

О.В. Кріль, О.В. МакарНаціональний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ КОМІРКИ З ТЕПЛОВИМ ЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ

© Кріль О.В., Макар О.В., 2011

In the paper are considered mathematical model of the measuring cell with a heat sensitive element to convert the thermal and mechanical parameters of the gas mixture in an electric output signal that can be used in the analysis of combined schemes of gas analyzers.

Постановка задачі

Розробляючи газоаналізатори для енергозберігаючих технологій з перероблювання відходів виробництва, перспективними є комбіновані методи аналізу на базі вимірювання теплофізичних і механічних параметрів газової суміші. Як перетворювачі теплофізичних і механічних параметрів газової суміші в електричний сигнал у них застосовують теплові чутливі елементи (ТЧЕ), вихідний сигнал яких – зміна електричного опору, яка залежить від теплопровідності, теплоємності, витрати, густини та в'язкості газової суміші [1]. Для подальшого дослідження комбінованих газоаналізаторів потрібно одержати математичну модель вимірювальної комірки (ВК) з тепловим чутливим елементом, за допомогою якої можна буде дослідити функціональні можливості та впливи неінформативних параметрів для різних схемотехнічних рішень приладів та за різних режимів роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У публікаціях [2, 3] розглядаються нові схеми ввімкнення вимірювальних комірок з тепловими чутливими елементами, що застосовуються в газоаналітичній техніці. У них аналіз проводиться для базових значень режимів роботи найпоширенішої конструкції ТЧЕ та ВК. Доцільно розширити математичні моделі для згаданих ТЧЕ та ВК так, щоб можна було дослідити зміну чутливості у разі зміни основних режимних параметрів роботи ВК з ТЧЕ та дослідити вплив неінформативних параметрів.

Формулювання цілей статті

Мета роботи – провести моделювання ВК з ТЧЕ за різних режимів роботи: з постійним значенням сили струму через ТЧЕ; з постійним значенням спадку напруги на ТЧЕ; з постійним значенням температури ТЧЕ. Експериментально оцінити точність математичної моделі.

Виклад основного матеріалу

Теплові чутливі елементи розрізняють за конструкцією і за матеріалом, з якого виготовлений елемент. Конструктивно ТЧЕ виготовляються у формі циліндра чи кулі, яка закріплена на тримачах. Конструкція тримача істотно впливає на статичну характеристику ТЧЕ. Для виготовлення ТЧЕ застосовуються метали з великим температурним коефіцієнтом опору: платина, вольфрам, нікель, а також різні напівпровідникові матеріали. У газоаналітичній техніці елементи, як правило, мають зовнішнє покриття для збільшення механічної міцності та корозійної стійкості, виключення каталітичних ефектів. Матеріал покриття – скло, термостійкі полімери.

Значення номінального опору найпоширенішої конструкції ТЧЕ становить близько 20 Ом, матеріал – платина з легуючими додатками металів платинової групи. Робочий струм через ці

елементи в серійних приладах перебуває в межах 40 – 100 мА (більші значення можуть призвести до руйнування через локальні перегрівання). Температура елемента лежить у межах 100 – 300 °С. Об'ємну витрату газової суміші через ВК з ТЧЕ доцільно вибирати в межах $0.1 - 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{год}$. Великі значення витрати ускладнюють конструкцію пристроїв пробопідготовки і конструкцію газоаналізаторів і не мають додаткових функціональних можливостей або інших переваг.

Функціональні можливості ТЧЕ значною мірою визначаються також конструкцією ВК, в якій розміщений елемент, геометрією обтікання газовим потоком ТЧЕ.

Досліджувалися ТЧЕ, які виконані з платинового мікропроводу та покриті склом для усунення можливих термokatалітичних реакцій. Такі ТЧЕ поміщені в протічну циліндричну комірку, конструкція якої наведена на рис. 1.

