

УДК 536.532

## ПРИНЦИПИ СИНТЕЗУ ТИПОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

**В.О. Фединець**

*Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013,  
тел. (8-032) 272-77-61, e-mail: acit@polynet.lviv.ua*

*Розроблено принципи та алгоритм конструювання типових конструкцій термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків. Показано, що в процесі практичного конструювання таких перетворювачів необхідно приймати заходи для одночасного усунення всіх складових похибок, які впливатимуть на характеристики тепло перетворювачів.*

*Ключові слова: термоперетворювач, конструювання, похибка, тепловідведення, газовий потік, камера гальмування.*

*Разработаны принципы и алгоритм конструирования типовых конструкций термопреобразователей для измерения температуры газовых потоков. Показано, что в процессе практического конструирования таких преобразователей необходимо принимать меры для одновременного устранения всех составляющих погрешностей, которые будут влиять на характеристики тепло преобразователей.*

*Ключевые слова: термопреобразователь, конструирование, погрешность, теплоотвода, газовый поток, камера торможения.*

*Principles of algorithm design and construction of typical thermocouples to measure temperature gas flows are developed. It is shown that in the practical design of such converters to make arrangements for simultaneous removal of all components of the errors that affect the characteristics of heat transformers.*

*Key words: thermal converter, design, error, heat, gas flow, chamber braking.*

Методи досліджень теплообміну високошвидкісних газових потоків потребують постановки достатньо складних і дорогих експериментів. Тому завдання створення якісно нових термоперетворювачів (ТП), що забезпечували б високу точність вимірювання температури і в результаті підвищували б ефективність експерименту та зменшували б терміни його проведення, є достатньо актуальним.

В зв'язку з цим стає необхідним розроблення оптимальних конструкцій ТП, які забезпечували б мінімальну похибку при дії на них змінних в часі вхідних і впливаючих факторів, які, як правило, є випадковими. В цьому випадку основна задача конструювання зводиться до забезпечення оптимальної точності і виконання умов фізичної реалізації конструкції, достатньої надійності та допустимих габаритних розмірів і маси. Перевищення значення оптимальної точності може призвести до різкого зниження інших якісних показників і непридатності конструкції до застосування. Вирішення задачі оптимізації конструкції ТП дозволяє знайти оптимальне управління вибраним показником якості вже на

стадії його проектування.

Повне аналітичне дослідження сумісного впливу всіх основних факторів на похибку вимірювання температури газового потоку конкретним ТП практично неможливе, оскільки деякі залежності, що описують характер впливу того чи іншого фактора, можуть бути визначені тільки експериментально. Тому в [1] кожний вид похибки аналізується окремо з припущенням, що решта її видів відсутні, а загальна похибка вимірювання розглядається як суперпозиція окремих видів похибок.

Для зручності проведення аналізу в [1] ТП представлено у вигляді окремих елементарних ланок із своїми операторами перетворення (математичними моделями) і із своїми складовими похибки. Причому за елементарну ланку приймається сукупність способів і засобів перетворення, що об'єднуються за характерними ознаками. При такому представленні ТП зручно проводити поетапну оптимізацію за ланками його еквівалентної схеми. Критерій оптимальності, функції обмежень та впливаючі фактори для кожної ланки можуть бути різними.

Еквівалентна схема перетворення ТП для

вимірювання температури газових потоків представлена у вигляді трьох послідовно з'єднаних ланок (підсистем): газодинамічної, теплової та електричної. Газодинамічна підсистема перетворює термодинамічну температуру газового потоку на вході ТП в температуру гальмування на вході в термочутливий елемент і характеризується "швидкісною" складовою похибки. Теплова підсистема перетворює цю температуру в рівноважну температуру термочутливого елемента і характеризується складовими похибки від теплопровідності, конвективного і теплообміну випромінюванням та похибки від наявності джерел енергії в ТП. Електрична підсистема перетворює температуру в вихідний електричний сигнал. Аналіз складових похибок, обумовлених швидкістю газового потоку, тепловідведенням через теплопровідність, випромінюванням і інерційністю та шляхи їх мінімізації представлено в [2-4].

Під час практичного конструювання ТП необхідно приймати заходи для одночасного усунення всіх складових похибок. Найбільш ефективними заходами для цього є: зменшення швидкості потоку в області робочого спаю ТП для зменшення швидкісної похибки; збільшення глибини занурення ТП у контрольоване середовище для зменшення похибки, обумовленої тепловідведенням через теплопровідність; підвищення температури стінок, що оточують ТП, з метою зменшення похибки, обумовленої випромінюванням; збільшення площі поверхні ТП, що омивається газовим потоком, для зменшення динамічної складової похибки.

