

УДК 536.53 (088.8)

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТИВНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕТОДОМ ЇХ ВНУТРІШНЬОГО ЗБУДЖЕННЯ

© Якуб Войтурський, Адам Ковальчик, 2001

Ряшівська політехніка, кафедра “Метрологія та вимірювальні системи”, вул В. Поля, 2, 35-959, Ряшів, Польща

Наведено основні методи визначення динамічних характеристик резистивних перетворювачів температури.

Зроблено огляд найпоширеніших тестів PRBS, MBS, LCSR, а також SH, що використовуються при ідентифікації динамічних властивостей перетворювачів. Проаналізовано можливість застосування нагрівання електричним струмом (внутрішнього збудження) для діагностування статичної характеристики перетворювача і його калібрування в умовах експлуатації без демонтажу його з об'єкта.

Сформульовані основні задачі та проблеми досліджень статичних характеристик резистивних термоперетворювачів методом їх внутрішнього збудження.

Приведены основные методы определения динамических характеристик резистивных преобразователей температуры. Сделан обзор наиболее распространенных тестов PRBS, MBS, LCSR, а также SH, которые используются при идентификации динамических свойств преобразователей. Обсуждена возможность использования нагревания электрическим током (внутреннего возбуждения) для диагностики статической характеристики преобразователя и его калибровки в условиях эксплуатации без его демонтажа с объекта.

Сформулированы основные задачи и проблемы исследований статических характеристик резистивных термопреобразователей методом их внутреннего возбуждения.

In this article the basic methods of the determination of dynamic characteristic of resistance temperature detectors were presented. The revue of the basis heating tests PRBS, MBS, LCSR and SH, that are used for dynamic sensor identification, is prepared. The possibility of the using of the resistive sensor heating by electrical current for diagnostic and control of its static characteristic and also its in-situ calibration, without disassembling is discussed. The main tasks and problems of the resistive sensor static characteristic investigation by g by electrical current heating are formulated.

1. Вступ. Вимірювальні перетворювачі температури, зокрема резистивні, є одними з найважливіших елементів систем вимірювання і контролю температури. Інформація про їх статичні характеристики необхідна для оцінювання точності вимірювань стаціонарних температур, а динамічні характеристики перетворювачів потрібні для належного вибору перетворювача для вимірювання змінної в часі температури, визначення необхідного часу витримки перетворювача в досліджуваному середовищі, вибору параметрів пристрою корекції динамічних властивостей перетворювача тощо [1, 2].

Динамічні властивості перетворювачів переважно задають ланки теплового перетворення-перетворення температури середовища в температуру чутливого елемента. На другому етапі (електричному) здійснюється перетворення температури чутливого елемента в електричний сигнал, і це перетворення, порівняно з попереднім, практично має статичний характер [2].

Досліджувати динамічні властивості перетворювачів можна двома основними способами – теоретико-розрахунковим та експериментальним, причому в останньому випадку – методом зовнішнього або внутрішнього збудження перетворювача. У розрахунковому методі застосовується рівняння теплопередачі Фур'є, яке для нескінченно довгого циліндра (в циліндричних координатах) набуває вигляду [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q}{\rho c}, \quad (1)$$

де λ , ρ , c – відповідно теплопровідність, густина та теплоємність матеріалу циліндра, q – інтенсивність внутрішнього джерела тепла.

Рівняння теплопередачі може бути розв'язане аналітично чи числовим методом за відповідних умов однозначності (геометричні та фізичні умови для перетворювача, крайові та початкові температурні умови [3]). Динамічні параметри перетворювачів можуть бути

визначені також симуляційними методами з використанням програм типу CAD [4].

Оскільки динаміка перетворювача змінюється зі змінами теплових властивостей середовища (умов його роботи), теоретико-розрахунковий метод не завжди може бути застосованим в широкому інтервалі змін умов експлуатації перетворювача [5].

Зовнішнє температурне збурення перетворювача реалізується шляхом стрибкової або гармонічної зміни його температури. Однак за цим методом перетворювач зазвичай не знаходиться в справжніх умовах експлуатації. Тестовим середовищем найчастіше служить вода, інші рідини та повітря при різних швидкостях їх руху. В часовій області динаміка перетворювача переважно описується модельним рівнянням вигляду [6]:

$$T(t) = A_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \dots \quad (2)$$

де τ_i – сталі часу i -го члена моделі теплопередачі в перетворювачі.