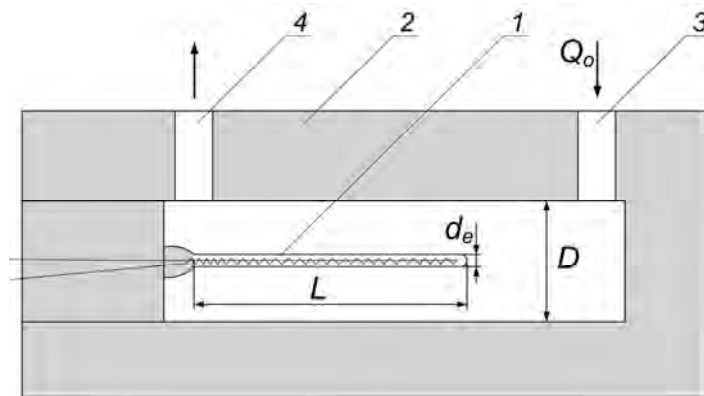


Рис. 1. Конструкція вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом

Платиновий чутливий елемент 1 коаксіально розміщений в циліндричній камері 2. Через канал 3 аналізована газова суміш підводиться в зону ТЧЕ і омиває його в повздовжньому напрямку. Канал 4 призначений для відведення газової суміші з комірки.

Конструктивні параметри ВК з ТЧЕ такі: діаметр комірки – $D = 6 \text{ мм}$; довжина комірки – 30 мм ; діаметр ТЧЕ – $d_e = 0.6 \text{ мм}$; довжина ТЧЕ – $L = 12 \text{ мм}$; діаметр каналів для підведення та відведення газової суміші – 2 мм ; опір ТЧЕ за температури 313 К – 22 Ом ; сила струму в номінальних режимах через ТЧЕ – 60 мА .

Математична модель побудована на основі критеріальної апроксимаційної залежності:

$$Nu = A + B \cdot Pe^n, \quad (1)$$

де Nu – критерій Нуссельта; Pe – критерій Пекле; A, B, n – коефіцієнти, які визначають експериментально, для конкретної конструкції ВК з ТЧЕ. За малих значень чисел Рейнольдса (малих витратах) цю залежність можна прийняти близькою до лінійної.

Під час побудови математичної моделі ВК з ТЧЕ були прийняті такі допущення: режим теплообміну стаціонарний; коефіцієнт теплообміну по довжині ТЧЕ постійний; температурний градієнт по радіусу ТЧЕ відсутній; в радіальному напрямі газ не перемішується.

На основі прийнятих припущень для ТЧЕ, який перебуває у ВК циліндричної форми, можна записати таку залежність:

$$q = \pi \cdot d_e \cdot L \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2), \quad (2)$$

де q – кількість тепла, що віддає тепловий чутливий елемент за одиницю часу, Вт; d_e – діаметр теплового чутливого елемента, м; α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м·К); T_2 – температура газу у вимірювальній комірці, К; T_1 – температура теплового чутливого елемента, К.

Кількість тепла, яка виділяється ТЧЕ, визначається за такою залежністю:

$$q = I^2 \cdot R, \quad (3)$$

де I – струм, що протікає через чутливий елемент, А; R – електричний опір ТЧЕ, Ом.

Підставивши вирази для критеріїв Нусельта та Пекле в рівняння (1), отримаємо

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} = A + B \cdot \frac{\rho \cdot v \cdot C_p \cdot d_e}{\lambda} \quad (4)$$

Середня швидкість газового середовища у вимірній комірці v однозначно зв'язана з витратою газу через вимірну комірку Q , залежністю

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \quad (5)$$

З врахуванням (5) рівняння (4) матиме вигляд

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} = A + B \cdot \frac{4 \cdot \rho \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \quad (6)$$

Після підставлення виразів (3) і (6) в (2) функціональна залежність для ВК з ТЧЕ, з врахуванням теплових втрат через торцеве з'єднання q_{emp} матиме вигляд

$$I^2 \cdot R = \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot (T_1 - T_2) \cdot \left[A + B \cdot \frac{4 \cdot \rho \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right] + q_{emp} \quad (7)$$

Для ТЧЕ, які застосовуються в газоаналітичній техніці, значення q_{emp} становить близько 10 – 40 % від всієї розсіяваної потужності на елементі. Це пояснюється тим, що ТЧЕ газоаналізаторів, на відміну від чутливих елементів термоанемометрів, призначені для довготривалого застосування в умовах механічних перевантажень, дії агресивних компонентів газової суміші. Тому їхній діаметр значно більший, значення відношення довжини до діаметра невелике і не перевищує 20. Тому значення q_{emp} для таких елементів велике і його не можна прийняти за постійну величину. Значення q_{emp} залежить від температури теплового елемента і для його врахування пропонується залежність

$$q_{emp} = (T_1 - T_2) \cdot \psi, \quad (8)$$

де ψ – коефіцієнт, що визначається експериментально для конкретної конструкції елемента, Вт/К.

