

**І. Ділай, канд. техн. наук; З. Теплюх, докт. техн. наук**

*Національний університет "Львівська політехніка"*

## **ДРОСЕЛЬНІ СИНТЕЗАТОРИ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ЗАДАНОГО СКЛАДУ**

*Стаття присвячена розробленню високоточних синтезаторів на базі дроселів з рівними газодинамічними опорами. Оцінено похибку і чутливість пристрою для підбору рівноопорових дроселів з нуль-індикатором перепаду тисків у вихідні діагоналі моста, показано їх взаємозв'язок.*

**I. Dilay, Z. Teplukh**

## **THROTTLE SYNTHESIZERS OF GAS MIXTURES FROM CONSTITUENTS IN A GIVEN PROPORTION**

*The article devoted to development of high-precision gas-dynamic synthesizers on base throttles with equal gas-dynamic resistances. The error and sensitivity of gas-dynamic devices for throttles fitting with equal resistances with zero-indicator pressure difference use in the output bridge diagonal are estimated and their correlation is showed.*

### **Виклад проблеми**

Газові суміші заданого складу використовують як в технологічних процесах (наприклад, для наповнення джерел світла, створення газових середовищ для виготовлення електронних компонентів, біотехнологій тощо), так і для перевірки газоаналітичної апаратури (газоаналізаторів, хроматографів) [1-3]. Отримання конкурентноздатної продукції за допомогою таких технологій, а також належне метрологічне забезпечення залучених до технологічних процесів газоаналітичних засобів вимагають високої точності складу приготуванних сумішей.

*Аналіз останніх досліджень* відомих методів приготування (синтезу) газових сумішей [4-7] показує, що найперспективнішим є газодинамічний дросельний, оскільки він може забезпечити неперервне, високоточне приготування багатокомпонентних сумішей як з макро-, так і з мікроконцентраціями компонентів, а також з довільною витратою суміші. В практиці побудови газодинамічних дросельних пристроїв (зокрема і синтезаторів) застосовують різні типи дроселів: годинникові камені, діафрагми, конус-конус, сопло-заслінка, а також металеві та скляні капілярні трубки, проте доцільнішим є застосування саме капілярних трубок, оскільки шляхом зміни довжини прохідного каналу можна забезпечити плавну зміну їх газодинамічного опору. Для побудови високоточних пристроїв синтезу газових сумішей заданого складу найперспективнішим є застосування дозуючих елементів з однаковими (кратними) газодинамічними опорами чи провідностями [8]. При цьому слід відзначити новизну такого підходу, оскільки дотепер відомі лише намагання застосувати однакові за розмірами прохідних каналів дроселі [9,10]. Проте капіляри з номінально однаковими геометричними розмірами не можуть забезпечити рівних опорів, оскільки в реальних капілярах форма прохідного каналу є нециліндричною і відхилення діаметра в різних точках каналу може сягати 14 % [11]. Одержання рівноопорових дроселів з найвищою точністю може забезпечити пристрій [12,13], з допомогою якого можна підбирати довільну кількість дроселів з рівними газодинамічними опорами (ГДО). Пропонована стаття є продовженням і розвитком вказаних досліджень.

*Метою роботи* є розроблення високоточних газодинамічних синтезаторів на основі дроселів з рівними (кратними) ГДО для потреб технологій та метрологічного забезпечення аналітичної апаратури.

**Оцінювання похибки підбору рівноопорових дроселів**

Для підбору потрібної кількості рівноопорних дроселів доцільно застосовувати пристрій, побудований на основі зрівноваженої дросельної мостової схеми, обладнаний у зв'язку з особливостями ГДО дроселів (стискуваність газу, різне співвідношення втрат від в'язкісного тертя і кінцевих ефектів) засобами для стабілізування температури та абсолютних тисків у всіх елементах пристрою [12]. При цих же значеннях вказаних параметрів підібрані дроселі повинні працювати в газодинамічних пристроях.