У звичайному методі ідентифікації (зовнішнє збудження) власне нагрівання резистивного перетворювача трактується загалом як небажане явище. Ефект саморозігрівання перетворювача може спричинити додаткову похибку вимірювань, яка залежить від кількості виділеного тепла в чутливому елементі і швидкості його віддачі [1, 2].

Внутрішнє температурне збудження використовує ефект саморозігрівання резистивного перетворювача внаслідок пропускання через нього електричного струму. Збудження – зміна потужності електричного струму – підводиться до чутливого елемента тими самими провідниками, якими його під'єднують до вимірювальної схеми (пристрою) [7].

Основними перевагами застосування внутрішнього збудження є непотрібність демонтажу перетворювача з об'єкта і виконання досліджень у справжніх умовах експлуатації перетворювача ("in-situ"). Істотність першої переваги полягає в тому, що не виникає перерва у роботі обладнання, у якому перетворювач моніторує температуру. Друга перевага проявляється, наприклад, у можливості поточної адаптації параметрів коректора динаміки при неперервному контролюванні змін динаміки самого перетворювача [8].

Цей метод просто реалізується для ідентифікації динамічних властивостей перетворювачів, які можуть бути описаними як динамічна ланка першого порядку. Для перетворювачів, які описуються ланками вищих порядків, відгук на внутрішнє збудження відрізняється від відгуку на звичайне зовнішнє збудження. Не створено універсального методу, який би дав змогу однозначно інтерпретувати відгуки перетворювачів різної конструкції. На практиці використовуються спрощені моделі динаміки перетворювачів. Зокрема, для перетворювачів, які широко застосовуються в промислових вимірюваннях, теплові передавальні функції апроксимують ланками I-го порядку (3а) та I-го порядку з запізненням (3б) [7, 9].

$$G(s) = \frac{1}{1 + sT}, \quad (3a);$$

$$G(s) = \frac{\exp(-sT_M)}{1 + sT_1}, \dots \quad (3b),$$

де T , T_1 – сталі часу перетворювача; T_M – час запізнення.

Теплову передавальну функцію перетворювача у захисній обудові для зовнішнього збудження найчастіше описують моделлю II-го порядку [2]

$$G(s) = \frac{1}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}, \quad (4)$$

де T_1 і T_2 – сталі часу перетворювача (одна з яких переважно домінує над іншою)

Для спрощеної динамічної моделі перетворювача сталі часу відображають зв'язок між теплоємностями обудови та чутливого елемента, а також між їх тепловими опорами.

Для однакових зовнішніх умов теплової передавальна функція перетворювача для внутрішнього збудження може бути описана виразом [2]:

$$F(s) = \frac{k(1 + s\tau)}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}, \quad (5)$$

де τ – стала часу, яка враховує вплив диференціального ефекту при прикладанні внутрішнього джерела тепла, k – масштабний коефіцієнт.

Оскільки значення теплових опорів та ємностей не залежать від напрямку передачі тепла [10], полюси передавальних характеристик (4) і (5) такі самі. На основі експериментально визначеної передавальної характеристики $F(s)$ можна визначити сталі часу перетворювача і далі – його теплову передавальну характеристику $G(s)$ [5, 7].

2. Практичні методи ідентифікації динамічних властивостей перетворювачів. На практиці застосовуються три основні методи ідентифікації динамічних властивостей перетворювачів.

PRBS -test (Pseudo Random Binary Sequence): збудження у вигляді псевдовипадкової бінарної послідовності. У цьому методі ідентифікуючі сигнали мають вигляд випадкової послідовності прямокутних імпульсів сталої амплітуди. Певні інтегральні властивості таких сигналів є наближеними до властивостей випадкових сигналів [11]. Зокрема, сигнал PRBS має сталу спектральну густину потужності у широкій смузі частот (принаймні у смузі частот, ширшій за смугу частот перетворювача), а функція автокореляції такого збуджувального сигналу є близькою до функції автокореляції білого шуму (функції Дірака). Основними параметрами сигналу PRBS є амплітуда A , час тривалості одного імпульсу Δ , а також кількість імпульсів N у збуджуючій послідовності. Використовуючи сигнал PRBS як збуджувальний, імпульсний відгук перетворювача на нього можна описати виразом [11]

$$g(j\Delta) = \frac{C}{NA^2\Delta} \sum_{k=1}^N \left(y_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \right) U_{k-j}, \quad (6)$$

де C – стала, яка залежить від виду перетворювача, y_k – значення вихідного сигналу в момент часу $t_k = k\Delta$, U_{k-j} – значення сигналу PRBS, яке дорівнює $\pm A$ щодо певного сталого значення.

