

УДК 623.004.67

Н.А. Меркулова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ ПОХИБОК КОМПАРАТОРА

В статті проаналізовані похибки компаратора та від чого вони залежать. Термоелектричний прилад складається з термоперетворювача, термоелемента і вимірювального приладу магнітоелектричної системи. Термоелектричні компаратори характеризуються широкою незалежністю свідчень від частоти і здатністю вимірювати при стаціонарних процесах середньоквадратичні значення струмів і напруги незалежно від форми кривої вимірюваних сигналів.

**Ключеві слова:** компаратори, похибки компаратора

## Вступ

**Постановка задачі.** У компенсаторах змінного струму можуть застосовуватися термоелектричні компаратори. Термоелектричні компаратори характеризуються широкою незалежністю свідчень від частоти і здатністю вимірювати при стаціонарних процесах середньоквадратичні значення струмів і напруги незалежно від форми кривої вимірюваних сигналів. Тому питання аналізу похибок компаратора, яке розглядається у цієї статті є актуальним для покращення метрологічних характеристик компараторів.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1–3] розглянуто питання пов'язані з визначенням похибок компаратора, розрахунків похибок.

**Метою статті** є аналіз особливостей похибок компаратора.

## Основний матеріал

Для думки про причини появи похибок компаратора звернемося до формули  $P_X = A(P_1 - P_2) = A I_D^2 r_H = A P U_D^2$ , логарифмуючи і диференціюючи яку, отримаємо:

$$\frac{dP_X}{P_X} = \frac{dA}{A} + \frac{dB}{B} + 2 \frac{dU_D}{U_D}.$$

Переходячи від нескінченно малих величин до кінцевих приростів знайдемо:

$$\gamma = \frac{\delta P_X}{P_X} = \frac{\delta A}{A} + \frac{\delta B}{B} + 2 \frac{\delta U_D}{U_D},$$

де  $\gamma$  - відносна похибка вимірювання.

З отриманого вираження виходить, що похибка вимірювання залежить від двох причин: 1) стабільності джерела допоміжної напруги; 2) стабільності опорів установки і опорів нагрівачів термоперетворювачів, під якою також розуміється незмінність опору із зміною частоти.

Стабільність допоміжного джерела живлення може бути зроблена достатньо високою, якщо як джерело використовувати звичайну акумуляторну батарею.

Допустиму похибку  $\gamma_p$  прийемо рівною 0,05%. Стабільність джерела живлення в процесі вимірювання, тобто протягом 1–2хв. можна вважати за рівну 0,001%; таким чином, похибкою від вимірювання напруги можна нехтувати.

Стабільність опорів установки в процесі вимірювання при відповідному їх виконанні буде вельми високою, в усякому разі в багато десятків разів вище за стабільність опору нагрівачів. Це пояснюється тим, що температура нагрівачів помітно змінюється в процесі роботи, а температурний коефіцієнт ніхрому або константану, з якого зазвичай виготовляють нагрівачі, складає для ніхрому  $\alpha = 0,015\%/град$ , для константану  $\alpha_1 = 0,004\%/град$ .

Розглянемо похибку від зміни опорів нагрівачів. Опір нагрівачів протягом проміжку часу, між двома вимірюваннями, тобто протягом 1–2хв., може практично змінитися тільки за рахунок зміни їх температури. Температурна похибка обумовлена двома причинами:

1) зміною спільного струму, що протікає по нагрівачах  $I_U + I_i$ , при включенні компаратора в ланцюг постійного і змінного струмів; ця температурна похибка по-різному позначається для випадку нерівності напруги постійного і змінного струмів і для випадку коефіцієнта потужності, не рівного одиниці;

2) зміною температури навколишнього середовища.

Визначимо співвідношення між похибкою вимірювань і зміною температури нагрівачів. Розглянемо, як змінюються співмножники  $A$  і  $B$  при зміні опорів нагрівачів  $R_H$  і  $r_H$ . Допустимо, що температура всіх нагрівачів змінилася на одну і ту ж величину, тобто:

$$\frac{\delta R_H}{R_H} = \frac{\delta r_H}{r_H}$$

(у момент виміру температура всіх нагрівачів буде однакою і дорівнюватиме температурі нагрівача першого термоперетворювача, що виходить з самого методу вимірювання.)

$$\frac{\text{Логарифмуємо і диференціюємо}}{2R_D + R_4 + R_H} \left[ \frac{R_{III}R_4 + R_H(R_{III} + 2R_D)}{4R_H R_{III} R_4} \right] = A$$

по  $R_H$ , отримаємо:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dR_H}{R_D + R_4 + R_H} + \frac{R_{III} + 2R_4}{R_{III}R_4 + R_H} \frac{dR_H}{R_{III} + 2R_4} - \frac{dR_H}{R_H}$$

Враховуючи, що  $R_D \gg R_H$ ;  $2R_4 \gg R_{III}$  і  $2R_H \gg R_{III}$ , отримане вираження можна привести до вигляду:

$$\frac{dA}{A} \approx \left( \frac{R_H}{2R_D + R_4} - \frac{R_{III}}{2R_H} \right) \frac{dR_H}{R_H} \quad (1)$$

Розглянемо, як зміниться співмножник  $B$  при зміні температури, тобто при зміні опору нагрівача  $r_H$ .