Така мостова схема у спрощеному представленні [13] містить чотири дроселі  $D_1, \dots, D_4$  і показчик рівноваги НІ (нуль-індикатор) дифманометричного типу у вимірювальній діагоналі  $a-b$ , який виявляє наявність або відсутність перепаду тисків, що свідчить відповідно про розбаланс чи рівновагу схеми. Як нуль-індикатор доцільно застосовувати високочутливий дифманометр з мінімальним об'ємом камер, наприклад, мембранний чутливий елемент з ємнісним перетворювачем переміщення у вихідний сигнал балансу-небалансу [14,15]. Оскільки через діагональ  $a-b$  потоку немає (ГДО показчика рівноваги  $R_{np}=\infty$ ), то така схема 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 властивості схеми визначаються лише робочим подільником, тобто тим, в якому початково встановлений опорний (базовий) капіляр, а відтак на його місце почергово встановлюють капіляри, які підганяють за величиною опору до опору базового капіляра. Другий подільник відіграє лише роль порівняльного.

Для визначення перепаду тиску  $\Delta P_{a\bar{b}}$  у вимірювальній діагоналі запишемо рівняння, які впливають з електрогазодинамічних аналогій закону Ома:

$$P_a = P_1 - G_a \cdot R_1; \quad P_b = P_1 - G_b \cdot R_3, \quad (1)$$

де:  $P_1$  і  $P_2$  - абсолютні тиски відповідно на вході та виході моста;  $P_a$  і  $P_b$  - міждросельний тиск відповідно першого і другого подільника;  $P_1, \dots, P_4$  - відповідно ГДО дроселів  $D_1, \dots, D_4$ ;  $G_a$  і  $G_b$  - витрата відповідно через перший та другий подільники моста.

З рівнянь (1) отримуємо

$$\Delta P_{a\bar{b}} = P_a - P_b = G_b \cdot R_3 - G_a \cdot R_1, \quad (2)$$

а враховуючи, що

$$G_a = (P_1 - P_2) / (R_1 + R_2) = \Delta P_{жс} / R_a; \quad G_b = \Delta P_{жс} / (R_3 + R_4) = \Delta P_{жс} / R_b,$$

вихідний сигнал  $\Delta P_{a\bar{b}}$  моста в залежності від значень опорів і перепаду тисків  $\Delta P_{жс}$  у діагоналі живлення схеми отримуємо у вигляді:

$$\Delta P_{a\bar{b}} = (R_3/R_b - R_1/R_a) \Delta P_{жс} = (R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4) \Delta P_{жс} / (R_a \cdot R_b). \quad (3)$$

Нехай потрібно підібрати дросель  $\overset{\square}{A}$ , опір  $R$  якого наближено дорівнює опорі  $R_i$ , одного із дроселів  $D_i, \in \{D_1, \dots, D_4\}$  моста. Наголосимо, що мова не йде про визначення опор дроселя  $D_i$ , (чи новопідбраного дроселя  $D$ ), а лише про підбір двох (чи більше) дроселів з рівними між собою опорами. Для цього у попередньо зрівноважену схему (первинне зрівноваження -  $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ ) на місце дроселя  $D_i$ , (опорного) встановлюють інший дросель  $\overset{\square}{D}$ , опір  $R$  якого незначно відрізняється від опорі  $R_i$  попереднього дроселя, тобто  $R = R_i + \Delta R$ , де  $\Delta R$  - відхилення опорі (абсолютна похибка підбору) підготовленого дроселя. Внаслідок заміни дроселя  $D_i$ , на дросель  $\overset{\square}{A}$  мостова схема розбалансується, і у вимірювальній діагоналі з'явиться перепад тиску, який згідно з (3), після деяких перетворень може бути представлений як

$$\Delta P_{a\bar{b}} = k \cdot \Delta P_{жс} \cdot \delta_R \quad (4)$$

де:  $k = \alpha / (1 + \alpha)^2$  - коефіцієнт чутливості моста;  $\alpha = R_1/R_2 = R_3/R_4$  - параметр рівноваги подільників моста;  $\delta_R = \Delta R/R_i$  - відносне відхилення опору  $R$  від  $R_i$ .

Вираз (4) зв'язує вихідний сигнал  $\Delta P_{a\delta}$  з відносним відхиленням  $\delta_R$ , тобто з відносною похибкою підбирання рівноопорних дроселів. При цьому ця залежність визначається, зокрема, чутливістю моста, тобто для одержання найбільшого значення  $\Delta P_{a\delta}$  потрібно, аби чутливість моста була максимальною.