Метою конструювання є створення таких місцевих умов вимірювання, при яких ТП буде фіксувати температуру газового потоку з потрібною точністю. Ці умови визначаються певним поєднанням елементів конструкції ТП. Під час конструювання ТП для вимірювання температури газових потоків необхідно враховувати також специфічні вимоги методики проведення газодинамічного експерименту.

Порядок розроблення елементів оптимальної конструкції ТП для вимірювання температури газових потоків можна представити у вигляді певної послідовності операцій, яка формулюється так:

– в залежності від конкретних умов вимірювання необхідно встановити максимальну допустиму похибку вимірювання з урахуванням як особливостей конструкції ТП (габаритні розміри, наявність камери гальмування), так і особливостей вимірюваної температури (температурний діапазон,

нерівномірність поля температури в просторі і часі, пульсації тощо);

– визначити наближено параметри набігаючого газового потоку (число  $M$ , температуру, питому масову витрату), температуру оточуючих стінок і допустимі габаритні розміри ТП;

– обчислити інтегральну похибку вимірювання (як суму складових швидкісної, похибки від теплообміну теплопровідністю і випромінюванням) для неекранованого чутливого елемента і наближено визначених параметрів газового потоку;

– визначити параметри газового потоку і умови вимірювання, які необхідно створити в області розміщення чутливого елемента (в камері гальмування) для доведення похибки до заданого значення. При цьому інтегральне значення похибки, яку необхідно усунути, треба розподілити певним чином між окремими складовими похибки;

– вибрати таке поєднання способів зменшення складових похибки, яке забезпечить певну швидкість газового потоку всередині камери гальмування і необхідні умови теплообміну через теплопровідність і випромінювання;

– для вибраної конструкції ТП і параметрів газового потоку розрахувати всі види похибок.

Якщо інтегральна похибка перевищує допустиме значення, то необхідно повторити операції, викладені в пунктах 5 і 6, добиваючись оптимального поєднання елементів конструкції ТП.

Виконання операцій за п.п. 1, 2 і 3 дозволяє визначити як значення інтегральної похибки, так і її окремі складові для незахищеного ТП. Характер розподілу окремих складових інтегральної похибки визначає шляхи і способи зменшення похибки і відповідно конструкцію ТП. Так, наприклад, якщо в інтегральній похибці вимірювання температури газового потоку ТП переважає швидкісна похибка, то доцільно в конструкції застосувати камеру гальмування з невеликою кількістю екранів і достатньою довжиною глибини занурення ТП. Якщо ж переважає похибка, обумовлена теплообміном через випромінювання, то необхідно передбачити достатню кількість екранів.

Після того, як інтегральна похибка вимірювання розподілена за окремими складовими з урахуванням впливу газового потоку, можна вибрати допустиму швидкість потоку  $V_{max}$  поблизу чутливого елемента ТП. Якщо позначити через  $\Delta t_{ув}$  допустиму швидкісну похибку, то згідно [2] дістанемо, що:

$$V_{\max} = \left( \frac{2C_p \Delta t_{\text{ус}}}{1-r} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $C_p$  – питома теплоємність газового потоку при постійному тиску,  $r$  – коефіцієнт відновлення ТП.

З урахуванням законів газової динаміки [5] виразимо швидкість в безрозмірному вигляді через число Маха  $M$ , з урахуванням допущення, що  $1 + \frac{k-1}{2} M^2 \approx 1$ :

$$M_{\max} = \left( \frac{2}{k-1} \frac{\Delta t_{\text{ус}}}{(1-r)T_0} \right), \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт адиабати газового потоку,  $T_0$  – термодинамічна температура газового потоку.

Таке допущення є оправданим, оскільки значення  $M_{\max}$  в камері гальмування ТП, як правило, не перевищує 0,3.

Розрахувавши таким чином допустиму швидкість потоку поблизу чутливого елемента, необхідно порівняти її із швидкістю набігаючого потоку. Якщо швидкість набігаючого потоку є вищою, то необхідно вибирати ТП з камерою гальмування з вентиляційними отворами відповідних розмірів. Якщо ж швидкість набігаючого потоку є нижчою, то можливі два шляхи:

а) або обмежитися тим значенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі, що забезпечується існуючою швидкістю набігаючого потоку;

б) або підвищити швидкість потоку поблизу чутливого елемента шляхом відсмоктування його в зовнішню систему.