Логарифмуємо і диференціюємо

$$r_H \left( \frac{r}{r_H r_D + r r_D + r_H r} \right) = B$$

по  $r_H$ , отримаємо:

$$\frac{dB}{B} = \frac{r r_D - r_H r_D - r_H r}{r r_D + r_H r_D + r_H r} \cdot \frac{dr_H}{r_H} \quad (2)$$

Опір  $r$  виберемо рівним  $r_H$ . В цьому випадку вираження (2) прийме вигляд:

$$\left( \frac{dB}{B} \right) = - \frac{1}{1 + 2 r_D / r_H} \cdot \frac{dr_H}{r_H}$$

Таким чином, відносна похибка вимірювання

$$\gamma \cong \left( \frac{R_H}{2R_D + R_4} - \frac{R_{III}}{2R_H} - \frac{1}{1 + 2 \frac{r_D}{r_H}} \right) \frac{\delta R_H}{R_H} \quad (3)$$

Проаналізуємо отримане рівняння відповідно до технічних умов, заданих при проектуванні установки.

Прийmemo  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ . Величина додатково-го опору для  $U_{\min} = 30 \text{ В}$  складе  $14500 \text{ Ом}$ , максимальна його величина – близько  $15000 \text{ Ом}$  (оскільки  $U_{\max} = 300 \text{ В}$ ).

Робочу довжину нагрівача підігрівного опору, тобто ту частку нагрівача, над якою розташована термопара, небажано робити менше  $2,5 - 3 \text{ мм}$ , оскільки інакше відношення робочої довжини нагрівача до всієї його довжини буде дуже мало. Тому при розрахунках прийmemo спільну довжину нагрівача рівної  $4 \text{ мм}$ .

Опір нагрівачів залежно від матеріалу і конструкції може змінюватися в широкому діапазоні. При розрахунку прийmemo, що опір нагрівачів з ніхрому лежить в межах  $10 \div 30 \text{ Ом}$ , а опір нагрівачів з константана - в межах  $5 \div 15 \text{ Ом}$ . Шунти в компараторі розраховані на струми від  $100 \text{ мА}$  до  $10 \text{ А}$ . Опір шунтів лежить в межах  $5 \div 0,05 \text{ Ом}$ . Якщо як

джерело допоміжної напруги використовувати батарею з напругою  $4 \text{ В}$ , то зазвичай  $r_D > 10 r_H$ .

За цих умов максимальна похибка при застосуванні ніхромових нагрівачів складе  $\gamma_1 = -0,30 \frac{\delta R_H}{R_H}$ ,

а при застосуванні константанових нагрівачів –

$$\gamma_2 = -0,55 \frac{\delta R_H}{R_H}$$

Оскільки температурний коефіцієнт опору ніхрому  $\alpha = 1,3 \times 10^{-4}$ , то максимально допустима зміна температури нагрівача в процесі вимірювання складає  $13^\circ / \gamma_{\text{доп}} = 5 \cdot 10^{-4}$ . Температурний коефіцієнт опору константана складає  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ . Звідси максимальна допустима зміна температури константанового нагрівача в процесі вимірювання складає  $22^\circ\text{C}$ .

Як було вказано вище, температурна похибка виникає при зміні змінної напруги, при коефіцієнті потужності, не рівному одиниці, а при зміні температури навколишнього середовища.

Похибка від зміни напруги. В процесі компарування вимірювані потужності змінного і постійного струмів рівні.

$$\text{Вважаючи з } \phi = 1,0, \text{ маємо } I_U I_i = I'_U I'_i,$$

де  $I_U$  і  $I_i$  – складові постійного струму в нагрівачі, пропорційні відповідно вимірюваній напрузі і струму;  $I'_U$  і  $I'_i$  – аналогічні складові змінного струму в нагрівачі.

У момент вимірювання температури всіх нагрівачів рівні. При вимірюванні, потужності змінного струму температура нагрівачів складає:  $t' = c I_U'^2 + I_i'^2 + 2I'_U I'_i$ , де  $c$  – постійна.

При вимірюванні потужності постійного струму маємо:  $t = c I_U^2 + I_i^2 + 2I_U I_i$

$$\text{Ввівши позначення } \frac{I'_U}{I_U} = \frac{I_i}{I'_i} = 1 + \delta \text{ і } \frac{I_i}{I_U} = k,$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} t' - t &= c I_U'^2 + I_i'^2 - I_U^2 - I_i^2 \approx \\ &\approx c 2\delta I_U^2 - 2\delta I_i^2 = 2\delta c I_U^2 (1 - k^2). \end{aligned} \quad (4)$$

Постійну  $c$  визначають з характеристики опір в нагрівачі.

