

За допомогою формули (11) побудовано графіки (рис. 2, б – 5, б) залежності чутливості $S_{сх2}$ від довжини l_1 , залежності відносної чутливості $S_{вж2}$ від співвідношення u_1 , тиску $P_{ар}$ і параметра $p_{ав}$, а також залежності $S_{вж2}$ від параметра $p_{ав}$. На графіках $S_{вж2} = f(p_{ав})$ (рис. 5, б) чутливість відображена безрозмірним параметром $S_{вж}$ який являє собою відношення абсолютної чутливості $S_{сх}$, до максимально можливої у заданих умовах (вид газу, розміри капілярів, тиски живлення, температура) чутливості S_{max} , тобто $S_{вж} = S_{сх} / S_{max}$. З цих графіків добре видно, що характер залежностей практично не залежить від умов експерименту.

Як видно з наведених графіків (рис. 2, б–5, б), ці залежності мають такий самий характер і відображають таку саму максимальну за величиною чутливість, як і графіки чутливості $S_{сх1}, S_{вж1}$ (див. рис. 2, а – 5, а). Відрізняються вони фактично лише знаком чутливості та оптимальними значеннями $l, u_1, P_{ар}, p_{ав}$, які відповідають максимальній чутливості. Так, наприклад, для тисків живлення $\Delta P_{ж} = \{60; 40; 20\}$ кПа максимум чутливості відзначається для довжин $l_1 = \{75,96; 70,42; 65,11\}$ мм, а величина чутливості $S_{сх2}$ практично дорівнює $S_{сх1}$. Вказані результати підтверджують можливість одержання з високою точністю рівноопорних дроселів як на вході моста, так і на його виході.

Коментарі, рекомендації та висновки. Отож, після виконаного аналізу чутливості до скорочення довжини одного з капілярів робочого подільника за заданої постійної довжини іншого капіляра цього самого подільника доцільно порівняти чутливості мостів, побудованих за різними умовами (1)–(5), з максимально можливою чутливістю мостів відповідних конструкцій.

Міст, дроселі якого відповідають умові (1) або (3), може мати чутливість, істотно меншу від максимальної, а тому ці умови не є рекомендованими для побудови моста.

Чутливість моста, побудованого за умовою (2) або (4), є близькою до максимальної, а втрати чутливості для різних співвідношень розмірів капілярів не перевищують 1 % і тому ці умови доцільно використовувати під час побудови моста для підбору дроселів з рівним ГДО.

Міст, побудований за умовою (5), також має чутливість, близьку до максимальної, проте втрати чутливості для різних співвідношень розмірів капілярів дещо більші, ніж для умов (2) і (4), хоча й вони не перевищують 1,5 % і тому цю умову також можна використовувати під час побудови моста.

Як впливає з виконаних досліджень мостів, побудованих на капілярах з практичними конструктивними розмірами прохідних каналів ($d=0,05\text{--}0,5$ мм; $l=4\text{--}300$ мм) і для перепадів тисків $\Delta P_{ж}$ живлення моста до 100 кПа, чутливість $S_{вж}$ лежить у межах $[2,5; 4,5]$ м⁻¹, що забезпечує абсолютну чутливість $S_{сх}$, достатню для високої точності одержання дроселів з рівними опорами. Так, наприклад, для $\Delta P_{ж} = 60$ кПа маємо $S_{сх} = 150\text{--}270$ Па/мм.

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

1. Санкин Я.Л. и др. Устройство приготовления и подачи газовой смеси в культиватор клеток // Пневматические системы управления биологическими процессами. – М., 1987. – 99 с. 2. Патент 2136703 Великобританії. *Mixing of gaseous substances /*

G.F.Gorin, A.Barcellona, A.Lausarot / 23 Feb 1983.
 3. Теплох З. Синтезатори перевірювальних сумішей приладів контролю ефективності горіння палива // *Транспортування, контроль якості, облік енергоносіїв.* – Львів, 1998. – С.179–184. 4. Коган И.Ш. Методика точного расчета круглого канала при ламинарном течении. *Preprints of VIII Fluidic Conference, Bucaresti.* – 1980. – Т.1. – С.11–19. 5. Ибрагимов И.А., Фарзанае 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 / Н.Т. Маналов, Е.Г. Петрова, А.Е. Янков. – № 33729, заявл. 13.07.76, оп. 30.11.1979. 8. Теплох З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // *Вісн. НУ “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”.* – Львів, 2006. – № 551. – С.87–94. 9. Теплох З., Пістун Є., Ділай І. Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // *Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник.* – 2002. – Вип. 59. – С.178–182. 10. Івахів О.В., Теплох З.М. Підгонка опору дроселів за допомогою газодинамічного моста // *Вісн. НУ “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”.* – 2003. – № 475. – С. 15–21. 11. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 287 с. 12. Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. – М.: Энергия, 1972. – 79 с. 13. Бойков Н.А., Звездин П.С., Резник Л.Б. Измерение давлений при быстропротекающих процессах. – М.: Энергия, 1970. – 64 с. 14. Электрические измерения. Средства и методы измерений. / Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972. – 519 с. 15. Теплох З.М., Ділай І.В. Наближення температурної залежності в'язкості поширених газів для умов лабораторних приміщень // *Вісн. НУ “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація”.* – Львів, 2005. – № 537. – С. 161–165. 16. Теплох З.М. Розрахунок ламінарного подільника тиску // *Вісн. ДУ “Львівська політехніка” “Теплоенергетичні системи та пристрої”.* – Львів, 1993. – № 273. – С. 42–44.