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 нестаціонарної 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 α 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 довкіллю її об'єкту, не змінює температуру останніх.

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

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

$$C\frac{dt_e(\tau)}{d\tau}+\alpha S_c\left[t_в(\tau)-t_C(\tau)\right]+ \\ +k_T S_T\left[t_в(\tau)-t_T(\tau)\right]-W_P(\tau)=0, \quad (1)$$

де C повна тепломісткість перетворювача;

S_c та Sr - 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 $k_r=0$. Якщо перетворювач вимірює внутрішню температуру об'єкта, тоді приймають $S_T=S$, α=0.

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

© Білоконь О.В., Полянська А.Д., Науменко А.М., 2017

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 ε_0 – показник теплової інерції, який визначається зі співвідношення ε_0=C/αS.

Якщо перетворювач, який у початковий момент часу τ=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:

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

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 τ=0 до нуля для τ→∞, 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 ε_0 чисельно тотожний інтервалу часу, за який різниця між температурою середовища та температурою перетворювача складе 0,368 початкової різниці температур. Чим менше ε_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:

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

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 перебуває 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:

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

Для великих значень τ 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; к - показник зміни температури середовища з часом), ви:раз для похибки вимірювання температури набуває вигляду:

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

Максимальне значення похибки вимірювання Q_{emax}. 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 α_C та циклічною частотою ω 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;

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_C \cos\varphi_e = \frac{\alpha_C}{\sqrt{1+\omega^2\varepsilon_0^2}}; \qquad \varphi_\varepsilon = -\mathrm{arctg}\left(\omega\varepsilon_0\right).$$

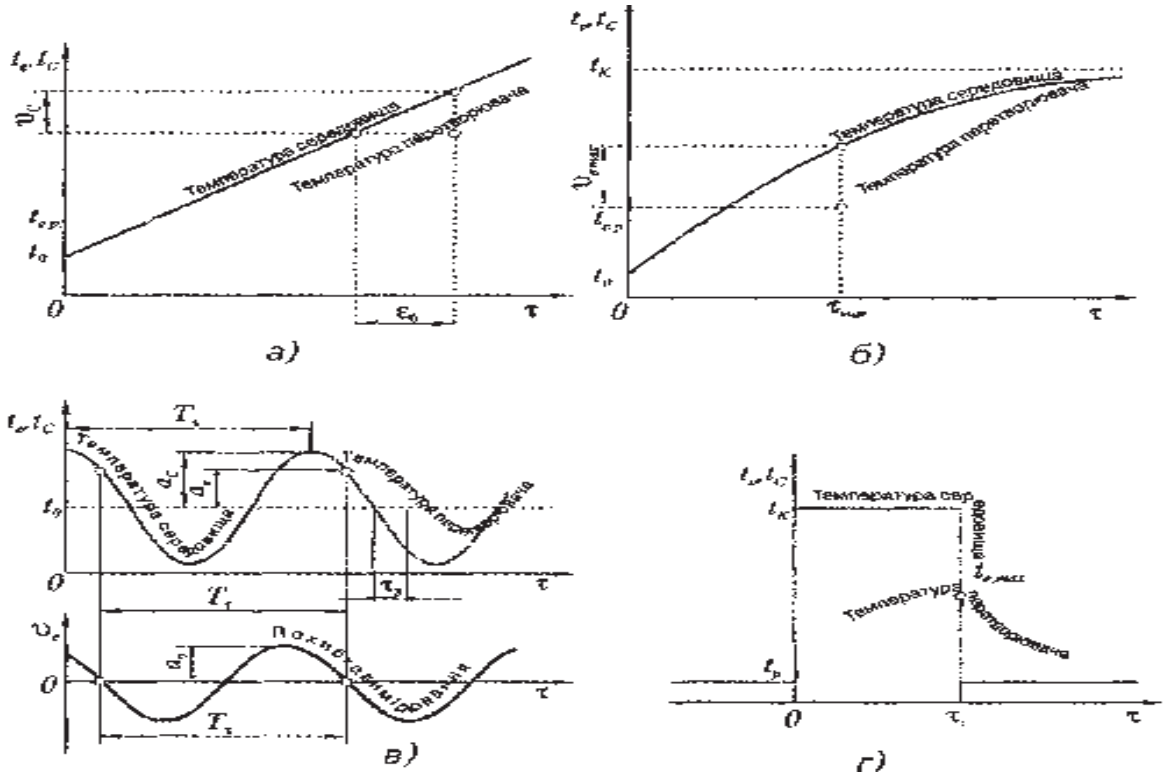

Рис. 1. Характер зміни температури термоперетворювача за різних змін температури середовища

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

Похибку вимірювання періодично змінної температури можна подати у вигляді:

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

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

Для того, щоби значення α_Q не перевищувало певне заздалегідь задане значення похибки Δ, необхідно притримуватися нерівності;

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

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

Відношення амплітуди коливань температури термоперетворювача α_e до амплітуди коливань температури середовища α_c у залежності від частоти ω називається амплітудно-частотною характеристикою термоперетворювача.

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

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

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:

$$t_\varepsilon(\tau) = t_k - \left(t_k - t_p\right)\exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right), \quad \text{для } 0 \le \tau \le \tau_i;$$
$$t_\varepsilon(\tau) = t_p - \left(t_{e\,max} - t_p\right)\exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_0}\right), \quad \text{для } \tau > \tau_i, \qquad (5)$$

де τ_i - 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 τ_i температура термоперетворювача повинна якомога менше відрізнятися від t_k, тобто має виконуватися умова: $t_k - t_{e\,max} < \Delta$, де Δ - задана похибка вимірювання. З рівняння (5) випливає, що згадана умова виконується для випадку

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

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 максимальної для τ=0 до нуля для $\tau \to \infty$, 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. Бартенєв В.Р. Технології PLUG & PLAYв техніці виміру температури // Контрольний - вимірювальні прилади й системи / В.Р. Бартенєв, Р.В. Бартенєв. – 1997. - № 2. – С. 24-27.

3. Фарсане Н.Г. Технологічні виміри й прилади: підручн. / Н.Г. Фарсане, Л.В. Илясов. – М.: Вища школа, 1999. - 340 с.

4. Бартенєв В.Р. Розподілена модульна система терморегулювання СИНТАЛ ТЕРМОЛІНК // CHIP NEWS / В.Р. Бартенєв, Р.В. Бартенєв. - 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. Євтіхієв 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 measurings are analysed by contact thermometers on modern stage development of automated control the system.

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