

# Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 623.004.67

О.В. Білоконь, А.Д. Полянська, А.М. Науменко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК КОНТАКТНИХ ТЕРМОМЕТРІВ

Аналізуються динамічні похибки температурних вимірювань контактними термометрами на сучасному етапі розвитку автоматизованих систем управління.

**Ключові слова:** термометрія, схема вимірювання, опір, датчик, частота.

### Вступ

**Постановка задачі.** Одним з основних каналів автоматизованих систем управління є канал вимірювання температури за допомогою контактних термометрів. Існуючі пристрої для вимірювання температури, що застосовуються в сучасних АСУ, вже не відповідають потрібній точності та стабільності вимірень, а прецизійні елементи коштують дорого. При побудові інформаційно-вимірювальних автоматизованих систем, як правило, використовуються термометри опору.

Тому врахування динамічних похибок вимірювання контактними термометрами набуває дуже великої актуальності для забезпечення високої точності вимірювальних каналів АСУ.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1-6] розглядаються методи вимірювання температури на базі терморезисторних перетворювачів, але в цій літературі не визначаються питання аналізу їх динамічних похибок, що впливають на результат вимірювання.

**Метою статті** є проведення аналізу динамічних похибок вимірювання температури на базі контактних термоперетворювачів та їх вплив на результати визначення температури.

### Основний матеріал

Елементарна теорія похибок вимірювання нестационарної температури твердих, рідких чи газових середовищ, яку часто називають елементарною теорією теплової інерції перетворювачів температури, побудована на наступних припущеннях:

Розподіл температури по об'єму  $V$  перетворювача температури рівномірний, так що температура в усіх точках об'єму у момент часу  $t$  дорівнює  $t_e(\tau)$ .

Теплофізичні властивості матеріалів у складі перетворювача незмінні у часі: залежать від температури.

Теплообмін з об'єктом з температурою  $t_T(\tau)$  та довкіллям з температурою  $t_C(\tau)$  може відбуватися теплопровідністю, конвекцією та випроміненням, при цьому коефіцієнт тепловидатності  $\alpha$  між перетворювачем та довкіллям та коефіцієнтом теплопередачі між перетворювачем та об'єктом залишаються незмінним у процесі вимірювань.

Тепломісткості довкілля та об'єкту настільки великі, що їх ентальпія та температури  $t_T(\tau)$  та  $t_C(\tau)$  майже не змінюються за зміни температури перетворювача  $t_e(\tau)$ ; іншими словами: тепло, що передається від перетворювача до довкілля її об'єкту, не змінює температуру останніх.

В об'ємі перетворювача існує джерело тепла з питомою потужністю  $w(\tau)$  чи повною потужністю  $W(\tau)=Vw(\tau)$ .

Для випадку вимірювання температури поверхні об'єкта диференціал рівняння теплообміну виглядає наступним чином:

$$C \frac{dt_e(\tau)}{d\tau} + \alpha S_c [t_b(\tau) - t_c(\tau)] + k_T S_T [t_b(\tau) - t_T(\tau)] - W_p(\tau) = 0, \quad (1)$$

де  $C$  повна тепломісткість перетворювача;

$S_c$  та  $S_r$  - площі ділянок поверхні перетворювача, які перебувають у теплообміні відповідно з довкіллям та об'єктом;

$S_c + S_T = S$  - площа повної поверхні перетворювача.

Якщо перетворювач вимірює температуру довкілля (газу чи рідини)  $t_c(\tau)$ , тоді приймають  $S_c = S$  та  $k_T = 0$ . Якщо перетворювач вимірює внутрішню температуру об'єкта, тоді приймають  $S_T = S$ ,  $\alpha = 0$ .

Розглянемо вимірювання температури газу чи рідини за умови  $W(\tau) = 0$ . Різниця між температурою перетворювача та газу (рідини)  $Q(\tau) = t_e(\tau) - t_c(\tau)$ , яку

називають надлишковою температурою, характеризує похибку вимірювання температури і дорівнює:

$$Q(\tau) = t_e(\tau) - t_c(\tau) = -\frac{1}{m_0} \frac{dt_e(\tau)}{d\tau} = -\varepsilon_0 \frac{dt_e(\tau)}{d\tau}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_0$  – показник теплової інерції, який визначається зі співвідношення  $\varepsilon_0 = C/\alpha S$ .