З отриманого рівняння виходить, що температурна похибка, обумовлена зміною напруги, буде мінімальна, якщо складові струму  $I_U$  і  $I_i$  дорівнюють один одному. Похибка від зміни –  $\cos \phi$ .

$$\text{Вважаючи } I'_U = I_U, \text{ маємо:}$$

$$I'_U I'_i \cos \phi = I_U I_i,$$

$$t' = c I_U^2 + I_i^2 + 2I_U I_i \cos \phi ;$$

$$t = c I_U^2 + I_i^2 + 2I_U I_i ,$$

$$\text{звідки} \quad t' - t = c I_i^2 (1 - \cos \phi) \quad (5)$$

Похибка від зміни  $\cos \phi$  пропорційна квадрату такою, що вважає струму  $I_i$  і максимальна при  $\cos \phi \rightarrow 0$ .

Як приклади визначимо похибку вимірювання від зміни; напруги і від  $\cos \phi$  при застосуванні ніхромових нагрівачів діаметром 20 мк, завдовжки 4 мм.

А. Для номінального значення вимірюваної потужності при

$$\cos \phi = 1,0, I = 10,0 \text{ Ма}, U = 0,5 \text{ В}, R_H = 14,0 \text{ Ом}$$

$$\text{отримуємо: } I_i = \frac{U}{2 R_H + R_{\text{пр}}} = 14,5 \text{ мА},$$

де  $R_{\text{пр}}$  – опір запобіжника;

$$R_{\text{пр}} = 1/5 R_H, \quad k = \frac{I_i}{I_U} = 1,45.$$

Для ніхромового нагрівача діаметром 20 мк при  $I = 10 \text{ мА}$   $c I^2 \cong 6^\circ$ .

Згідно (4), при  $\delta = \pm 0,1$  зміна температури нагрівача складе:

$$t' - t = 2c I_U^2 (1 - k^2) = \pm 2 \cdot 0,1 \cdot 6 (1 - 2,1) = \mp 1,3^\circ.$$

Б. Маємо  $\cos \phi \rightarrow 0$ ,  $I_U = 10 \text{ мА}$ ,  $I_i = 14,5 \text{ мА}$ .

Для ніхромового нагрівача діаметром 20 мк при  $I = 4,5 \text{ мА}$   $c I^2 \cong 12^\circ$ .

Зміна температури при цьому буде  $t' - t = c I_i^2 (1 - \cos \phi) = 12^\circ$ .

Завдяки масивному латунному ковпаку, що зменшує вплив різких змін температури навколишнього середовища, температура підігрівного опору за проміжок часу між двома вимірюваннями, рівним 1 хв. зміниться не більше ніж на  $0,1^\circ$ .

Максимальна зміна температури ніхромового нагрівача в процесі вимірювання складає  $12^\circ$ , що відповідає відносній зміні опору нагрівача  $\frac{\delta R_H}{R_H} = 0,16\%$  і відносній похибки вимірювання  $\gamma = 0,05\%$ .

Виходячи з допустимої похибки вимірювання, згідно розрахунку, діаметр ніхромового нагрівача довжиною  $l = 3 \div 5 \text{ мм}$  не повинен перевищувати  $16 - 20 \text{ мк}$ , а діаметр константового нагрівача тієї ж довжини не повинен перевищувати  $25 \div 30 \text{ мк}$ .

Слід рекомендувати виготовлення нагрівача з ніхрому діаметром  $10 - 20 \text{ мк}$ , завдовжки  $3 \div 5 \text{ мм}$  або з константана діаметром  $20 \div 30 \text{ мк}$  тієї ж довжини. Ніхромовий нагрівач переважно зважаючи на більшу переважувальну здатність.

## Висновки

1. Проаналізовані існуючі похибки компаратора.
2. Наведені розрахунки похибок від впливу опору нагрівачів, від зміни напруги.
3. Проведений аналіз можна використовувати при розробці випробувального устаткування вимірювально-інформаційних систем для промисловості народного господарства України.

## Список літератури

1. Кузнецов В.А. Измерения в электронике: справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
2. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: підручник / В.М. Чинков. – Х.: ХВУ, 2001. – 405 с.
3. Толстиков В.Ф. Аналоговые методы и средства измерений электрических и магнитных величин. Часть 1 / В.Ф. Толстиков. – Х., 1991. – 327 с.

Надійшла до редколегії 19.06.2009

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОМПАРАТОРА

Н.А. Меркулова

*В статье проанализированы погрешности компаратора и от чего они зависят. Термоэлектрический прибор состоит из термопреобразователя, термоэлемента и измерительного прибора магнитоэлектрической системы. Термоэлектрические компараторы характеризуются широкой независимостью свидетельств от частоты и способностью измерять при стационарных процессах среднеквадратичные значения токов и напряжения независимо от формы кривой измеряемых сигналов.*

**Ключевые слова:** компараторы, погрешности компаратора.

## ANALYSIS OF ERRORS OF COMPARATORSORTER

N.A. Merkulova

*In the article the errors of comparatorsorter are analysed and what they depend on. A thermo-electric device consists of thermopreobrazovatelya, thermo-couple and measuring device of the electro-magnetic system the Thermo-electric comparatorsorters are characterized wide independence of certificates from frequency and ability to measure the root-mean-squares of currents and tension regardless of form of curve of measureable signals at stationary processes.*

**Keywords:** comparatorsorters, errors of comparatorsorter.