Оскільки під час складання моделей теплових та комбінованих газоаналізаторів оперують масовими витратами газів, то залежність (7) з врахуванням (8) необхідно виразити через масову витрату газу:

$$I^2 \cdot R = (T_1 - T_2) \cdot \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_m}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] = (T_1 - T_2) \cdot K, \quad (9)$$

де Q_m – масова витрата газової суміші через вимірну комірку, кг/с.

Залежність (9) необхідно доповнити відношенням, яке відображає взаємозв'язок електричного опору теплового чутливого елемента і його температури. У такому разі для платинового чутливого елемента в вузькому діапазоні зміни температур можна обмежитися лінійною залежністю

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)), \quad (10)$$

де R_0 – опір теплового чутливого елемента при T_0 , Ом; $\alpha = 38 \cdot 10^{-4}$ 1/К – температурний коефіцієнт опору.

Для подальшого дослідження доповнюємо отриману математичну модель рівняннями, які встановлюють зв'язок параметрів λ , C_p та ρ зі складом аналізованої бінарної або псевдобінарної суміші

$$C_p = C_{p1} \cdot c_1 + C_{p2} \cdot (1 - c_1); \quad (11)$$

$$\rho = \rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot (1 - c_1); \quad (12)$$

$$\lambda = \lambda_1 \cdot c_1 + \lambda_2 \cdot (1 - c_1), \quad (13)$$

де c_1 – концентрація вимірюваного компонента газової суміші.

З рівняння (10) виразимо T_1 – температуру ТЧЕ:

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right). \quad (14)$$

Вираз для масової витрати двокомпонентної газової суміші має вигляд

$$Q_m = Q_o \cdot (\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot (1 - c_1)). \quad (15)$$

Підставимо рівняння (11–15) у математичну модель (9) і запишемо її у такому вигляді $R=f(c_1)$:

$$R_i = \frac{K \cdot (T_0 - 1/\alpha - T_2)}{I^2 - \frac{K}{\alpha \cdot R_0}}. \quad (16)$$

Рівняння (3.28) є рівнянням статичної характеристики ВК з ТЧЕ під час вимірювання концентрації газової суміші в режимі з постійним значенням сили струму через ТЧЕ.

За режиму $U = \text{const}$ – постійному значенні спадку напруги на ТЧЕ, рівняння статичної характеристики запишемо у вигляді

$$R_u = \frac{\alpha \cdot R_0}{2} \cdot \left[T_2 + 1/\alpha - T_0 + \sqrt{\frac{4 \cdot U^2}{\alpha \cdot R_0 \cdot K} + (T_0 - 1/\alpha - T_2)^2} \right] \quad (17)$$

За режиму $T = \text{const}$ – постійному значенні температури ТЧЕ, рівняння статичної характеристики матиме вигляд

$$I_t = \sqrt{K \cdot \frac{T_1 - T_2}{R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0))}}. \quad (18)$$

На основі отриманих залежностей побудовані зведені статичні характеристики ВК з ТЧЕ для трьох режимів роботи ТЧЕ (рис.2), при $I=\text{const}=60 \text{ mA}^*$; $U=\text{const}=3.2 \text{ V}(\circ)$; і $T=\text{const}=90 \text{ }^\circ\text{C}(+)$.