Для одержання дроселя з опором, рівним  $R_i$ , опорного дроселя потрібно шляхом поступового скорочення довжини  $l$  дроселя  $\overset{\square}{A}$  підігнати (зменшити) його опір  $\overset{\square}{R}$ , тобто знову зрівноважити міст (вторинне зрівноваження). При цьому похибка  $\delta_R$  підбирання рівноопорних дроселів відповідно до (4) і з врахуванням дворазового зрівноваження є

$$\delta_R = 2 \Delta P_{a\delta} / (k \cdot \Delta P_{жс}), \quad (5)$$

звідки можна знайти найменше значення похибки підбору  $\delta_{Rzp}$  (зони невизначеності) дроселів з рівними опорами, якщо підгонку робити до досягнення нуля сигналу показчика рівноваги, тобто до перепаду, що відповідає його порогу чутливості  $\Pi$ :

$$\delta_{Rzp} = 2\Pi / (k \cdot \Delta P_{жс}). \quad (6)$$

*Приклад.* Для підбирання рівноопорних капілярів складено мостову схему ( $\alpha=1$ ,  $\Delta P_{жс}=40$  кПа) з показчиком рівноваги ( $\Pi=0,1$  Па). Відносна похибка відхилення ГДО підібраних капілярів, згідно з (6), не перевищуватиме 0,002 %.

Чутливість  $S_R$  до зміни опору одного з дроселів моста з врахуванням (3) або (1) може бути визначена як

$$S_R = d\Delta P_{a\delta} / dR_i = dP_a / dR_i = k \cdot \Delta P_{жс} / R_i. \quad (7)$$

З (6) і (7) одержуємо похибку  $\delta_{Rzp}$ , виражену безпосередньо через чутливість  $S_R$  -

$$\delta_{Rzp} = 2\Pi / R_i \cdot S_R. \quad (8)$$

Отже, як видно з (8), похибка  $\delta_{Rzp}$  залежить від порогу чутливості  $\Pi$ , абсолютного значення опору  $R_i$ , і чутливості моста  $S_R$ . При цьому перші два фактори ( $\Pi$  і  $R_i$ ) є фактично заданими, і лише третій ( $S_R$ ) залежить від співвідношення опорів робочого подільника, тобто його можна довільно вибирати. Оскільки це співвідношення може знаходитися в широких межах, то з метою мінімізування похибки  $\delta_{Rzp}$  доцільно виконати аналіз чутливості моста.

ГДО капіляра визначається розмірами прохідного каналу (діаметр  $d$  і довжина  $l$ ), видом газу (газова стала  $R$ , молекулярна маса  $M$ , в'язкість  $\mu$ ) і параметрами стану (тиск  $P$  і температура  $T$ ). Оскільки підбір рівноопорних дроселів здійснюється зміною (підгоном, корекцією) їх довжини при постійних значеннях усіх решти параметрів, то аналіз чутливості моста доцільно виконати щодо зміни довжини капіляра.

### **Дослідження чутливості моста до скорочення капіляра**

Чутливість  $S_l$  такої схеми визначається похідною різниці тисків у вимірювальній діагоналі відносно довжини прохідного каналу підбираного дроселя і дорівнює

$$S_l = d\Delta P_{a\delta} / dl = dP_a / dl, \quad (9)$$

в якій значення тиску  $P_a$  подільника описують формулою [16]

$$P_a = \{P_\delta + 2 \cdot (\lambda - 1) / (Y_2 - V^2) \cdot [W - (W^2 + Y_2 \cdot V \cdot \delta^4 \cdot P_{12})^{1/2}]\}^{1/2}, \quad (10)$$