Здійснюючи швидке перетворення Фур'є цієї послідовності, можна визначити частотну характеристику вихідного сигналу. Для визначення динамічних властивостей з належною точністю збудження перетворювача та аналіз його вихідного сигналу повинні бути досить великими.

MBS – test (Multifrequency Binary Sequence): збудження багаточастотною бінарною послідовністю. MBS є детермінованим періодичним сигналом з дискретним спектром на певних фіксованих частотах [5,7]. Температурний збуджувальний сигнал $\theta(t)$ може бути описаний у формі ряду Фур'є:

$$\Theta(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{\Delta N}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{\Delta N}\right) \right], \quad (7)$$

де a_k і b_k – коефіцієнти ряду, Δ – час тривалості одного імпульсу, N – кількість імпульсів у послідовності.

Час тривалості однієї послідовності (період) та кількість імпульсів, які необхідні для отримання повної інформації про динаміку перетворювача, встанов-

люються експериментально (тривалість можна змінювати, змінюючи тривалість одного імпульсу). Переважна частина потужності такого тестового сигналу є сконцентрованою у невеликій кількості гармонічних складових. Сигнал MBS можна застосовувати як при зовнішньому збудженні (наприклад, вставляючи перетворювач в струміль гарячого повітря у відповідній часовій послідовності), а також як внутрішнє збудження електричним струмом.

Перевагою ідентифікації сигналом MBS є висока точність, яка може бути порівняною з точністю ідентифікації динамічних властивостей зовнішнім синусоїдним сигналом. Одночасно значно скорочується час експерименту (обчислення можна виконувати поточно ("on-line"), під час вимірювань). Ідентифікація сигналом MBS полягає у визначенні оцінок значень частотної характеристики перетворювача на відповідних гармоніках Δ_i збуджувального сигналу виконанням дискретного перетворення Фур'є відгуку перетворювача. На підставі обчислень та відомих частот гармонічних складових визначають оцінки сталих часу T_1 та T_2 теплової передавальної характеристики.

Завдяки значній простоті збирання та опрацювання даних в режимі "on-line" метод MBS є одним з найширше застосовуваних при частотній ідентифікації динаміки перетворювачів.

LCSR – тест (Loop Current Step Response): метод відгуку на стрибок струму [11, 12]. Тест полягає у зміні струму, який протікає через перетворювач, від меншого значення I_1 до більшого значення I_2 . Відгук перетворювача на цей сигнал може бути описаний виразом [6]:

$$T(t) = B_0 + B_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + B_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \dots, \quad (8)$$

де τ_i – сталі часу, такі самі, як у (2).

Вираз (8) є подібним до виразу (2), однак відгук перетворювача на внутрішнє стрибкове збудження (подібно як і в методах PRBS і MBS) є іншим, ніж зовнішнє збудження (інші значення коефіцієнтів B_i). Для визначення сталих часу реєструють часову залежність відгуку перетворювача і далі виконують відповідні обчислення (перетворення LCSR [6, 10]).

SH – тест (self-heating test): метод самонагріву. Тут використовується усталене значення відгуку перетворювача на стрибкову зміну потужності струму через перетворювач [10]. Залежність між температурою та

потужністю струму через перетворювач в усталеному режимі описується рівнянням [10]:

$$Q = C \cdot A (\vartheta_s - \vartheta_m), \quad (9)$$

де Q – тепло, що генерується в перетворювачі (пропорційно до I^2R), C – коефіцієнт теплообміну, A – поверхня теплообміну, ϑ_s і ϑ_m – відповідно температура чутливого елемента та довкілля.

