

Дискретизація двох останніх рівнянь привела до відповідного різницевого рівняння:

$$y(k+1) = y(k) + 0.5(\nabla y(k) + \nabla y(k+1)), \quad (9)$$

де $\nabla y(k) = [g(k)|0.4998g(k) + 0.2499\nabla x(k)]^{1/2}$ при $1 \leq k < 250$, $750 < k \leq 1000$; $\nabla y(k) = [g(k)|0.4998g(k) + 0.2499\nabla x(k)]^{1/2}$ при $200 \leq k \leq 750$; $g(k) = \{0.2498[\nabla x(k)]^2 - 0.2502x(k) \nabla^2 x(k)\}^{1/2}$.

Верифікація макромоделі (8) виконувалась методом Рунге-Кутта четвертого-п'ятого порядку. У результаті при значенні кроку дискретизації $\Delta t = 0.004\pi/\omega$ було отримано максимальні відносні відхилення реакцій знайдених макромоделей від необхідних реакцій подільника та середньоквадратичні похибки $\varepsilon = 8.919 \cdot 10^{-4}$, $\delta = 2.461 \cdot 10^{-4}$ і $\varepsilon^* = 5.598 \cdot 10^{-3}$, $\delta^* = 5.404 \cdot 10^{-3}$ відповідно [2].

Функціональні схеми аналогового і цифрового подільників частоти на два реалізуються на базі диференціаторів, інтеграторів, функціональних перетворювачів та ланок затримки по часу. Структурні схеми подільників отримуються відомими методами на основі прямого моделювання.

Відзначимо, що згідно з [1] мінімальний порядок кола, який забезпечує однозначність відображення "вхід-вихід" в задачах синтезу подільників частоти на класі вхідних сигналів дорівнює двом. Однак вище отримано подільник частоти, що описується диференціальними рівняннями першого порядку. Отже, методика з [2] дала можливість понизити порядок макромоделі подільника.

1. Букашкін С.А. Моделирование и синтез нелинейных электронных схем на ЭВМ. Рига, 1988. 2. Тимощук П.В., Шаповалов Ю.И. Синтез электронных устройств на основе определения и дискретизации неявных алгебродифференциальных уравнений // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1998. № 4. С.58-62.

УДК 621.317.1

Юрчик Геннадій

ДУ "Львівська політехніка", кафедра конструювання
і технології виробництва радіоапаратури

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ТЕМПЕРАТУРИ З КАЛІБРУВАННЯМ ТА АВТОКОРЕКЦІЄЮ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Юрчик Геннадій, 2000

У статті розглянуто вимірювальний канал температури, перетворювальна характеристика якого інваріантна до прогресуючих похибок первинного перетворювача термопари, обумовлених швидким старінням термопари в умовах дії на неї агресивного контрольованого середовища та високих температур.

In this paper the temperature measuring channel is considered having the conversion characteristic, which is invariant to channel primary converter progressing errors, caused with thermocouple fast aging under the condition of controlled aggressive environment and high temperature affect.

Забезпечення достовірності результатів вимірювань при здійсненні операційного контролю в технології виготовлення мікроборок та мікросхем радіоелектронної апаратури (РЕА) є одним з актуальних завдань. З метою забезпечення нормованої точності контролю параметрів технологічного процесу вимірювальні канали (ВК) підсистеми контролю, яка виконує функції збирання, оброблення та подання технологічної інформації, повинні підлягати періодичному калібруванню для визначення фактичних значень їх похибок [1].

Первинні перетворювачі ВК внаслідок поступового їх старіння на місці установки під дією агресивного середовища, високих температур та інших виробничих факторів змінюють свої характеристики перетворення, що викликає появу домінуючих прогресуючих похибок вимірювання контрольованих параметрів. Залежно від значень похибок в процесі калібрування ВК приймається рішення про можливість продовження експлуатації первинних перетворювачів, їх налагодження або демонтажу для відновлення їх точності. Існуючі методи калібрування ВК в основному пов'язані з демонтажем первинних перетворювачів з місця їх встановлення з подальшою перевіркою в лабораторних умовах [2]. Ці методи досить громіздкі, займають багато часу і не дають можливості отримати фактичні значення похибок первинного перетворювача через неадекватність умов його експлуатації умовам перевірки в лабораторії. В результаті знижується достовірність операційного контролю, що впливає на забезпечення необхідної якості РЕА.

