

Висновки та перспективи подальших досліджень

Ці графічні залежності дають можливість прогнозувати величину концентрації рідини в певній точці частинки від часу. За допомогою цієї математичної моделі можна спрогнозувати час заповнення рідиною полімерної оболонки і частинки без врахування процесів їх насичення.

В подальших дослідженнях будуть розроблені математичні моделі масоперенесення через полімерну оболонку розчинів з врахуванням проникнення рідини.

1. Gumnitsky I. M., Al-Alusik F., Demchuk I. A. *Solufio kinetics of encapsulated particles// Proc. 5th conf. of appl. chem. unit operations and processes. Hungary. – 1989. – V. 1. – P 228.*
2. Гумницький Я. М., Федін І. М., Аль-Алусі К. Ф., Демчук І. А. *Масоперенос из твердой фазы через нерастворимую полимерную оболочку / Теор. основы хим. техн. – 1992. – Т. 26, № 4. – С. 510.*
3. Демчук І. А., Нагурський О. А., Гумницький Я. М. *Масоперенос из твердой шарообразной частицы, покрытой полимерной оболочкой / Теор. основы хим. техн. – 1997. – Т. 31, № 4. – С. 380 – 384.*
4. Demchuk I. A., Gumnitsky I. M., Popovych O. R., Nagurskyi O. A., Martynyak O. R. *Prococolings of the Second West Ukrainian Symposium on Adsorption Chromatography. – Lviv. June 5-7, 2000.*
5. Беляев Н. М., Рядно А. А. *Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. Ч. 1. – М. 1982.*
6. Березин И. С., Жидков Н. П. *Методы вычислений. В 2-х частях. Ч. 2. – М. 1962.*

УДК 536.532(088.8)

Ю. Скрипник, Г. Юрчик*

Київський національний університет технологій та дизайну,
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій,
*Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА АВТОКАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕРМОМЕТРІВ В УМОВАХ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Скрипник Ю., Юрчик Г., 2003

In the present work it's being analyzed the method aimed to improve accuracy and provision of metrological reliability of the digital thermo-electric thermometers using their periodical self-verification in service conditions.

Постановка проблеми і формування цілі статті

Підвищення точності і забезпечення метрологічної надійності цифрових і аналогових термоелектричних термометрів або вимірювальних каналів температури, які знайшли надзвичайно широке застосування в різних галузях промисловості і наукових дослідженнях, є актуальним завданням. Складність його зумовлена тим, що первинні термоелектричні перетворювачі (ТЕП) температури цих термометрів знаходяться під постійною дією високих температур, хімічної агресивності контрольованих середовищ та інших впливових експлуатаційних чинників. Це істотно і досить швидко змінює термоелектричні властивості ТЕП, а похибка вимірювального перетворення виходить далеко за межі допустимої [1, 2]. У зв'язку з цим, основним джерелом домінуючих похибок термоелектричних термометрів (ТТ) є прогресуючий дрейф градувальної характеристики (ГХ) ТЕП. При цьому кінцевий результат вимірювання температури від початку і в процесі експлуатації ТТ починає усе більше залежати від прогресуючих мультиплікативної та адитивної складових похибок. Перша складова, зумовлена поступовою зміною чутливості ТЕП, тобто зміною його диференціального термоелектричного коефіцієнта (коефіцієнта Зеєбека), а друга (похибка від паралельного зміщення ГХ) зростає із-за прогресуючого розвитку термоелектричної неоднорідності

