

---

УДК 623.004.67

О.М. Гурбанова, А.М. Науменко, О.В. Ревін

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*

## **АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОНТАКТНИМИ МЕТОДАМИ З ЗАСТОСУВАННЯМ МІКРОПРОЦЕСОРІВ**

*Аналізуються контактні методи та похибки вимірювання температури датчиками з мікропроцесорами.*

**Ключові слова:** *термометрія, перетворювач, метрологічні характеристики, похибка.*

### **Вступ**

**Постановка задачі.** Аналіз показує, що більшість засобів вимірювання температури, які використовуються у виробництві, не відповідають вимогам надійності, не достатньо універсальні, що в значній мірі обмежує можливості та ефективність вимірювального контролю параметрів систем і агрегатів. В більшості, це стосується аналогових ЗВТ.

Невідповідність температури вимогам приводить до значних похибок. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки приладів вимірювання температури з високою точністю вимірювань [1]. Тому дослідження метрологічних характеристик мікропроцесорного вимірювача набуває дуже велику актуальність.

**Аналіз літератури** В відомій літературі [1 – 4] розглядаються методи вимірювання температури на основі застосування різноманітних датчиків, але в ній не розглянуті особливості використання датчиків температури з мікропроцесорами.

**Мета статті** є проаналізувати контактні методи вимірювання температури, розглянути похибки, що виникають у процесі вимірювань та їх вплив на результати вимірювань при застосуванні датчиків температури з мікропроцесорами.

### **Основний матеріал**

Аналіз причин появи похибок вимірювань, їх виявлення та зменшення є одним з основних етапів процесу вимірювань. Це стосується і температурних вимірювань.

До основних похибок контактних вимірювальних перетворювачів температури належать:

- похибка, пов'язана з теплопередачею від об'єкту до термоперетворювача;
- похибка за рахунок особистого споживання теплової енергії термоперетворювачем;
- похибка від паразитного теплообміну між об'єктом дослідження та навколишнім середовищем через термоперетворювач;
- динамічна похибка.

Для усунення похибки, пов'язаної з теплопередачею від об'єкту до термоперетворювача необхідно виготовити термоперетворювач найбільш придатний конструктивно. Похибка за рахунок особистого споживання теплової енергії термоперетворювачем усувається його внесенням в досліджуване середовище завчасно, а по можливості забезпечити постійне знаходження його там.

Похибка від теплообміну між об'єктом дослідження та навколишнім середовищем через термоперетворювач залежить від конструкції та властивостей термоперетворювача, способом його монтажу та від характеристик об'єкту дослідження. Ця похибка досягає великих значень. Усунення цієї похибки здійснюються наступними методами:

- додатковою теплоізоляцією в таких місцях, де термометр виходить на поверхню;
- розташуванням теплочутливої частини як можна близько до його кінця термоперетворювача;
- зменшенням коефіцієнту відображення шляхом сріблення або золочення поверхні чутливого елемента.

Суттєвою похибкою контактних методів є динамічна похибка. Якщо температура робочого середовища, яке охоплює чутливий елемент, змінюється в часі  $t$ , то чутливий елемент треба довести до відповідної температури. Це означає, що до маси чутливого елемента необхідно підвести деяку кількість тепла. Такий нестационарний теплообмін повинен здійснюватися за визначений обмежений час.

Якщо розглядати чутливий елемент термометра як однорідну масу  $m$  з високим коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  та площиною поверхні  $H$ , яка контактує лише з навколишнім середовищем, то диференціальне рівняння для температури цього елемента  $Q(t)$  як функції вимірюваної температури та часу  $t$  запишемо у вигляді:

$$Q(t) = Q_F(t) + T \frac{dQ_F(t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $T = (1/\alpha) C$  – постійна часу чутливого елемента;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $C$  – питома теплоємність.

При нерівномірній зміні температури  $Q$  температура чутливого елемента  $Q(t)$  змінюється за експонентним законом. Єдиним параметром, що визначає характер кривої, є постійна часу  $T$ .