У статті розглянуто ВК температури підсистеми контролю, первинним перетворювачем у якому використовується термопара. Прогресуючими похибками термопари, які з'являються в результаті її старіння, є похибки, обумовлені зміною чутливості її робочого кінця та появою паразитної термоелектрорушійної сили через неоднорідність термоелектродів по їх довжині, що виникає. Достовірність результатів вимірювання температури ВК забезпечується калібруванням термопари без демонтажу її з місця встановлення і автокорекцією її похибок в реальному часі. Калібрування та автокорекція досягається введенням у вимірювальну схему ВК структурної надлишковості, створенням додаткових адитивних та мультиплікативних впливів на робочий кінець термопари безпосередньо в умовах її експлуатації і отриманням додаткових результатів вимірювання сигналу термопари, які використовуються для обчислення дійсного значення контрольованої температури за формулою.

Структурна схема ВК наведена на рис.1. Робота ВК та визначення дійсного значення контрольованої температури алгоритмізовані відповідно до програми, яка записана в постійному запам'ятовуючому пристрої мікро-ЕОМ.

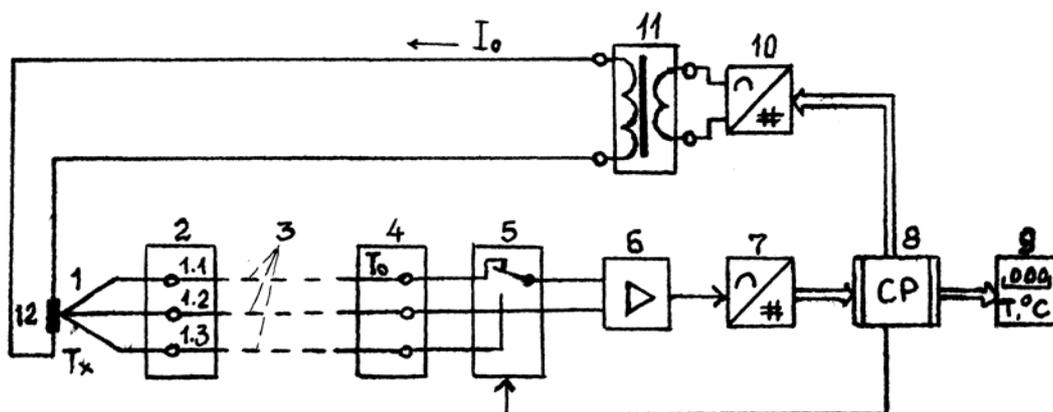


Рис 1. Вимірювальний канал температури з калібруванням та автокорекцією первинного перетворювача:
 1 – триелектродна термопара; 2 – клемна колодка; 3 – подовжувальні компенсаційні дроти; 4 – коробка стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопари; 5 – керований перемикач;
 6 – нормувальний підсилювач; 7 – аналого-цифровий перетворювач; 8 – мікро-ЕОМ;
 9 – цифровий індикатор; 10 – цифро-аналоговий перетворювач типу “цифра-змінний струм”;
 11 – трансформатор струму; 12 – мідна підложка робочого кінця термопари.

Метод вимірювання температури такий. Робочий кінець термопари вносять в контрольоване середовище, температуру якого в межах $(T_{X \text{ MIN}} \div T_{X \text{ MAX}})$ необхідно вимірювати. Три вільні кінці термопари розміщені в коробці 4, стабілізовану або розрахункову температуру якої T_0 можна вважати сталою ($T_0 = \text{const}$). Перемикач 5 дає змогу здійснювати перекомутацію вільних кінців і утворювати два варіанти термопари з одним спільним електродом (1.1 - 1.2 та 1.2 - 1.3).