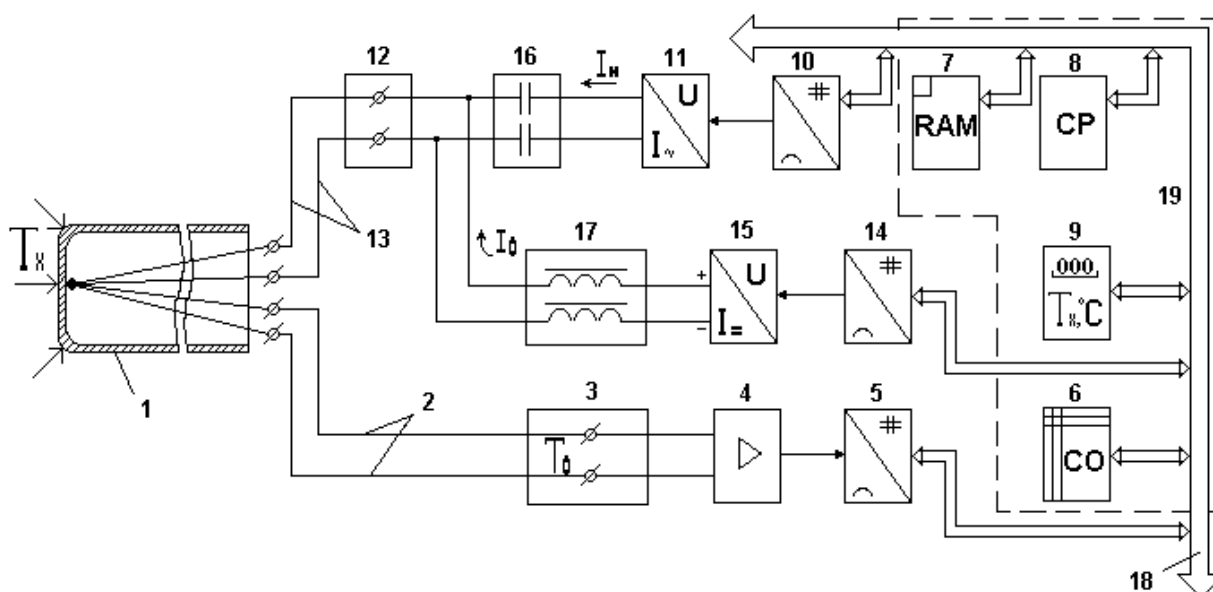
електродів ТЕП по їх довжині і появи паразитної термоелектрорушійної сили (ТЕРС) на виході ТЕП. На точності вимірювання ТТ відбивається також неконтрольовані зміни температури вільних кінців ТЕП, ступінь нелінійності його перетворювальної характеристики, а також зміни коефіцієнтів передачі, підсилення як лінії зв'язку, так і засобів вторинного перетворення вимірювальної інформації, якщо їх не контролювати окремо по тестових сигналах.

Останні дослідження і публікації з проблеми автокалібрування ТТ

Відомі розроблені методи автокорегування вищенаведених похибок ТТ [3,4,5], а також методи калібрування ТТ в умовах їх експлуатації [6, 7, 8] передбачають введення в схему ТТ додаткових пристроїв для формування і здійснення каліброваних теплофізичних впливів безпосередньо на ТЕП в місці його установки на технологічному обладнанні. Згідно з цими методами виникає необхідність розробки і застосування в термометрах первинних ТЕП нестандартних складних конструкцій, зокрема конструкцій ТЕП з вбудованими еталонами температури, що ускладнює використання цих методів для автоматичного калібрування ТТ, які призначені для роботи в широкому діапазоні температур. Крім того, математичні формули для визначення дійсного значення контрольованої температури в методах [3, 4, 5] містять величини несталіх коефіцієнтів (коефіцієнт Пельтьє, коефіцієнт конвективних втрат, термічний коефіцієнт), що призводить до появи методичних похибок і відповідно до зниження точності цих методів корегування та калібрування ТТ.

Метод та алгоритм калібрування ТТ

Нижче аналізується запропонований метод автокалібрування ТТ в умовах їх експлуатації, який реалізується за допомогою вбудованої в структуру ТТ мікропроцесорної системи (рисунок), не потребуючої спеціальних еталонів і жорстких умов до стабільності термоелектричних коефіцієнтів ТЕП.