Вибравши значення внутрішньої швидкості, необхідно вибрати діаметр термоелектродів, враховуючи при цьому, що складова похибки, яка обумовлена як випромінюванням, так і теплообміном через теплопровідність, буде тим меншою, чим меншим буде діаметр термоелектродів. Але при цьому необхідно забезпечити достатню міцність і довговічність чутливого елемента ТП. При заданих значеннях тиску і температури внутрішня швидкість потоку і діаметр термоелектродів визначають значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі  $\alpha$  від газового потоку до ТП. Значення  $\alpha$  визначається за відомими залежностями [4, 6] для поздовжнього і для поперечного обтікання ТП потоком.

Після визначення  $\alpha$  необхідно задатися допустимою складовою похибки  $\Delta t_e$ , обумовленою випромінюванням, і розрахувати необхідну кількість екранів.

Число екранів, яке необхідне для забезпечення складової похибки  $\Delta t_e$  можна визначити з допомогою методів, описаних в [3].

Для випадків, коли екранування ТП не дає потрібного ефекту (наприклад, при дуже малій густині газового потоку або якщо число екранів обмежено малими габаритними розмірами ТП), можливе електричне підігрівання екрана. Але при цьому виникають додаткові експлуатаційні труднощі, що пов'язані з регулюванням інтенсивності підігрівання.

Після того, як відповідними заходами складові похибки вимірювання, обумовлені випромінюванням, і швидкісна складова похибки будуть доведені до потрібного значення, необхідно підібрати відповідну довжину робочої ділянки ТП для зменшення складової похибки  $\Delta t_m$ , обумовленої тепловідведенням через теплопровідність, яка визначається такою відомою залежністю [4]:

$$\Delta t_m = t_n - t_0 = -\frac{t_0 - t_{cm}}{ch L \sqrt{4\alpha/\lambda}}, \quad (3)$$

де  $t_n$ ,  $t_0$ ,  $t_{cm}$  – температури чутливого елемента ТП, газового потоку, ТП в точці кріплення його до арматури, відповідно;  $L$ ,  $d$  – довжина і діаметр робочої ділянки ТП, відповідно;  $\alpha$  – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від газового потоку до чутливого елемента;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу чутливого елемента.

Враховуючи перетворення виду

$$ch x \approx 0.5^x \text{ при } x \geq 5, \quad (4)$$

рівняння (3) прийме такий вигляд:

$$\Delta t_m = \frac{2(t_0 - t_{cm})}{\exp(L \sqrt{4\alpha/\lambda})}. \quad (5)$$

Для такої завищеної оцінки довжина робочої ділянки  $L$  ТП визначиться так:

$$L = \frac{\ln \frac{2(t_0 - t_{cm})}{\Delta t_m}}{\sqrt{4\alpha/d\lambda}}. \quad (6)$$

Залежності (5) і (6) справедливі при умові, що  $L \sqrt{4\alpha/d\lambda} \geq 5$ .

Якщо дана нерівність не виконується і перетворення виду  $ch x \approx 0.5^x$  не прийнятне, то довжину робочої ділянки  $L$  на основі рівняння (6) необхідно визначити чисельними методами.

Узагальнений алгоритм конструювання типових ТП для вимірювання температури газових потоків зображено на рис. 1.