В процесі пусконаладжувальних робіт на технологічному об'єкті, на момент встановлення цієї термопари, здійснюють її калібровку. Температуру калібровки вибирають із співвідношення

$$T_k = \sqrt{T_{x \text{ min}} \cdot T_{x \text{ max}}} \quad (1)$$

де T_k – температура калібровки термопари.

Перетворюють за допомогою аналого-цифрового перетворювача 7 термоелектро-рушійну силу (ТЕРС) на вільних кінцях термопари (1.1 - 1.2), яка відповідає температурі її калібровки, в цифровий код

$$N'_1 = S(\varepsilon_{n1} T_k - \varepsilon_{o1} T_0) \quad (2)$$

де S – стабілізоване стале значення крутизни характеристики аналого-цифрового перетворювача ТЕРС в код; ε_{n1} – початкове значення коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопари (1.1 - 1.2) при температурі калібровки T_k , яке можна визначити з градувальної характеристики термопари; ε_{o1} – коефіцієнт Зеебека вільних кінців термопари (1.1 - 1.2), що відповідає їх температурі T_0 .

З урахуванням того, що вільні кінці термопари працюють при сталій температурі, значно нижчій від температури вимірювання, і не в агресивному середовищі, можна вважати коефіцієнт ε_{o1} фактично незмінним протягом тривалого часу експлуатації термопари. Далі визначають код ТЕРС вільних кінців термопари (1.1 - 1.2.) з урахуванням її градувальної характеристики, згідно із співвідношенням

$$N_{o1} = S\varepsilon_{o1} T_0 = S\varepsilon_{n1} T_k - N'_1 \quad (3)$$

Виходячи з рівняння (3), вираз для початкового значення коефіцієнта Зеєбека робочого кінця термопар (1.1 - 1.2) з матеріалів першого і другого електродів має такий вигляд

$$\varepsilon_{n1} = \frac{N_{01} + N'_1}{ST_k} \quad (4)$$

Цифрові коди N'_1 та N_{01} реєструють в мікро-ЕОМ 8 та обчислюють їх суму

$$Z'_1 = N_{01} + N'_1 \quad (5)$$

значення якої також реєструють. Потім змінюють коефіцієнт чутливості робочого кінця термопар з ε_{n1} на ε_{n2} шляхом перекомутації за допомогою перемикача 5 вільних кінців термопар, використовуючи третій додатковий електрод із відповідного іншого матеріалу, утворюють другий варіант термопар (1.2 - 1.3), ТЕРС на вільних кінцях якої відповідає температурі калібровки. Цифровий код цієї ТЕРС дорівнює

$$N'_2 = S(\varepsilon_{n2}T_k - \varepsilon_{o2}T_o) = S \left[\varepsilon_{n1} \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon_{n1}} \right) T_k - \varepsilon_{o2}T_o \right] = S(\varepsilon_{n1}K_1T_k - \varepsilon_{o2}T_o), \quad (6)$$

де $\varepsilon_{n2} \neq \varepsilon_{n1}$ – початкове значення коефіцієнта Зеєбека робочого кінця другої термопар (1.2 - 1.3);

$$K_1 = \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon_{n1}} \right); \Delta\varepsilon' = (\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}).$$

Визначають код ТЕРС вільних кінців термопар (1.2 - 1.3) з урахуванням її градуовальної характеристики

$$N_{02} = S\varepsilon_{o2}T_o = S\varepsilon_{n2}T_k - N'_2. \quad (7)$$

Отримані коди ТЕРС N'_2 та N_{02} реєструють в мікро-ЕОМ 8 і обчислюють їх суму

$$Z'_2 = N_{02} + N'_2, \quad (8)$$

значення якої також реєструють. Далі за допомогою автоперемикача 5 знову підключають до електричного тракту ВК термопару (1.1 - 1.2).

На цьому калібровка термопар перед її тривалою експлуатацією закінчується.