Функціональна схема цифрового ТТ з вбудованою мікропроцесорною системою автокалібрування:

- 1 – подвійний стандартний ТЕП із захисним чохлам (тип ТХА-0179, ТХК-0179);
- 2 – інформаційна лінія зв'язку (компенсаційні дроти); 3 – пристрій стабілізації температури вільних кінців ТЕП; 4 – диференціальний підсилювач; 5 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- 6 – блок управління; 7 – оперативно-запам'ятовуючий пристрій; 8 – обчислювач;
- 9 – цифровий індикатор контрольованої температури; 10 – цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП);
- 11 – перетворювач напруги в змінний струм; 12 – клемна колодка для силової лінії зв'язку
- 13 – системи з ТЕП; 14 – цифро-аналоговий перетворювач з бінарним виходом;
- 15 – перетворювач напруги в постійний струм; 16, 17 – блоки розв'язки ланцюгів змінного та постійного струмів; 18 – загальна шина мікроЕОМ 19

Важливою особливістю цієї системи є те, що вона може бути повністю реалізована на основі серійних первинних ТЕРП, а також сучасної мікроелектронної аналогової і цифрової елементної бази [9, 10].

Алгоритм вимірювання температури ТТ з мікропроцесорною системою його автокалібрування полягає ось у чому.

На початку тривалої експлуатації ТТ проводять його первинне калібрування безпосередньо на технологічному об'єкті при визначених температурах робочого кінця ТЕРП з врахуванням його ГХ, яка записана в оперативно-запам'ятовуючому пристрої 7. Для нагрівання робочого кінця ТЕРП 1 до певних температур робочого діапазону використовують одну пару електродів подвійного ТЕРП і здійснюють це змінним струмом певної амплітуди за допомогою перетворювача напруги в змінний струм 11 і цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) 10 по програмі блока управління 6. Стале значення ТЕРС, що утворюється через певний час на вільних кінцях другої пари електродів ТЕРП, поступає на вхід диференціального підсилювача 4. Після підсилення вимірювальний сигнал перетворюється в цифровий код АЦП 5, якому згідно з ГХ ТЕРП відповідає певне значення температури його робочого кінця T_{k1} і яке фіксується системою і може спостерігатися на цифровому табло 9. При цьому цифровий код ТЕРС E_1' , яка спостерігається на виході ТЕРП, матиме значення

$$N_1' = SK(\alpha_k T_{k1} - \alpha_0 T_0) = SKE_1', \quad (1)$$

де α_k, α_0 – коефіцієнти Зеебека робочого та вільних кінців ТЕРП при температурі відповідно T_k і T_0 ;

S – номінальна крутизна перетворення ТЕРС в цифровий код;

K – коефіцієнт підсилення підсилювача 4.

Оскільки коефіцієнт $\alpha_k = dE/dT$ функціонально залежить від температури T_k , то ГХ ТЕРП в загальному випадку нелінійна. Однак в околі робочої точки ГХ її можна замінити апроксимуючою дотичною і вважати, що невеликі зміни температури ΔT робочого кінця ТЕРП ($\Delta T \ll T_k$) викликають пропорційні, тобто лінійні зміни ТЕРС. Цифровий код N_1' згідно з програмою заноситься в пам'ять пристрою 7, після чого по команді блока управління 6 через робочий кінець ТЕРП (друга пара електродів) пропускають постійний струм, сформований за допомогою ЦАП 14, і перетворювач напруги в постійний струм 15. При цьому внаслідок ефекту Пельтьє залежно від напрямку струму досягається охолодження або додаткове нагрівання робочого кінця ТЕРП [11, 12]. Спочатку пропускають оптимальний струм I_0 в напрямку, при якому досягається максимальне термоелектричне стаціонарне охолодження і зниження температури робочого кінця ТЕРП. При досягненні термодинамічного балансу робочого кінця ТЕРП з оточуючим середовищем цифровий код усталеного значення ТЕРС на виході ТЕРП матиме значення

$$N_2' = SK\{\alpha_k [T_k + (0,5I_0^2R - \Pi_0)/C] - \alpha_0 T_0\}, \quad (2)$$

де $0,5I_0^2R$ – частка теплоти Джоуля, що виділяється в робочому кінці ТЕРП;

Π_0 – теплота Пельтьє, що поглинається в робочому спаї ТЕРП і викликає його відповідне охолодження;

Π – коефіцієнт Пельтьє робочого кінця ТЕРП;

C – еквівалентна теплоємність робочого кінця ТЕРП, яка визначається його масою, питомими теплоємностями матеріалів електродів, а також температурою T_k .