Якщо перетворювач, який у початковий момент часу  $\tau=0$  мав температуру  $t_e(\tau)/_0 = t_{ep}$ , внести у середовище зі сталою температурою  $t_0$ , тоді розв'язок рівняння (2) можна записати у вигляді:

$$t_g(\tau) = t_{ep} + (t_0 - t_{ep}) \left( 1 - g^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \right).$$

Якщо увести поняття відносної безрозмірної температури

$$Q(\tau) = \frac{Q_\tau}{Q_p},$$

тоді маємо:

$$Q(\tau) = \frac{Q_\tau}{Q_p} = \frac{\tau_0 - \tau_e}{\tau_0 - \tau_{ep}} = \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right). \quad (3)$$

Як видно з поданих вище виразів, похибка вимірювання температур; змінюється у часі від максимальної для  $\tau=0$  до нуля для  $\tau \rightarrow \infty$ , а визначальний фактор впливу на похибку – показник теплової інерції.

Якщо від початку процесу пройшов час  $\tau = \varepsilon_0$ , тоді з рівнянь (2-3) маємо

$$t_0 - t_g(\varepsilon_0) / (t_0 - t_{ep}) = \frac{1}{g} = 0,368,$$

тобто, показник теплової інерції  $\varepsilon_0$  чисельно тотожний інтервалу часу, за який різниця між температурою середовища та температурою перетворювача складе 0,368 початкової різниці температур. Чим менше  $\varepsilon_0$ , тим швидше термоперетворювач реагує на зміни температури середовища (об'єкта). Зі співвідношення (2) можна також визначити тривалість інтервалу часу  $\tau = \tau_U$ , після якого різниця температур термоперетворювача та середовища не буде перевищувати заздалегідь заданого значення, тобто похибка вимірювання температури буде дорівнювати заздалегідь заданому значенню:

$$\Delta := t_e(\tau_U) - t_0,$$

$$\text{де } \tau_U = \varepsilon_0 \ln Q_p / \Delta = \varepsilon_0 \ln t_{ep} - t_0 / \Delta.$$

Наприклад, для  $\tau_U = 3\varepsilon_0$  маємо  $\Delta = 0,05Q_p$ , тобто температура термоперетворювача відрізняється від температури середовища лише на 5 %, для  $\tau_U = 3\varepsilon_0$  маємо  $\Delta = 0,05Q_p$  і процес вимірювання температури можна вважати майже закінченим.

Якщо температура середовища, в якому пере-

буває термоперетворювач, змінюється за лінійним законом  $t_c(\tau) = t_0 + b\tau$  ( $t_0$  – початкова температура середовища;  $b$  – швидкість зміни температури), тоді зміну температури термоперетворювача можна отримати з (2) і подати виразом:

$$t_0 = (t_0 - t_{ep}) \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right) + t_0 + b\tau - b\varepsilon_0 \left( 1 - g^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \right).$$

Для великих значень  $\tau$  цей вираз приймає вигляд:

$$Q_c = t_g(\tau) - t_c(\tau) = -b\varepsilon_0.$$

Це свідчить про те, що температура термоперетворювача змінюється з такою швидкістю, що й температура середовища, але за рахунок теплової інерції термоперетворювача у результат вимірювання вноситься систематична похибка  $Q_c = -b\varepsilon_0$  (рис. 1, а).

Для випадку експоненціальної зміни температури середовища за законом

$$t_c(\tau) = t_0 + (t_k - t_0) \exp\left(-\frac{\tau}{k}\right),$$

де  $t_0, t_k$  – початкове та кінцеве значення температури середовища;  $k$  – показник зміни температури середовища з часом), вираз для похибки вимірювання температури набуває вигляду:

$$Q(\tau) = t_g(\tau) - t_c(\tau) = (t_{ep} - t_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right) + (t_k - t_0) \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - k} \times \dots \times \left[ \exp\left(-\frac{\tau}{k}\right) - \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right) \right].$$

Максимальне значення похибки вимірювання  $Q_{cmax}$ . Для випадку  $t_{ep} = t_0$  буде спостерігатися у момент часу (рис. 1, б)

$$\tau_{max} = \frac{\varepsilon_0 k}{k - \varepsilon_0} \ln \frac{k}{\varepsilon_0}.$$

Нехай початкова температура термоперетворювача дорівнює  $t_{ep}$ , а температура середовища коливається навколо певного середнього значення  $t_0$  з амплітудою  $\alpha_c$  та циклічною частотою  $\omega$  за законом  $t(\tau) = t_0 + \alpha_c \cos \omega\tau$  (рис. 1, в), тоді в рівнянні (2) можна отримати вираз для зміни температури термоперетворювача у вигляді:

$$t_\varepsilon(\tau) = \left( t_{ep} - t_0 - \frac{\alpha_c}{1 + \Theta^2 \varepsilon_0^2} \right) \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right) + t_0 + \alpha_\varepsilon \cos(\omega\tau + \varphi_\varepsilon), \quad (4)$$

де  $2\pi/\omega = T_t$  – період коливань температури середовища;