Під час експлуатації термопар у складі ВК починає зростати похибка результату вимірювання температури внаслідок деградації термопар, що обумовлює появу неконтрольованих змін її градуовальної характеристики.

Алгоритм отримання результату вимірювання з автокорекцією похибки первинного перетворювача починається з визначення коду ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.1 - 1.2), який буде дорівнювати:

$$N''_1 = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1})T_x + \Delta e_1 - \varepsilon_{o1}T_o], \quad (9)$$

де $\Delta\varepsilon_{x1}$ – зміни коефіцієнта Зеєбека під впливом дестабілізуючих факторів і деградації робочого кінця термопар, а також відмінності контрольованої температури T_x від температури калібровки T_k ; Δe_1 – адитивна похибка, викликана неоднорідністю термоелектродів термопар (1.1 - 1.2) і перепадом температур T_x і T_o .

Цифровий код N''_1 реєструють в мікро-ЕОМ 8 і обчислюють суму кодів

$$Z''_1 = N_{01} + N''_1, \quad (10)$$

значення якої також реєструють.

Цифровий код (9) з урахуванням виразу (3) можна подати у вигляді

$$N''_1 = S\varepsilon_{n1}T_x + S\Delta\varepsilon_{x1}T_x + S\Delta e_1 - S\varepsilon_{01}T_0 = S\varepsilon_{n1}T_x + \Delta N_1 + \Delta N_2 - N_{01}, \quad (11)$$

де $\Delta N_1 = S\Delta\varepsilon_{x1}T_x$ – мультиплікативна похибка вимірювання в кодї від зміни чутливості робочого кінця термопар; $\Delta N_2 = S\Delta e_1$ – адитивна похибка вимірювання в кодї від неоднорідності електродів термопар, яка виникла в процесі її тривалої експлуатації.

З виразу (11) випливає, що дійсне значення контрольованої температури можна визначити за формулою

$$T_x = \frac{N''_1 + N_{01} - \Delta N_1 - \Delta N_2}{S\varepsilon_{n1}}. \quad (12)$$

Похибки вимірювання ΔN_1 та ΔN_2 невідомі і їх вплив на результат вимірювання можна зменшити, вносячи компенсуючі поправки, що мають зворотні знаки до знаків похибок. Для визначення поправок вимірюють ТЕРС термопар (1.2 - 1.3), утвореної за допомогою додаткового третього електрода (1.3) шляхом перекомутації вільних кінців термопар. Цифровий код, що відповідає ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.2 - 1.3), буде мати значення:

$$N''_2 = S[(\varepsilon_{n2} + \Delta\varepsilon_{x2})T_x + \Delta e_2 - \varepsilon_{02}T_0] = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1})T_x K_2 + \Delta e_2 - \varepsilon_{02}T_0], \quad (13)$$

де $K_2 = \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon''}{\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1}}\right)$; $\Delta\varepsilon'' = (\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1}) - (\varepsilon_{n2} + \Delta\varepsilon_{x2})$, $\Delta\varepsilon_{x2}$ – зміни коефіцієнта Зеєбека

робочого кінця термопар (1.2 - 1.3) під впливом дестабілізуючих факторів і відмінності температури T_x від температури калібровки термопар T_K . Приймавши, що умови деградації робочих кінців термопар (1.1 - 1.3) практично однакові, можна вважати справедливою рівність $\Delta\varepsilon_{x1} \approx \Delta\varepsilon_{x2}$.

Цифровий код N''_2 реєструють в мікро-ЕОМ 8 і обчислюють суму кодів

$$Z''_2 = N_{02} + N''_2, \quad (14)$$

значення якої також реєструють.