Динамічні властивості перетворювача розраховують на підставі змін нахилу характеристики приросту ΔR опору у функції зміни ΔQ , генерованого у перетворювачі тепла. Відношення $\Delta R/\Delta Q$ називається індексом самонагріву перетворювача (self-heating index).

Дисипація тепла в перетворювачі може спричинити додаткові похибки вимірювань в часі вимірювань температури. Однак при малих струмах через перетворювач ця похибка звичайно нехтовно мала, не перевищує декількох десятитисячних відсотка (одиниць ppm). При більших струмах ця похибка може бути значно більшою, що пов'язано з тим, що під час калібрування та вимірювання струм має різні значення.

У [12] запропоновано використати для ідентифікації динамічних властивостей перетворювачів також послідовності різних за значенням струмів I_1 і I_2 . Інформативним у цьому випадку є часове запізнення між послідовностями збуджувальних струмів та зміною температури чутливого елемента. Перевагою цього методу є практична незалежність результатів від змін (дрейфу) зовнішньої температури під час вимірювань.

3. Дослідження статичних характеристик методом внутрішнього збудження. Аналіз перехідного процесу перетворювача при його внутрішньому струмовому збудженні може давати інформацію не тільки про динамічні властивості, але дає змогу оцінювати також зміни його статичної характеристики. В [9, 13, 14] стверджується, що зміни температури чутливого елемента при його нагріванні струмом відповідної потужності та тривалості є значною мірою стабільнішими ніж зміни статичної характеристики перетворення, які викликані деструкційними змінами в часі тривалої експлуатації перетворювача. Зміни температури перетворювача внаслідок внутрішнього збудження можуть служити для контролю і діагностики перетворювачів, зокрема і до контролю температурного коефіцієнта опору. Встановлено [9], що при внутрішньому збудженні чутливого елемента на початковий фрагмент перехідної характеристики не впливають умови теплообміну чутливого елемента з дов-

кіллям, а також неістотними є елементи конструкції перетворювача. Початкова частина відгуку містить інформацію лише про зміни температури чутливого елемента, без врахування впливу поширення тепла в самому перетворювачі.

Тому перспективними видаються вимірювання початкової частини перехідної характеристики перетворювача при його внутрішньому збудженні з метою діагностики його статичних властивостей в умовах нормальної експлуатації на об'єкті [9,13,14]. Необхідно визначити, які параметри перетворювача мають бути виміряні і пораховані ще перед встановленням його на об'єкті, щоб через певний час (навіть кілька чи кільканадцять років) експлуатації перетворювача, повторно вимірявши ці параметри, можна було би виконати належну ідентифікацію статичних властивостей перетворювача. На основі таких досліджень можна буде встановити, чи статичні характеристики зберегли свої значення в межах допусків, чи, навпаки, вийшли за їх межі і на скільки.

Основною проблемою при таких дослідженнях є встановлення амплітуди та тривалості збуджувального імпульсу при якому віддача тепла чутливим елементом через елементи конструкції до середовища є нижчою від допустимого рівня. Значення збуджувального струму має бути достатнім, щоб отримати сигнал належного рівня, тобто забезпечити відповідну чутливість вимірювань і зменшити вплив завад, однак він має бути таким, щоб не пошкодити чутливий елемент.

Для належного обґрунтування застосування такого методу належить дослідити вплив різних факторів, які спричиняють деградацію статичних характеристик вимірювального перетворювача. Для цього можна застосувати:

- циклічне витримування перетворювача при температурі в околі верхньої границі його температурного діапазону з подальшим швидким охолодженням;
- витримування перетворювача (протягом обмеженого часу) при температурі, що перевищує верхню границю температурного діапазону;
- пропускання через чутливий елемент вимірювального струму (неперервного чи імпульсного), значення якого дорівнює допустимому для цього перетворювача, чи більшого за допустиме значення;
- механічні навантаження на чутливий елемент (наприклад, механічні вібрації різної амплітуди і частоти);
- вплив хемічно агресивних чинників.

Такі дослідження перетворювача можна виконувати в газовому і рідинному, рухомому і нерухомому середовищах.