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_c \cos \varphi_\varepsilon = \frac{\alpha_c}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon_0^2}};$$

$$\varphi_\varepsilon = -\arctg(\omega \varepsilon_0).$$

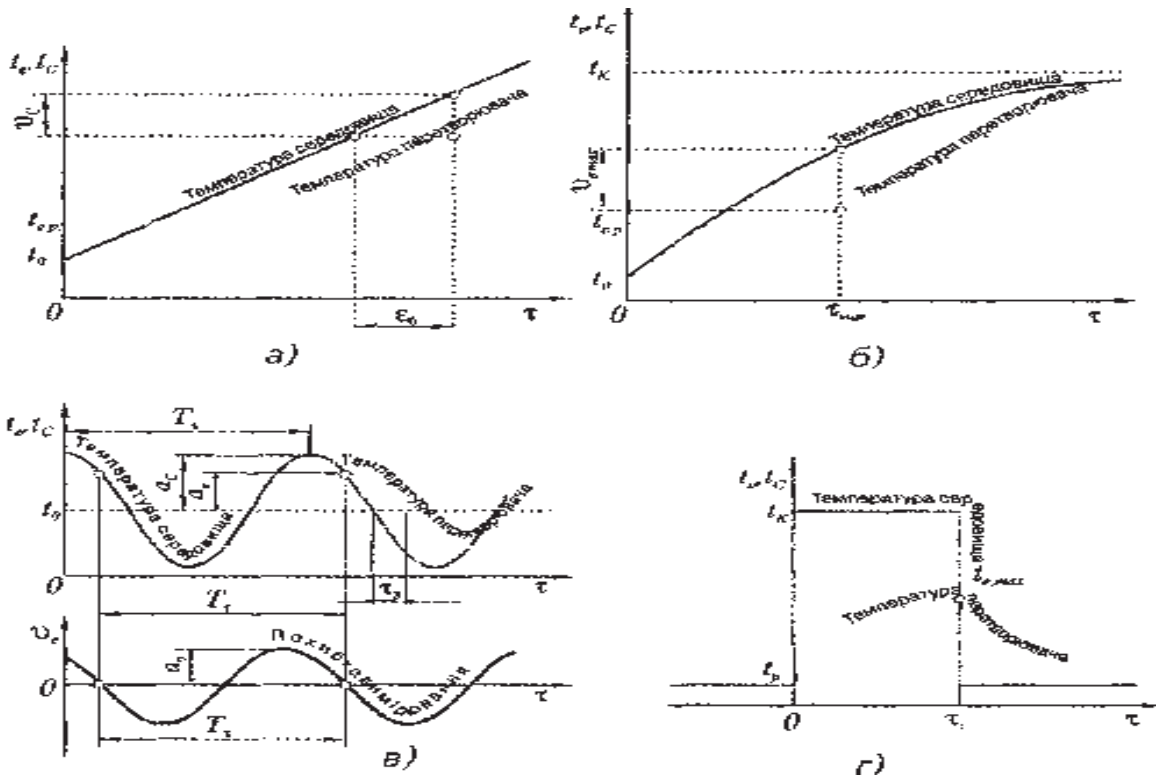


Рис. 1. Характер зміни температури термоперетворювача за різних змін температури середовища

З плинном певного інтервалу часу першим членом у виразі (4) можна знехтувати, і тоді можна побачити, що температура термоперетворювача  $t_\varepsilon(\tau)$ , буде змінюватися відносно середньої температури  $t_0$  з такою самою частотою  $\omega$ , що і  $t_c(\tau)$ , але з меншою амплітудою  $\alpha_\varepsilon < \alpha_c$ . Крива  $t_\varepsilon(\tau)$  зсунута по фазі відносно кривої  $t_c(\tau)$  на кут  $\varphi_\varepsilon$ , або, що те саме, відстає від неї у часі на  $\tau_3 = -\varphi_\varepsilon/\omega$ .

Похибку вимірювання періодично змінної температури можна подати у вигляді:

$$Q(\tau) = t_\varepsilon(\tau) - t_c(\tau) = \left( t_{ep} - t_0 - \frac{\alpha_c}{1 + \omega^2 \varepsilon_0^2} \right) \times \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right) - \alpha_Q \sin(\omega\tau + \varphi_\varepsilon),$$

де  $\alpha_Q = \alpha_c \sin \varphi_\varepsilon = -\alpha_c \frac{\omega \varepsilon_0}{1 + \omega^2 \varepsilon_0^2}$ .

Для того, щоби значення  $\alpha_Q$  не перевищувало певне задалегідь задане значення похибки  $\Delta$ , необхідно притримуватися нерівності;

$$\varepsilon_0 < \frac{1}{\omega \sqrt{\left(\frac{\alpha_c}{\Delta}\right)^2 - 1}} \approx \frac{|\Delta|}{\omega \alpha_c},$$

де  $|\Delta|$  - абсолютна допустима похибка вимірювання

температури.