Потім додатково нагрівають робочий кінець термопар. Для цього за командою мікро-ЕОМ 8 за допомогою цифро-аналогового перетворювача 10 та трансформатора струму 11 пропускають струм певного значення I_0 через мідну підложку робочого кінця термопар протягом визначеного часу t , після чого реєструють цифровий код миттєвого значення ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.2 - 1.3).

$$N''_3 = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1})(T_x + \Delta T)K_2 + \Delta e_2 - \varepsilon_{02}T_0], \quad (15)$$

де $\Delta T = \frac{I_0^2 R}{ct} n\tau$ – температура додаткового перегріву робочого кінця термопар; R – омичний опір мідної підложки робочого кінця термопар; c – усереднена питома теплоємність робочого кінця термопар і мідної підложки; m – маса робочого кінця термопар і мідної підложки; $t = n\tau$ – час нагрівання робочого кінця термопар; τ – теплова стала термопар; $n = (0,1 \div 0,2)$.

Обчислюють суму кодів

$$Z_3'' = N_{02} + N_3'' \quad (16)$$

значення якої також реєструють. Далі за командою мікро-ЕОМ 8 за допомогою керованого перемикача 5 перекомутацією вільних кінців термопари змінюють коефіцієнт чутливості робочого кінця термопари на початкове значення $(\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1})$ і реєструють цифровий код нового миттєвого значення ТЕРС на вільних кінцях термопари (1.1 - 1.2)

$$N_4'' = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta\varepsilon_{x1})(T_x + \Delta T) + \Delta e_1 - \varepsilon_{01}T_0] \quad (17)$$

Після реєстрації цифрового коду N_4'' в мікро-ЕОМ обчислюють суму кодів

$$Z_4'' = N_{01} + N_4'' \quad (18)$$

значення якої також реєструють.

Враховуючи, що адитивна похибка термопари від неоднорідності електродів визначається градієнтом температури $(T_x - T_0)$, який є однаковим для двох термопар варіантів (1.1 - 1.2) і (1.2 - 1.3), можна вважати справедливою рівність $\Delta e_1 \approx \Delta e_2 \approx \Delta e$, що дає можливість за допомогою отриманих результатів вимірювань визначити поправку на адитивну похибку за формулою

$$\Delta N_2 = Z_1'' - \frac{(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')} \quad (19)$$

При введенні цієї поправки з протилежним знаком у вираз (9) виправлений результат вимірювання температури буде дорівнювати

$$N_1 = N_1'' - \Delta N_2 = \frac{(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')} - N_{01} \quad (20)$$

а поправка на мультиплікативну похибку ΔN_1 , яка обумовлена зміною чутливості робочого кінця термопари, також може бути подана за допомогою отриманих результатів вимірювань у вигляді

$$\Delta N_1 = \left[\frac{(N_1 + N_{01})}{(N_1' + N_{01})} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right] Z_1'' = \left\{ \frac{(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{[(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')]Z_1''} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right\} Z_1'' \quad (21)$$

З урахуванням поправок ΔN_1 та ΔN_2 мікро-ЕОМ відповідно до виразу (12) обчислює шукане дійсне значення контрольованої температури за формулою

$$T_x = \left\{ \frac{2(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{[(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')]Z_1''} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right\} T_k \quad (22)$$

Як видно, в остаточну формулу не входять конструктивні параметри (c, m, ε) та режимні параметри (I_0, t) , а лише зареєстровані цифрові коди ТЕРС термопари. Отже, за допомогою надлишкових вимірювань (при калібруванні і в процесі експлуатації термопари), обчислень за формулою (22) досягнута можливість отримувати точніші значення контрольованої температури за рахунок автокорекції в реальному часі прогресуючих похибок термопари, обумовлених як зміною чутливості її робочого кінця, так і появою неоднорідності її електродів. Точність методу вимірювання в основному визначається похибками формувань значень додаткових впливів на робочий кінець термопари і становить 0,25% в діапазоні контрольованих температур 300–600 °С.

Схема ВК відрізняється порівняною простотою і може бути реалізована на вітчизняних мікроелектронних перетворювачах та мікро-ЕОМ.

1. Технология и производство радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. Л.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. М., 1989. 2. Браилов Э.С. Поверка и аттестация информационно-измерительных и управляющих систем. М., 1988.