де:  $P_\delta = [P_1^2 \cdot \delta^4 + P_2^2] / V$ ;  $\lambda = l_1 / l_2$ ;  $\delta = d_1 / d_2$ ;  $V = 1 + \delta^4$ ;  $W = \lambda + \delta^4$ ;  $P_{12} = P_1^2 - P_2^2$ ;  $Y_2 = K_2 \cdot X$  - комплекс розмірів прохідного каналу капіляра і параметрів газу;  $K_2 = m \cdot [(d_2)^2 / l_2]^2$  - конструктивний комплекс;  $d_1, d_2, l_1, l_2$  - відповідно діаметр і довжина прохідних каналів першого і другого капілярів робочого подільника;  $m$  - коефіцієнт кінцевих

ефектив;  $X=(512 \cdot R \cdot T \cdot \mu^2)^{-1} = 2,349085 \cdot 10^{-7} \cdot M / (T \cdot \mu^2)$  - комплекс параметрів газу;  $R$  - газова стала;  $M$  - молекулярна маса газу;  $\mu$  - динамічна в'язкість газу при температурі  $T$ .

Із залежностей (9), (10) у разі підбору дроселів з опором, рівним опору вхідного дроселя  $D_1$  робочого подільника, отримуємо

$$S_{I1} = dP_a / dl_1 = \delta^4 \cdot [W - W_1 + (\lambda - 1) \cdot (1 - W / W_1)] / (\lambda \cdot l_1 \cdot Y_1 \cdot V^2 \cdot P_a), \quad (11)$$

а в разі підбору дроселів з рівними ГДО дроселя  $D_2$  залежність  $S_{I2}$  має вигляд

$$S_{I2} = dP_a / dl_2 = -(2 - \lambda) \cdot (W - W_2) + (\lambda - 1) \cdot [\lambda - (\lambda \cdot W + U_2) / W_2] / l_2 \cdot Y_2 \cdot V^2 \cdot P_a, \quad (12)$$

де:  $W_1 = (W^2 + U_1)^{1/2}$ ;  $W_2 = (W^2 + U_2)^{1/2}$ ;  $U_1 = \lambda^2 \cdot Y_1 \cdot V \cdot P_{12}$ ;  $U_2 = \delta^4 \cdot Y_2 \cdot V \cdot P_{12}$ .

Формули (11) і (12) відображають залежність чутливості  $S_I$  мостової схеми від: розмірів прохідних каналів капілярів; тисків живлення моста; температури і параметрів газу. Дослідження показують, що  $S_I$  у великій мірі залежить від співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів та тисків живлення і мало - від параметрів газу. 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. Оскільки з практичних міркувань міст доцільно будувати на капілярах з однаковим діаметром прохідних каналів, то важливим є визначити оптимальну величину  $\lambda$ , яка забезпечує максимальну чутливість  $S_{I_{max}}$ . Як приклад на рис. 1 і рис. 2 представлено графіки залежності  $S_I$  ( $\lambda$ ,  $\Delta P_{ж}$ ) і  $S_{I_{max}}$  ( $X$ ,  $\Delta P_{ж}$ ).

Як видно з рис. 1, графіки мають екстремуми для певного співвідношення  $\lambda$ , яке можна знайти з рівняння  $dS_I / d\lambda = 0$ . Встановлено, що максимум чутливості відповідає конструкції подільника, коли на кожному із капілярів подільника встановлені приблизно однакові перепади тиску, тобто, коли  $P_a \approx (P_1 + P_2) / 2$ . При цьому чутливість  $S_I$  є доволі високою, а тому може забезпечити високу якість (малу похибку) підбирання дроселів з рівними ГДО. Так, наприклад, в разі підбирання капіляра з номінальними розмірами  $d = 0,15$  мм,  $l = 60$  мм для  $\Delta P_{ж} = 40$  кПа маємо  $S_{I_{max}} \approx 160$  Па/мм, в той час як для  $\Delta P_{ж} = 60$  кПа -  $S_{I_{max}} \approx 235$  Па/мм.

Як видно з рис.2, чутливість  $S_{I_{max}}$  мало залежить від виду газу а для усіх інертних газів, які застосовують при наповненні джерел світла, є практично однаковою.