Якщо в рівняння (2) замість коефіцієнта Пельтьє підставити його значення відповідно до відомого співвідношення $\Pi = \alpha_k T_k$ [11], то цифровий код N'_2 зобразиться у вигляді

$$N'_2 = SK\{\alpha_k [T_k + (0,5 I_0^2 R - \alpha_k T_k I_0) / C] - \alpha_0 T_0\}. \quad (3)$$

Цифровий код N'_2 також запам'ятовується, після чого по команді блока управління б формується другий теплофізичний вплив на робочий кінець ТЕП. Для цього змінюють полярність керуючої напруги на виході бінарного ЦАП 14, в результаті чого через робочий кінець ТЕП пропускають струм I_0 у зворотному напрямку, що викликає реверсивний ефект виділення в робочому кінці ТЕП додаткового тепла Пельтьє і відповідне збільшення його температури відносно температури калібрування T_k на декілька градусів $\Delta T < 10^\circ \text{K}$. При наступленні стану термодинамічної рівноваги робочого кінця ТЕП з оточуючим середовищем цифровий код усталеного значення ТЕРС на виході ТЕП матиме значення

$$N'_3 = SK\{\alpha_k [T_k + (0,5 I_0^2 R + \alpha_k T_k I_0) / C - \alpha_0 T_0\}. \quad (4)$$

Цифровий код N'_3 також запам'ятовують і по команді блока управління б припиняють протікання змінного і постійного струмів через робочий кінець ТЕП.

Калібрування ТТ при температурі робочого кінця ТЕП T_{k1} на цьому закінчується, а в пам'яті пристрою 7 фіксуються результати калібрування – цифрові коди N'_1, N'_2 та N'_3 , а також код температури T_{k1} , який визначається автоматично по ГХ ТЕП, коди оптимального постійного струму I_0 і змінного струму нагрівання I_{n1} робочого кінця ТЕП.

Далі по команді блока управління б за допомогою ЦАП 10 формується нове значення струму нагрівання робочого кінця ТЕП $I_{n2} > I_{n1}$ і описані вище операції повторюються, а результати калібрування ТТ в іншій точці робочого діапазону при температурі T_{k2} також запам'ятовуються за допомогою пристрою 7. Після проведення вищеописаних операцій в інших заданих точках діапазону робочих температур первинне калібрування ТТ закінчується.

Як було зазначено вище, в процесі експлуатації ТТ в ТЕП відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси, пов'язані з його старінням, в результаті чого його ГХ деформується та зміщується, що зумовлює прогресуючу похибку ТТ. При нелінійній ГХ ТЕП її деформації в кожній робочій точці можна врахувати поворотом апроксимуючої дотичної (мультиплікативна похибка або похибка чутливості) і паралельним зміщенням дотичної (адитивна похибка або похибка нуля).

Для врахування цих похибок в процесі тривалої експлуатації ТТ при визначенні шуканої температури для кожної контрольної точки отримують, крім основного, результати двох додаткових вимірювань. Для цього по команді блока управління б за допомогою ЦАП 10 формують ступенево-зростаючі змінні струми нагрівання $I_{n1}, I_{n2}, I_{n3} \dots$, які по чергово пропускають через робочий кінець ТЕП 1. При значенні струму I_{n1} проводять охолодження і додаткове нагрівання робочого кінця ТЕП шляхом пропускання через нього постійного струму відомого значення I_0 в різних напрямках у тій самій послідовності, що і при первинному калібруванні.

На початку вимірюють ТЕРС на виході ТЕП, яка відповідає температурі нагрівання робочого кінця змінним струмом I_{H1} . Оскільки ГХ ТЕП 1 в процесі експлуатації змінилась, то температура робочого кінця невідома, але результат термоелектричного перетворення невідомої температури T_x за аналогією з виразом (1) можна подати у вигляді

$$N_1'' = SK[\alpha_k(1 + \gamma_1)T_x - \alpha_0 T_0 + \delta_1], \quad (5)$$

де $\gamma_1 = \Delta\alpha/\alpha_k$ – відносна мультиплікативна похибка, яка викликає зміну чутливості ТЕП;

$\Delta\alpha$ – експлуатаційні зміни коефіцієнта Зеєбека робочого кінця ТЕП;

δ_1 – абсолютна адитивна похибка (дрейф нуля ТТ), зумовлена зміщенням ГХ ТЕП із-за зміни температури вільних кінців ТЕП і появи паразитної ТЕРС внаслідок прогресуючої неоднорідності термоелектродів ТЕП.