Для багатьох термометрів ця похибка нормується і для отримання точних результатів вимірювань необхідно виконувати умови вимірювання температури відповідним засобом.

Розглянуті похибки є загальними для всіх контактних методів. Однак, необхідно також вказати на те, що існують похибки, властиві лише одному з контактних методів. У мікропроцесорних системах здебільше застосовується термоелектричний метод вимірювання температури.

Похибка термоелектричних перетворювачів складається з похибок:

- похибки градування термоелектричного перетворювача;
- похибки термоелектричної неоднорідності перетворювача;
- похибки відхилення градувальної характеристики стандартних робочих термоперетворювачів від стандартної статистичної номінальної характеристики;
- похибки, обумовленою зміною температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів;
- похибки виникнення термоелектродів у зв'язку з часовою нестабільністю.

Похибка градування термоелектричного перетворення визначається похибкою робочого еталону, наприклад, термостату, зразкового термометру, який контролює температуру в термостаті, потенціометру, який застосовується при калібруванні.

Крім того, сюди слід віднести похибку інтерполяції результатів визначення статистичної номінальної характеристики, значення нестабільності номінальної статичної характеристики в період між калібруваннями термоелектричного перетворення. В даному випадку абсолютну похибку градування можна визначити за формулою:

$$\Delta_{\text{гр}} = \sqrt{\Delta_{\text{т}}^2 + \Delta_{\text{тр}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{і}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2}, \quad (2)$$

де  $\Delta_{\text{т}}$  – похибка термостата, в якому здійснюється калібрування термоперетворювача;

$\Delta_{\text{тр}}$  – похибка робочого еталону термоперетворювача, який застосовується для визначення температури в термостаті;

$\Delta_{\text{н}}$  – похибка потенціометру, який реєструє покази термоперетворювача;

$\Delta_{\text{і}}$  – похибка інтерполяції градувальної кривої;

$\Delta_{\text{н}}$  – нестабільність градувальної кривої в період між калібруваннями.

Термоелектрична неоднорідність перетворювача обумовлена непостійністю хімічного складу термоелектродів за довжиною. Дана похибка може складати від десятих часток до декількох одиниць Кельвіна та більше.

Все це обумовлює найбільший вплив на показання низькотемпературних електричних перетво-

рювачів [3], так як при цих температурах чутливість зменшується, а частка паразитної термо-ЕРС зростає. Для зменшення цієї похибки електроди термоперетворювачів перевіряють методом різноманітного поглиблення за методикою, яка описана в ГОСТ 14894-89.

Похибка, обумовлена зміною температури вільних кінців термоелектричного перетворювача є суттєвою. Температура вільних кінців термоелектричного перетворювача повинна дорівнювати  $0^{\circ}\text{C}$ , а в ідеалі вона постійна. Тому виникає необхідність вводити поправку на температуру вільних кінців термоперетворювача.

Існують спеціальні пристрої, які забезпечують автоматичне введення поправки. Похибка відхилення термо-ЕРС від стандартної номінальної характеристики може складати значення в декілька градусів Кельвіна.

Тому, в випадку підвищення вимог до точності вимірювань проводять індивідуальне градування з похибкою  $0,2 - 0,5 \text{ K}$ .

Залежно від змінювання в часі вимірального (вхідного) сигналу мікропроцесорного вимірювача температури (МВТ) розрізняють статичні та динамічні вимірювання, а відповідно статичний і динамічний режими вимірювання. У статичному режимі вимірювання МВТ його похибку називають статичною, в динамічному режимі вимірювання ЗВТ до неї додається динамічна похибка. Залежно від швидкості змінювання в часі вимірального сигналу МВТ динамічна похибка може бути або значною і її необхідно враховувати при оцінці похибки МВТ, або значно меншою від статичної похибки і тоді нею можна знехтувати при оцінці похибки МВТ.