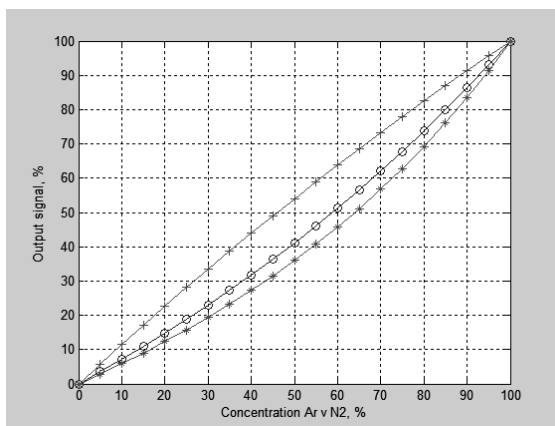


Рис. 2. Статичні характеристики ВК з ТЧЕ

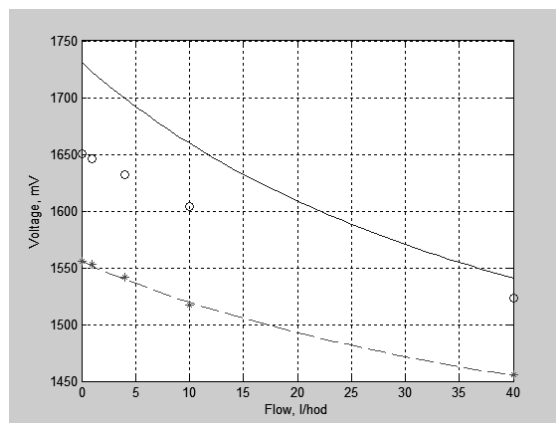


Рис. 3. Графік залежності розрахункових і експериментальних значень вихідного сигналу ВК з ТЧЕ від зміни витрати N_2 та Ar

Для оцінювання адекватності математичної моделі було проведене експериментальне дослідження, яке полягало в пропусканні через комірку чистих газів (азоту і аргону) з відомими параметрами і з заданими різними значеннями витрати. Досліджувались чотири однотипні ВК. Оцінювалась адекватність моделі ВК з ТЧЕ в режимі з постійним значенням сили струму.

Порівняльні результати експериментальних (азот “*”, аргон “o”) і розрахункових значень (азот “-”, аргон “-”) вихідного сигналу для досліджуваних комірок наведені на рис.3.

Максимальна розбіжність експериментальних і розрахункових даних для азоту не перевищує 2 %, а для аргону – 5%.

Висновки

Одержані залежності для ВК з ТЧЕ за різних режимів роботи ТЧЕ можна використати для дослідження функціональних можливостей комбінованих схем газоаналізаторів, в яких ТЧЕ застосовується як перетворювач теплофізичних та механічних параметрів газової суміші в електричний вихідний сигнал.

1. Горшков Ю. А., Уманський А. С. Измерение теплопроводности газов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с. 2. Кріль О.В., Кріль Б.А. Підвищення точності газоаналізаторів для пристроїв приготування азото-аргонової суміші // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докілья. автоматизація". – 2005. – № 537. – С. 155–158. 3. Кріль О.В., Кріль Б.А. Експериментальне порівняння режимів роботи теплових чутливих елементів газоаналітичних приладів. // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докілья. автоматизація". – 2009. – № 659. – С.84–91.

УДК 681.511.42

Б.А. Кріль, С.О. Кріль

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНОГО ПРИВОДУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОТОРНОГО ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ

© Кріль Б.А., Кріль С.О., 2011

The paper reviews release for improving the quality of regulation of technological objects with nonlinear characteristic, pulse regulator and motor actuator.

Постановка задачі

Для побудови систем автоматичного регулювання складних технологічних об'єктів широко застосовують регулятори з імпульсним вихідним сигналом; змінною структурою та змінними параметрами. Для цього умови зміни структури та зміни параметрів формують так, щоб не порушити стійкості системи автоматичного регулювання в момент цієї зміни. Додаткові можливості для покращення таких систем регулювання з'являються під час застосування частотного перетворювача як керуючого пристрою двигуна виконавчого механізму (ВМ). Підтвердження доцільності поєднання згаданих технічних засобів у системах регулювання і їх можливостей буде здійснене за допомогою моделювання системи регулювання для об'єкта з нелінійною характеристикою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У [1] розглядаються структурні схеми побудови імпульсних регуляторів з різними законами регулювання, які широко застосовуються в системах автоматизації технологічних об'єктів. У [2] розглядаються імпульсні регулятори зі зміною параметрів під час регулювання. Доцільно розглянути можливість введення плавної зміни швидкості виконавчого механізму для покращення якості регулювання об'єктів з нелінійною характеристикою.

Формулювання цілі статті

Мета роботи – провести моделювання системи автоматичного регулювання об'єкта з змінним коефіцієнтом передачі за різних режимів роботи, в якій електромоторним виконавчим механізмом керує частотний перетворювач, для якого завдання на зміну вихідної частоти міняється залежно від коефіцієнта передачі об'єкта.