Похибки γ_1 і δ_1 містять також мультиплікативні і адитивні складові похибки підсилувача 4 і ЦАП 5.

Цифровий код N_1'' запам'ятовують в пристрої 7. Далі в системі виконуються додаткові вимірювання ТЕРС на виході ТЕП при охолодженні і нагріванні його робочого кінця відомим постійним струмом I_0 таким самим шляхом, як і при первинному калібруванні ТТ.

В результаті отримують відповідні значення цифрових кодів:

$$N_2'' = SK\{\alpha_k(1 + \gamma_2)T_x + [0,5I_0^2R - \alpha_k(1 + \gamma_2)T_x I_0]/C_2 - \alpha_0 T_0 + \delta_2\}; \quad (6)$$

$$N_3'' = SK\{\alpha_k(1 + \gamma_3)T_x + [0,5I_0^2R + \alpha_k(1 + \gamma_3)T_x I_0]/C_3 - \alpha_0 T_0 + \delta_3\}, \quad (7)$$

де γ_2, γ_3 і δ_2, δ_3 – похибки перетворення ТЕРС в цифровий код;

C_2 і C_3 – еквівалентна теплоємність робочого кінця ТЕП.

Цифрові коди N_2'' і N_3'' запам'ятовують в пристрої 7. Далі з врахуванням цифрових кодів первинного калібрування обчислювач 9 системи виконує операцію визначення калібрувального числа N згідно з формулою

$$N = \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')^2}. \quad (8)$$

Для визначення залежності калібрувального числа N від вимірюваної температури і температури калібрування потрібно врахувати, що усі зміни температури робочого кінця ТЕП при охолодженні та додатковому його нагріванні відбуваються в невеликому діапазоні температур ($\Delta T_k \ll T_k$), і перетворення ТЕРС в цифровий код здійснюється з однаковими похибками, тобто

$$\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma_3 \approx \gamma; \delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta_3 \approx \delta. \quad (9)$$

При цьому з певним наближенням можна вважати, що теплоємності $C_1 \approx C_2 \approx C_3 \approx C$. З врахуванням (9), підставляючи у вираз (8) коди N_1', N_2' і N_3' з виразів (1), (3), (4) і коди N_1'', N_2'' і N_3'' з виразів (5), (6), (7), отримують відношення кодів (8) у вигляді відношення температур

$$N_0 = T_x/T_k = N_{x1}/N_1', \quad (10)$$

де N_{x1} і N_1' – коди температур робочого кінця ТЕП в першій робочій точці після експлуатації і при початковому калібруванні.

З виразу (10) визначають значення температури робочого кінця ТЕП при вторинному калібруванні, код якої відповідає змінному струму нагрівання $I_{н1}$:

$$N_{x1} = N_0 \cdot N_1' = \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')} N_1'. \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що результат обчислення температури робочого кінця ТЕП навіть після тривалої експлуатації ТТ не залежить від поточних значень коефіцієнтів Зеєбека і Пельтьє, а також значень постійного та змінного струмів.

Код похибки ТТ в робочій точці ГХ визначається з виразу

$$\Delta N_1 = N_1'' - \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')} N_1', \quad (12)$$

де N_1'' – код показу термометра в процесі вторинного калібрування.

Відповідно визначаються коди похибки ΔN_i при струмах нагрівання $I_{н2}, I_{н3} \dots I_{ні}$:

$$\Delta N_i = N_{1i}'' - \frac{(N_{3i}'' - N_{2i}'')(N_{2i}' + N_{3i}' - 2N_{1i}')^2}{(N_{3i}' - N_{2i}')(N_{2i}'' + N_{3i}'' - 2N_{1i}'')} N_{1i}', \quad (13)$$

де N_{1i}'' – коди показів термометра при різних струмах нагрівання робочого кінця ТЕП в процесі вторинного калібрування;

N_{1i}' – код температури робочого кінця ТЕП при і-тому струмі нагрівання в процесі первинного калібрування, яка визначається по номінальній ГХ ТЕП.