Методи оцінки статичної і динамічної похибок МВТ суттєво відрізняються, що обумовлено джерелами (причинами) їх походження. Так, статична похибка залежить тільки від параметрів МВТ і впливних величин, у тому числі завад, і фактично не залежить від характеристик вимірального сигналу. Динамічна похибка залежить не тільки від параметрів МВТ, але й від характеристик вимірального сигналу.

Комплекс динамічних характеристик (ДХ) МВТ, їх визначення та способи нормування встановлюються ГОСТ 8.009-84 [4].

Динамічна характеристика МВТ – це метрологічна характеристика властивостей МВТ, які виявляються в тому, що на вихідний сигнал цього МВТ впливають значення вхідного сигналу та будь-які змінювання цих значень у часі.

Динамічні характеристики МВТ поділяють на повні та часткові.

Повна ДХ МВТ – це динамічна характеристика, яка повністю описує прийняту математичну модель динамічних властивостей МВТ.

До часткових ДХ МВТ належать будь-які функціонали або параметри повних ДХ МВТ.

Повні ДХ вводять тільки для аналогових МВТ, які можна розглядати як лінійні, а часткові ДХ вводять як для лінійних аналогових МВТ, так і для цифрових вимірвальних приладів (ЦВП), аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) і цифроаналогових перетворювачів (ЦАП).

Запізнення, або часова затримка, показів вимірального приладу в загальному вигляді проявляється в тому, що при миттєвій подачі на його вхід вимірюваної величини постійного значення  $x(t) = X$  у момент часу  $t_0$  має місце перехідний процес, внаслідок чого вихідна величина (відгук, реакція)  $y(t)$  МВТ є змінною, і відлік результату вимірювання  $Y$  зі шкали приладу затримується практично до завершення перехідного процесу – до моменту часу відліку, або встановлення показу,  $t_y$  (рис. 1).

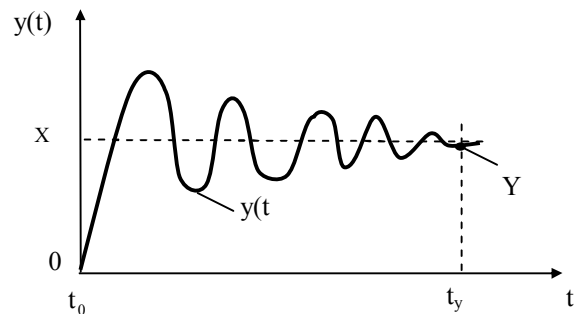


Рис. 1. Діаграма перехідного процесу у виміральному приладі

У даному прикладі перехідний процес в інтервалі часу  $t_0 - t_y$  має затухаючий коливальний характер, тобто залежність вихідної величини  $y(t)$  МВТ від вхідної величини  $x(t)$  є нелінійною. Подібним перехідним процесом володіють багато засобів виміральної техніки. Так, у механічних та електромеханічних МВТ коливання виникають від впливу сил пружності та демпфірування, в теплових МВТ – як наслідок теплоємності, в електричних й електронних МВТ коливання обумовлені наявністю паразитних ємнісних та індуктивних електричних кіл тощо.

Пряма пропорційність між значеннями вихідної  $y(t)$  і вхідної  $x(t)$  величин МВТ особливо необхідна в тих випадках, коли за умовами вимірвальних завдань необхідно визначити функцію змінювання вимірюваної величини в часі. З іншого боку, при подачі на вхід МВТ вимірюваної величини  $x(t)$ , на яку накладена високочастотна завада  $\xi(t)$  (рис. 2), такий МВТ навпаки виконують інерційним, завдяки чому завада  $\xi(t)$  згладжується (усереднюється), і сигнал виміральної інформації на виході МВТ буде згладженим, тобто без завади  $\xi(t)$  – подібно вхідному (виміральному) сигналу  $x(t)$ .