Відношення амплітуди коливань температури термоперетворювача  $\alpha_\varepsilon$  до амплітуди коливань температури середовища  $\alpha_c$  у залежності від частоти  $\omega$  називається амплітудно-частотною характеристикою термоперетворювача.

Якщо застосувати поняття узагальненої частоти  $\Omega_0 = \omega \varepsilon_0$ , тоді можна записати:

$$A_\varepsilon(\Omega_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega_0^2}}; \quad \varphi_\varepsilon = -\arctg(\Omega_0).$$

Для випадку імпульсної зміни температури середовища (рис. 1, г) та за умови, що у момент початку імпульсної дії температура термоперетворювача була тотожною температурі середовища, хід зміни температури термоперетворювача описують наступними виразами:

$$t_\varepsilon(\tau) = t_k - (t_k - t_p) \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right), \quad \text{для } 0 \leq \tau \leq \tau_1; \tag{5}$$

$$t_\varepsilon(\tau) = t_p - (t_{e\max} - t_p) \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right), \quad \text{для } \tau > \tau_1,$$

де  $\tau_1$  - тривалість імпульсу;

$t_k$  - максимальна температура середовища;

$t_{e\max}$  - максимальна температура термоперетворювача у момент закінчення дії імпульсу;

$$t_{e \max}(\tau) = t_k - (t_k - t_p) \exp\left(-\frac{\tau_i}{\varepsilon_0}\right).$$

Якщо термоперетворювач має забезпечити вимірювання амплітуди температурного імпульсу, тоді у момент часу  $\tau_i$  температура термоперетворювача повинна якомога менше відрізнятись від  $t_k$ , тобто має виконуватися умова:  $t_k - t_{e \max} < \Delta$ , де  $\Delta$  - задана похибка вимірювання. З рівняння (5) випливає, що згадана умова виконується для випадку

$$\frac{\tau_i}{\varepsilon_0} \geq \frac{\ln(t_k - t_p)}{\Delta}.$$

Якщо тепловий імпульс являє собою заваду, на яку не повинен реагувати термоперетворювач, тоді слід притримуватися умови:

$$\frac{(t_{e \max} - t_p)}{t_k - t_p} \leq \delta, \text{ якщо } \frac{\tau_i}{\varepsilon_0} \leq \delta.$$

Тобто, чим менша тривалість теплового імпульсу по відношенню до показника теплової інерції, тим менший його вплив на результат вимірювання.

## Висновки

1. Проведений аналіз дає можливість врахувати динамічні похибки при вимірювання температури контактними термометрами з подальшим обчисленням за допомогою мікропроцесора у автоматизованих системах, у яких первинними перетворювачами температури є терморезистори.

2. Як видно з поданих вище виразів, похибка вимірювання температур; змінюється у часі від мак-

симальної для  $\tau=0$  до нуля для  $\tau \rightarrow \infty$ , а визначальний фактор впливу на похибку – показник теплової інерції.

3. Проведений аналіз похибок вимірювання температури показує, що чим менша тривалість теплового імпульсу по відношенню до показника теплової інерції, тим менший його вплив на результат вимірювання.

## Список літератури

1. Поліщук Є.С. Вимірювальні перетворювачі: підручн. / Є.С. Поліщук. – М.: Вища школа, 2003.
2. Бартенев В.Р. Технології PLUG & PLAY в техніці виміру температури // Контрольний - вимірювальні прилади й системи / В.Р. Бартенев, Р.В. Бартенев. – 1997. - № 2. – С. 24-27.
3. Фарсане Н.Г. Технологічні виміри й прилади: підручн. / Н.Г. Фарсане, Л.В. Ілясов. – М.: Вища школа, 1999. - 340 с.
4. Бартенев В.Р. Розподілена модульна система терморегулювання СИНТАЛ ТЕРМОЛІНК // CHIP NEWS / В.Р. Бартенев, Р.В. Бартенев. - 1997. - № 9. - С. 42-46.
5. Основи метрології й електричні вимір. – Г., Энергоатом издат, 1987. – 370 с.
6. Вимірювання електричних і неелектричних величин: підручн. / М.М. Євтіхіїв та інші. – Энергоатом издат, 1988. – 210 с.

Надійшла до редколегії 16.01.2017

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

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОНТАКТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

Е.В. Билоконь, А.Д. Полянская, А.Н. Науменко

*Анализируются динамические погрешности температурных измерений контактными термометрами на современном этапе развития автоматизированных систем управления.*

**Ключевые слова:** термометрия, схема измерения, сопротивление, датчик, частота.

## ANALYSIS OF DYNAMIC ERRORS OF CONTACT THERMOMETERS

O. Bilokon, A. Polianska, A. Naumenko

*The dynamic errors of the temperature measurements are analysed by contact thermometers on modern stage development of automated control the system.*

**Keywords:** thermometry, measuring chart, resistance, sensor, frequency.