За отриманими результатами вимірювань в процесі експлуатації ТТ в оперативно-запам'ятовувачий пристрій 7 заносять коди поправок:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= -\Delta N_1; \\ \Pi_2 &= -\Delta N_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \Pi_i &= -\Delta N_i. \end{aligned} \quad (14)$$

При подальшому вимірюванні на табло цифрового індикатора 10 по програмі виводиться значення вимірюваної температури робочого кінця ТЕП згідно з ГХ і значення поправки до цієї температури на прогресуючий дрейф ГХ ТЕП, а також на можливі зміни коефіцієнтів перетворення вторинних засобів вимірювання ТТ. Частота повторних калібрувань ТТ залежить від швидкості дрейфу ГХ ТЕП і заданої точності конкретного технологічного процесу.

Висновки

В статті викладений аналіз методу автокалібрування цифрових ТТ безпосередньо в умовах їх експлуатації, який реалізується за допомогою вбудованої в структуру ТТ мікропроцесорної системи. Алгоритм функціонування ТТ дає можливість забезпечити метрологічну надійність вимірювальних каналів температури протягом тривалого часу їх експлуатації в умовах швидкого дрейфу ГХ ТЕП термометрів внаслідок дії на них високих

температур і хімічної агресивності контрольованого середовища шляхом автокорегування прогресуючих похибок результату вимірювання як адитивного, так і мультиплікативного характеру.

1. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – Л., 1990. 2. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – К., 1983. 3. Способ определения погрешностей термоэлектрических термометров: А.с. 1362964 СССР, МКИ G01 K15/00/ Г.В. Юрчик, Ю.А. Скрипник, Э.С. Браилов (СССР) – №4093483/24. Заявл. 25.07.86; Опубл. 30.12.87; Бюл. №48, – 5 с. 4. Способ определения погрешностей термоэлектрических термометров: А.с. 1397752 СССР, МКИ G01 K15/00/ Г.В. Юрчик, Ю.А. Скрипник (СРСР) – 4128389/24. Заявл. 18.08.86; Опубл. 23.05.88; Бюл. №19, – 4 с. 5. Способ определения погрешностей термоэлектрических термометров: Пат. 2010191 Россия, МПК G01 K15/00/ Ю.А. Скрипник, В.И. Скрипник, А.И. Химичева, С.И. Кондрашов, С.С. Балык (Украина) – 5003566/10. Заявл. 08.07.91; Опубл. 30.03.1994. 6. Collier R.D. Calibration with confidence: The assurance of temperature accuracy. In *Temperature: its measurement and control in science and industry*, 1982, vol. 5, part 2. New York: American Institute of Physics, p.p. 1311-1315. 7. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М., 1986. 8. Многоканальное устройство для измерения температуры с автоматическим калиброванием каналов: А.с. 717564 СССР, МКИ G01 K15/00/ С.С. Зельманов, В.А. Антоненков, В.Ю. Мильченко, В.П. Чудиновский, Н.Н. Елькин, Н.А. Кривов, В.Н. Васенев, В.В. Кочан и Е.А. Кулев (СССР) – 2633095/18. Заявл. 31.07.78; Опубл. 25.02.80; Бюл. № 7. 9. Номенклатура виробів основного виробництва Луцького приладобудівного заводу. – Луцьк, 1985. 10. Каталог VDG MAIS 2001 – 2002. Мікросхеми фірми "Analog-Devices", 2001 – 92.с. 11. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К., 1979.

УДК 536.532

В. Фединець

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

ВПЛИВ ЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ПОХИБКУ ВІД ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

© Фединець В., 2003

The necessity of screening of temperature transmitters for decrease of an error from radiation is justified. The approaches for quantifying screens are parsed which provide a specific value of an error.

Постановка задачі

Температура газового потоку, важливий параметр технологічного процесу, визначає стан технологічного обладнання, а також безпеку функціонування процесу. Похибка вимірювання температури визначається умовами теплового балансу при взаємодії чутливого елемента термоперетворювача з газовим середовищем через конвекцію,