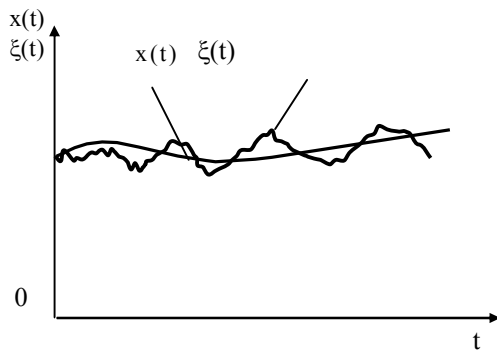


Рис. 2. Криві змінювання вимірюваної величини  $x(t)$  і накладеної на неї завади  $\xi(t)$

Як і будь-який процес, динамічні властивості МВТ найбільш повно можна описати відповідним диференціальним рівнянням, яке відображає функціональну залежність вихідної величини  $y(t)$  МВТ від вхідної величини  $x(t)$ . Якщо МВТ є безінерційним, то в кожен момент часу величини  $y(t)$  і  $x(t)$  є пропорційними, то в диференціальному рівнянні відсутні похідні за часом, і воно перетворюється в рівняння прямої лінії, яка відображає статичну характеристику МВТ:

$$y(t) = kx(t), \quad (3)$$

де  $k$  – статичний коефіцієнт передачі (перетворення) МВТ.

Узагальнена схема дослідження динамічних характеристик МВТ наведена на рис. 3.

За цією схемою на вхід МВТ діють відомим тестовим (випробувальним) сигналом (тест-сигналом)  $x(t)$ , який формується генератором тестових сигналів і має певний закон змінювання у функції часу.



Рис. 3. Узагальнена схема для визначення динамічних характеристик МВТ

Як тестові використовують детерміновані або випадкові сигнали, останні з відомою функцією (законом) розподілу.

Серед детермінованих тест-сигналів найбільше поширення знаходять синусоїдний сигнал та деякі види аперіодичних сигналів, зокрема одиничний стрибок, дельта-функція та пілкоподібний. Під впливом тест-сигналу  $x(t)$  на виході МВТ утворюється сигнал-відгук  $y(t)$ , або реакція певної форми, залежно від форми тест-сигналу та параметрів МВТ. Тестовий вхідний  $x(t)$  та вихідний  $y(t)$  сигнали досліджуваного МВТ подаються в блок аналізу, за допомогою якого визначаються динамічні характеристики МВТ, повні та часткові.

## Висновки

1. Проведений аналіз показує, що визначення похибки вимірювання температури на об'єкті включає контроль показань датчика температури, який встановлений на об'єкті з теплоносієм.

2. Контроль полягає у фіксації контрольованих показань датчика температури в момент настання температурної зупинки процесу вимірювання. При цьому в якості дійсної температури приймають температуру теплоносія об'єкта, а похибку визначають як різницю між вимірюваною та дійсною температурами.

3. Розглянуті методи компенсації складових температурних похибок дозволяють спростити процес вимірювання температури у важкодоступних місцях встановлення вимірювачів температури, так як забезпечить визначення похибки вимірювання без її демонтажу.

## Список літератури

1. Бромберг Э.М. Тестовые методы повышения точности измерений / Э.М. Бромберг, К.Л. Куликовский. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
2. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: підруч. / В.М. Чинков. – Х.: ХВУ, 2001. – 424 с.
3. Полищук Э.С. Вимірювальні перетворювачі / Э.С. Полищук. – К.: Вища школа, 2003.
4. Корнеев В.В. Современные микропроцессоры / В.В. Корнеев. – М.: НОЛИДЖ, 2000 – 320 с.

Надійшла до редколегії 12.01.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ TEMPERATURE КОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

Е.Н. Гурбанова, А.Н. Науменко, А.В. Ревин

Анализируются контактные методы и погрешности измерения температуры датчиками с микропроцессорами.  
**Ключевые слова:** термометрия, преобразователь, метрологические характеристики, погрешность.

## ANALYSIS OF ERROR OF MEASURING OF TEMPERATURE BY CONTACT METHODS WITH THE USE OF MICROPROCESSORS

O.M. Gurbanova, A.M. Naumenko, O.V. Revin

Contact methods and errors of measuring of temperature sensors are analysed with microprocessors.  
**Keywords:** thermometry, transformer, metrology descriptions, error.