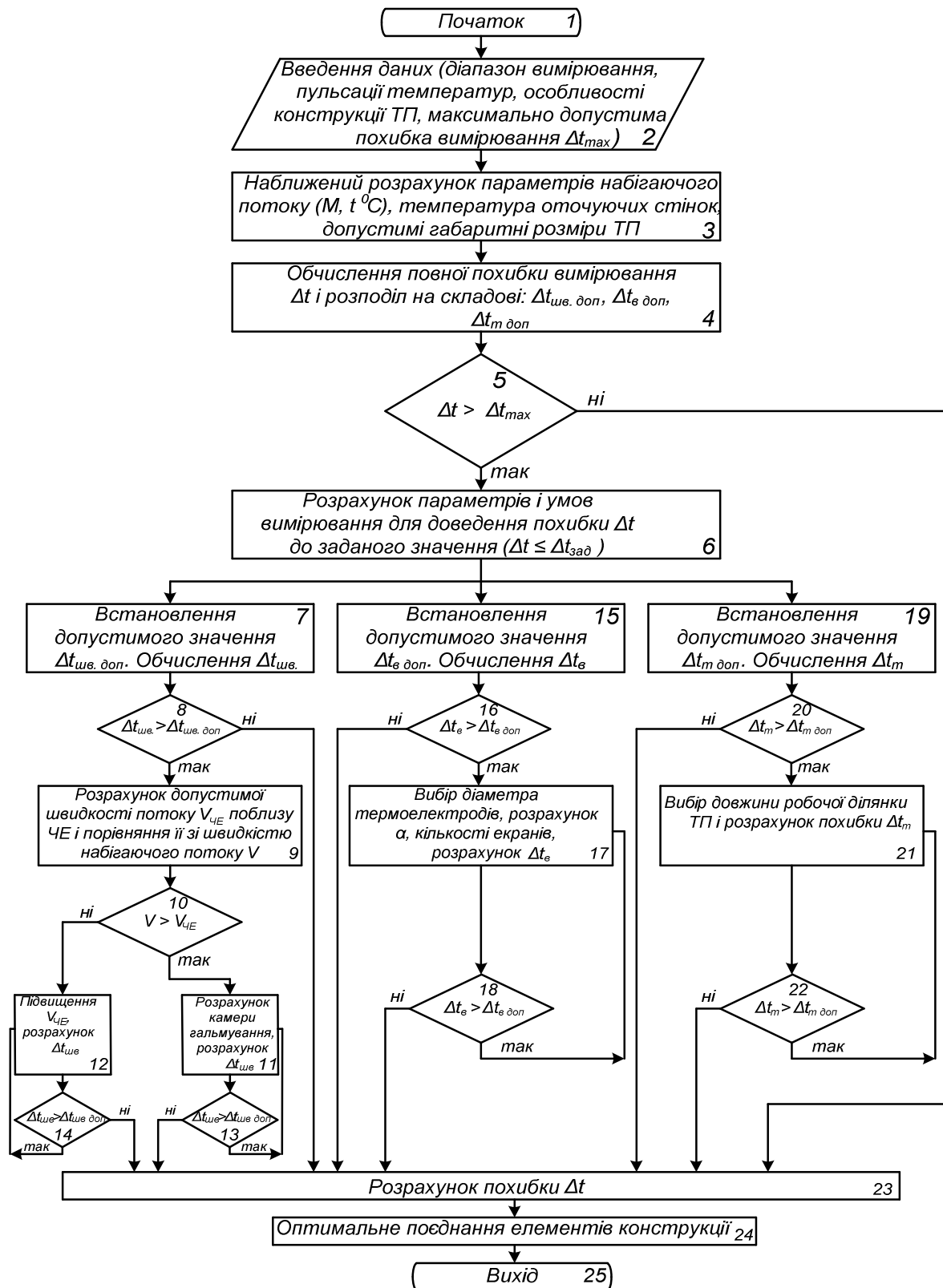


Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм конструювання типових конструкцій ТП для вимірювання температури газових потоків

Необхідно відзначити, що велике тепловідведення від чутливого елемента може звести нанівець всі переваги ТП, навіть при умові, що він вдало був сконструйований з точки зору зменшення інших складових похибки вимірювання. Враховуючи, що складова похибки, яка обумовлена теплообміном через теплопровідність, легко піддається зменшенню шляхом вибору відповідної довжини робочої ділянки ТП, під час конструювання необхідно рекомендувати максимальне зменшення цієї складової похибки.

### ВИСНОВОК

Застосування запропонованих принципів та алгоритмів дає можливість здійснювати автоматизоване машинне проектування ТП, що призведе до зменшення вартості і термінів розробки, таких ТП.

1. Фединець В.О. Засади конструкторсько-технологічної оптимізації перетворювачів температури високошвидкісних газових потоків / В. О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" Автоматика, вимірювання та керування.. – 2007. – № 574. – С. 111–115. 2. Фединець В.О. Математична модель газодинамічної підсистеми перетворювачів

температури газових потоків / В.О. Фединець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – Вип. 68. – С. 108–111. 3. Фединець В.О. Вплив захисних екранів термоперетворювача на похибку від випромінювання при вимірюванні температури газових потоків / В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2003. – №476. – С. 67–72. 4. Фединець В.О. Мінімізація складової похибки від теплообміну через теплопровідність під час вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного Університету України. - 2010. – Вип.. 20.3. – С.275–280. 5. Христианович С. А. Прикладная газовая динамика / Сергей АлексеевичХристианович. – М.: Изд-во БНИ ЦАГИ, 1948. – 145 с. 6. Моффат Р. Д. Измерение температуры газа / Р.Д. Моффат // Измерение нестационарных температур и тепловых потоков. – М.: Мир, 1966. – С. 17–55.

Поступила в редакцію 25.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Пістун Є.П.