Статична характеристика перетворювача перед і після дії деструкційних чинників визначається шляхом внутрішнього збурення, без демонтажу перетворювача з об'єкта. В результаті тесту після певного часу експлуатації необхідно встановити, чи перетворювач відповідає нормам, тобто чи його статична характеристика знаходиться в межах допустимих значень, чи внаслідок структурних змін всередині чутливого елемента перетворювача вийшла за межі допустимих значень. Після виконання діагностичних тестів необхідно здійснити корекцію статичної характеристики перетворювача (переважно її зміщенням та зміною нахилу), тобто визначити нову статичну характеристику. Діагностика і калібрація перетворювача відбуваються "in-situ", тобто без зміни умов його застосування.

На етапі досліджень достовірність виконаних тестів можна підтвердити класичним методом. Для цього необхідно зняти перетворювач з об'єкта, визначити його дійсну статичну характеристику і порівняти її з результатами тестування на об'єкті.

1. Olkuśnik L. Efekt samopodgrzewania się termometrycznych czujników rezystancyjnych // *Pomiary Automatyka Kontrola*. – 1985. – 5. 2. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J. *Termometria – przyrządy i metody*. Łódź, 1998. 3. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S. *Wymiana ciepła*. Warszawa, 1997. 4. Augustin S.,

Bernhard F. *Numerical calculation of static and dynamic parameters of industrial temperature sensors // Measurement* 1996. – 17. – 4. 5. Jackowska-Strumillo L., Sankowski D., McGhee J. Henderson I.A. *Modelling and MBS experimentation for temperature sensors // Measurement* – 1997. – 20. – 1. 6. Kerlin T.W., Hashemian H.M., Petersen K.M. *Response characteristics of temperature sensors installed in processes // Acta IMECO*. 1982. 7. Jackowska-Strumillo L. *Identyfikacja "in-situ" własności dynamicznych rezystancyjnych czujników temperatury metodą wymuszenia wewnętrznego MBS // Pomiary Automatyka Kontrola* 1998. – 3. 8. Minkina W., Gryś S. *System cyfrowego korektora charakterystyki dynamicznej termometru // VIII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych* 1998. 9. Atamančuk B., Stadnyk B., Hanus R. *Kontrola przetworników termorezystancyjnych metodą in-situ // XXX Międzynarodowa Konferencja Metrologów*. – 1998. 10. Kerlin T.W., Miller L.F., Hashemian H.M. *In-situ response time testing of platinum resistance thermometers // ISA Transactions* V.17. – 4. 11. Sankowski D. *Sposoby identyfikacji własności dynamicznych elektrycznych pieców oporowych komorowych // Prace PIE* 1983. Z. 87. 12. Sutton C.M. *In-situ measurement of resistance thermometer self-heating and response time // Meas. Sci. Technol.* 1994. – 5. 13. Атаманчук Б.М., Бернгард Ф., Слюсаренко О., Стадник Б. *Контроль параметрів термоперетворювачів опору в умовах експлуатації // Вимірвальна техніка та метрологія*. 1999. №54. – С. 77-81. 14. Атаманчук Б.М. *Перевірка статичної характеристики терморезистивних перетворювачів шляхом нагріву електричним струмом: Автореф. дис. ... канд.техн.наук*. Львів, 1997. 17с.

УДК 621.313

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РУХОМИХ КОНТАКТНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Петро Ванкевич, Олексій Бурнаєв, 2001

Львівський державний аграрний університет, кафедра механіки, Львів, Україна

Розглянуто шляхи підвищення точності вимірювання температури рухомих об'єктів термоперетворювачами, які переміщуються під час вимірювань. Подано рекомендації щодо оптимізації геометричних, кінематичних і динамічних характеристик рухомих контактних термоперетворювачів.

Рассматриваются пути повышения точности измерения температуры движущихся объектов термопреобразователями, которые в процессе измерения движутся. Дано рекомендации по оптимизации геометрических, кинематических и динамических характеристик движущихся контактних преобразователей.

The ways for temperature of movable surfaces measurement precision increasing by correction for sluggishness of device are considered. The recommendations for optimizing of similar devices design are proposed.

Вступ. Одним із різновидів контактної термометрії рухомих об'єктів є термоперетворювачі, які в процесі вимірювань переміщуються, контактуючи з

рухомими поверхнями. Цей різновид контактної термометрії є ефективний при вимірюванні температури об'єктів, які не мають фіксованої траєкторії