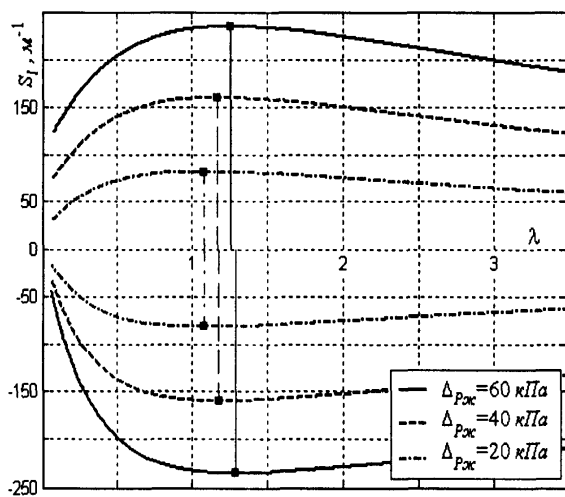


Рисунок 1

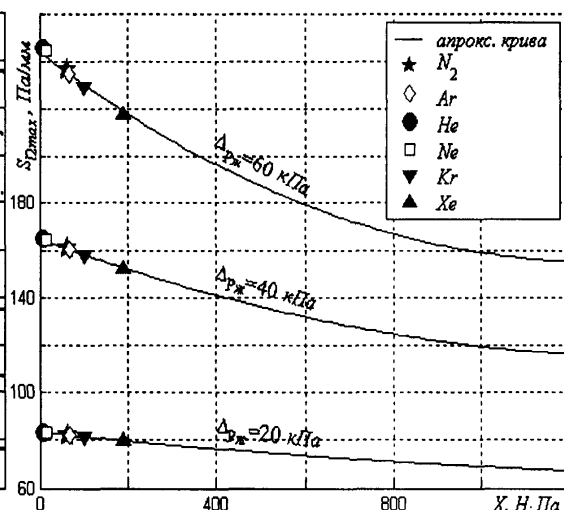


Рисунок 2

Рисунок 1 - Залежність чутливості  $S_I$  від співвідношення  $\lambda$  довжин прохідних каналів для різних перепадів тиску живлення  $\Delta P_{ж}$ . при протіканні  $N_2$  для виготовлення вхідних довжиною  $l_1 = 60$  мм (від'ємні значення  $S_I$ ) і вихідних довжиною  $l_2 = 60$  мм капілярів (додатні значення  $S_I$ ,  $d_1 = d_2 = 0,15$  мм

Рисунок 2 - Залежність максимальної чутливості  $S_{I_{max}}$  при виготовленні вихідного капіляра довжиною  $l_2 = 60$  мм від виду газу, вираженого комплексом  $X$ , для різних перепадів тиску живлення  $\Delta P_{ж}$ ,  $d_1 = d_2 = 0,15$  мм

### Побудова і застосування синтезаторів на рівноопорових дроселях

Принциповими перевагами синтезаторів, побудованих на рівновеликих (кратних) опорах (провідностях) є: а) можливість здійснення їх атестації через співвідношення ГДО капілярів у каналах змішувача, не застосовуючи при цьому аналітичних методів атестації; б) висока точність концентрацій компонентів синтезованих сумішей, зумовлена можливістю підбирання з високою точністю (як показано вище) рівноопорових дроселів. Крім того, високі метрологічні та експлуатаційні характеристики синтезаторів заданих концентрацій компонентів забезпечують такі принципи їх побудови: наявність в каналах компонентів пакетів із змінною кількістю увімкнених дроселів; багатостадійне розчинення для одержання низьких концентрацій компонентів; однакові та стабільні умови дроселювання компонентів синтезованої суміші; компенсація основних факторів впливу, зокрема тисків та температур.

Принципові схеми і конструкції газодинамічних синтезаторів можуть суттєво різнитися в залежності від складу суміші та діапазонів концентрацій її компонентів, необхідної точності задання концентрацій, кількості продукованих сумішей, витрати і тиску суміші на виході синтезатора, можливих змін параметрів зовнішнього середовища і споживача тощо.

На рис. 3, як приклад, наведена принципова схема газодинамічного синтезатора бінарних сумішей аргон-азот для градування і перевірки газоаналітичної апаратури. У схемі передбачено розчинення аргону, витрата якого задається капіляром  $K_1$ , азотом, витрата якого може бути різною завдяки можливості під'єднання різної кількості капілярів з пакету капілярів  $K_2, K_3, \dots, K_n$ . Всі капіляри ( $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ ) схеми мають однакові ГДО. Для встановлення певної концентрації аргону в суміші, наприклад 10 % об., необхідно за допомогою блоку 4 задання концентрації ввімкнути  $n=9$  електромагнітних клапанів ( $E_1, E_2, \dots, E_n$ ) і тим самим відкрити прохідні канали відповідних дроселів. Для синтезу суміші 20 % об.  $Ar$  в  $N_2$  необхідно ввімкнути в лінії азоту  $n=4$  дроселі. Стабілізація вхідних і вихідних тисків чистих компонентів і суміші на виході забезпечена застосуванням стабілізаторів абсолютного тиску відповідно 1, 2 і 3. Всі елементи синтезатора поміщені в термостат 5.

На базі запропонованої принципової схеми можна побудувати синтезатор з меншою кількістю дроселів, використовуючи дроселі із кратними газодинамічними провідностями. Для цього достатньо в лінії азоту встановити набір із 4 капілярів, наприклад, з провідностями  $S_l \in \{2S, 2S, 2S, 4S\}$  і одного капіляра в лінії аргону з провідністю 5. Встановлення концентрації 10 % об.  $Ar$  вимагає ввімкнення всіх електромагнітних клапанів кожної з ліній, а приготування суміші із 20 % об.  $Ar$  - ввімкнення клапана на лінії аргону і тих клапанів (клапана), які забезпечать сумарну провідність  $4S$  на лінії азоту. Застосування капілярів з кратними провідностями (опорами) призводить до відчутного зменшення кількості дроселів в синтезаторах, зокрема, як в розглядуваному прикладі - вдвічі.

Синтезатори, побудовані на базі дроселів з рівними (кратними) газодинамічними провідностями (опорами) забезпечують відносну похибку концентрацій компонентів на рівні 0,1 % відн. при відтворюваності 0,05 %.

Розроблені нами синтезатори запатентовані в індустріально розвинутих країнах, їх доцільно використовувати для перевірки газоаналітичної апаратури, зокрема, в теплоенергетиці для контролю складу природного газу та димових газів котлоагрегатів теплових станцій, а також в різних технологіях, зокрема, для керування концентраціями компонентів наповнювачів освітлювальної апаратури, наприклад, аргоно-азотної суміші в лампах з розжареним джерелом світла. Впровадження розроблених нами синтезаторів, зокрема в теплоенергетиці, дало суттєву економію палива і зменшило втрати тепла з димовими газами.

Ефективність розроблених нами газодинамічних синтезаторів особливо є відчутною при калібруванні газових хроматографів на природний газ, призначених для

визначення якості споживаного природного газу - одного із основних і дорогих енергоносіїв в Україні.

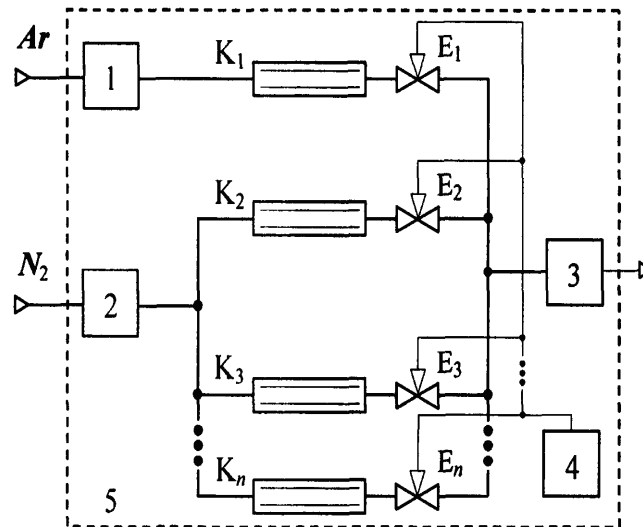


Рисунок 3 – Принципова схема газодинамічного синтезатора аргоно-азотної суміші:  
 1, ..., 3 – стабілізатори абсолютного тиску;  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$  – капіляри;  
 $E_1, E_2, \dots, E_n$  – електромагнітні клапани; 4 – блок задання концентрації компонентів; 5 - термостат

Виконаний нами аналіз існуючого стану метрологічного забезпечення таких аналітичних систем, як газові хроматографи показує, що найперспективнішим є застосування саме газодинамічних синтезаторів, оскільки вони забезпечують градування хроматографа за кількома точками діапазону зміни концентрації кожного компоненту при постійних концентраціях інших компонентів, а також якісну оцінку впливу супутніх компонентів на градувальні характеристики для кожного компоненту, що практично неможливо реалізувати при існуючій системі градування з допомогою перевірювальних газових сумішей в балонах. Згідно з нормативними документами, для градування аналітичного приладу на кожний компонент необхідно 3-4 перевірювальні суміші. Природний газ є сумішшю 11... 13 основних компонентів, тому для калібрування хроматографа на всі компоненти необхідно близько п'ятдесяти газових сумішей, тобто цілий парк балонів з газовими сумішами заданого складу. Транспортування, зберігання і обслуговування такої кількості балонів пов'язане із певними труднощами, крім цього приготування на газонаповнювальних станціях в балонах під високим тиском перевірювальних сумішей, які б забезпечували постійну концентрацію всіх компонентів суміші для різних концентрацій того компонента, відносно якого градують хроматограф, практично неможливо. Розроблені нами газодинамічні синтезатори потребують лише балонів з чистими компонентами і забезпечують приготування багатоконпонентних перевірювальних сумішей із різними концентраціями того компоненту, відносно якого калібрують хроматограф при постійних концентраціях решти компонентів за рахунок зміни концентрації в суміші газу-носія.

**Висновки.** Газодинамічні синтезатори, побудовані на основі розроблених принципів, завдяки їхнім перевагам доцільно застосовувати як для калібрування газоаналітичних систем, так і у відповідних технологічних процесах.

#### Література

1. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. - М.: Радио и связь, 1992. - 320 с.
2. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд. - Л./.. Энергоатомиздат, 1991. - 416 с.
3. Денисов В.П. Производство электрических источников света. - М: Энергия, 1975. - 488 с.
4. Ділай І.В., Теплюх З.М. Автоматизоване управління концентраціями компонентів газової суміші I Наукові нотатки // Міжвузівський збірник, вип. 20. Луцьк, 2007. С. 142-146.

5. Gary O. Nelson. Gas mixtures: preparation and control. Lewis Publishers, 1992. - 294 p.
6. Рейман Л.В. Техника микродозирования газов (Методы и средства для получения газовых смесей): Спр. пособие. - Л.: Химия. 1985. - 224 с.
7. Barrat R.S. The preparation of Standard Gas Mixtures. Analyst (London). 1981, 106, Mb 1265, p.817-849.
8. Теплох З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // Вісник НУ "Львівська політехніка" №551, "Автоматика, вимірювання та керування". Львів, 2006. С.87-94.
9. Патент Великобританії № 2136703. Mixing of gaseous substances /G.F.Gorin, A.Barcelhna, A.Lausarot / Feb. 23, 1983.
10. Патент США № 4605034. Gas flow control system for an anesthesia apparatus. Y.Urushida/ Oct. 23, 1984.
11. Коган И.Ш., Шишкин Г.П., Вайсман А.А. Падение давления в нецилиндрических круглых капиллярах // Пневмоавтоматика. XV всесоюзное совещание. Сент. 1985. Львов. Тезиси докл. Ч. 1. - М., 1985. - С148-149.
12. Теплох З., Пістун С, Ділай І. Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 59. Львів, 2002. С178-182.
13. Івахів О.В., Теплох З.М. Підгонка опору дроселів за допомогою газодинамічного моста // Вісник НУ "Львівська політехніка" № 475 "Автоматика, вимірювання та керування". Львів, 2003. С15-21.
14. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 287 с.
15. Бухгольц В.П., Тисевич З.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. - М.: Энергия, 1972. - 79 с.
16. Теплох З.М. Розрахунок ламінарного подільника тиску // Вісник ДУ "Львівська політехніка" № 273 Теплоенергетичні системи та пристрої. Львів, 1993. С. 42-44.

*Одержано 15.05.2008 р.*