

**Висновки.** Запропонований спосіб виявлення, вимірювання та контролю показників якості забезпечує отримання максимальної і всебічної інформації щодо часових перенапруг та западин напруги в електричних мережах загального призначення. З'являються нові можливості для підвищення якості електроенергії через вдосконалення систем регулювання та стабілізації фазних (лінійних) напруг у три- та однофазних електричних мережах за рахунок збільшення інформативної бази даних. Крім цього, покращання способу контролю режимів функціонування енергосистеми сприяє підвищенню надійності роботи її основних вузлів, запобігаючи виникненню екстремальних та аварійних режимів.

1. ГОСТ 13109-97. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.* 2. Сегеда М.С. *Електричні мережі та системи.* – Львів, 1999. 3. Авербух А.М. *Релейная защита в задачах с решениями и примерами.* – Л., 1975. 4. Шнеерсон Э.М. *Дистанционные защиты.* – М. 1986. 5. Васютинский С.Б. *Вопросы теории и расчета трансформаторов.* – Л., 1970. 6. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. *Техника высоких напряжений.* – М. – Л.-д., 1963. 7. *Трансформаторы тока* / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. – Л.-д., 1989. 8. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы.* – М., 1988. 9. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая.* – М., 1974. 10. Шрюфер Е. *Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизованных сигналов.* – К., 1992. 11. Наконечный А.Й. *Теория малохвильового перетворення та її застосування.* – Л., 2001.

УДК 621.317

М.М. Микийчук<sup>1</sup>, Р.М. Огірко<sup>2</sup>, Т.Г. Бойко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
<sup>2</sup>Державний науково-дослідний інститут “СИСТЕМА”

## ПРОГНОЗУВАННЯ ПОХИБОК ПРОМИСЛОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

© Микийчук М.М., Огірко Р.М., Бойко Т. Г., 2004

**Розглянуто прогнозування часових і температурних похибок засобів вимірювання температури. Запропонований підхід дасть змогу підвищити метрологічну надійність засобів вимірювання температури і сприятиме зменшенню експлуатаційних затрат.**

**The prognostication of temporal and temperature errors of temperature measuring means are considered in the paper. Offered method allows to get a more metrology reliability of temperature measuring means and allows to reduce of operating costs.**

**Вступ.** Температура є основним інформативним параметром більшості технологічних процесів в промисловості. Найширше для вимірювання температури застосовують контактні методи з використанням термоелектричних перетворювачів та термоперетворювачів опору, питома вага яких в основних галузях промисловості становить майже 80 % [1]. Тому якість температурних вимірювань з використанням методів контактної термометрії відчутно впливає на результати промислового виробництва.

Особливе значення мають температурні вимірювання, що застосовують для автоматизації технологічних процесів. Переваги автоматизації очевидні, але, поряд з цими, її застосування зумовило: по-перше, збільшення кількості засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) внаслідок збільшення обсягів вимірювань температури, по-друге, необхідність розширення функціональних можливостей промислових ЗВТ для вимірювань інших технологічних параметрів, наприклад, уніфікованих сигналів, а також регулювання значень цих параметрів, по-третє, підвищення вимог до надійності функціону-

вання ЗВТ внаслідок зростання їх впливу на результати контрольованого процесу. Загалом характерною особливістю застосування сучасних ЗВТ є те, що поряд з кількісним зростанням, розширюються їх функціональні можливості, зокрема, збільшується можливість впливу на процеси, які вони контролюють. В цих умовах значно зростає відповідальність за результати роботи ЗВТ і гостро постає проблема їх ефективної експлуатації [2, 3].

Ефективність контактних методів вимірювання температури в промисловості визначається метрологічною надійністю вторинних засобів вимірювання температури, які вимірюють вихідні сигнали первинних перетворювачів температури. Одним з основних чинників, що визначає ефективність промислових ЗВТ, є наявність сучасного метрологічного забезпечення [4]. Базовим елементом їх метрологічного забезпечення є калібратори електричних сигналів. Однак поряд з їх вдосконаленням, в останні роки все відчутнішою стає недосконалість відомих методів оцінювання і контролю похибок промислових засобів вимірювань. Такий стан пояснюється специфікою застосування ЗВТ, яка полягає в тому, що ЗВТ експлуатуються в умовах, що відрізняються від умов їх перевірки, коли виникають додаткові похибки. Причому оцінюють додаткові похибки за визначеною під час атестації залежністю похибки від значення впливального чинника і нормують, як правило, встановлюючи її граничнодопустиме значення. Оцінка сумарної похибки в конкретних умовах застосування визначається як сума основної та додаткових похибок, пронормованих для типу ЗВТ, без урахування метрологічного запасу, який має конкретний засіб. Тому часто метрологічно надійний ЗВТ вилучають із технологічного процесу для здійснення його перевірки, що спричиняє невиправдані затрати. Такої ситуації можна уникнути, якщо прогнозувати динаміку похибок промислових ЗВТ температури, що, крім підвищення їх метрологічної надійності, сприятиме зменшенню експлуатаційних затрат.

**Сучасний стан проблеми.** Зміна похибки ЗВТ зумовлена старінням його вузлів та елементів, і залежить від інтенсивності використання ЗВТ, умов його експлуатації, взаємодії з довкіллям, фактичної надійності елементів, з яких він виготовлений тощо. Причому зміну похибки визначають процеси, які відбуваються на молекулярному рівні [6] і залежить, переважно, від використаних матеріалів та технології виготовлення. Для того, щоб забезпечити довготривалу метрологічну надійність ЗВТ, завод-виробник вимушено встановлює похибку, меншу за нормоване значення на  $\Delta_3$ .

$$\Delta_0 = \Delta_{\text{доп}} - \Delta_3 \quad (1)$$

де  $\Delta_0$  – значення похибки ЗВТ на початку дослідження, наприклад, в момент первинної перевірки;

$\Delta_{\text{доп}}$  – граничнодопустиме значення похибки ЗВТ;

$\Delta_3$  – метрологічний запас.

Однак під час експлуатації ЗВТ при оцінюванні їх похибок користуються лише граничнодопустимим значенням  $\Delta_{\text{доп}}$ .

Доцільніше, на нашу думку, було б оцінювати похибку, враховуючи значення  $\Delta_0$ . Відомо [4], що основний вплив на похибку промислових ЗВТ мають час роботи та температура, за якої її експлуатують. Ці два впливні чинники ведуть до виникнення відповідних додаткових складових похибки, що зумовлюють зміну  $\Delta_0$ . Тоді похибку ЗВТ під час його експлуатації, можна подати у вигляді:

$$\Delta(\Theta, t) = \Delta_0 + \Delta_{\Theta} + \Delta_t, \quad (2)$$

де  $\Delta_{\Theta}$  – температурна складова похибки ЗВТ;

$\Delta_t$  – часова складова похибки.

Сьогодні, аналізуючи похибки під час експлуатації ЗВТ, зміну похибки подають у вигляді стаціонарного випадкового процесу  $\Delta(\Theta, t)$  зі сталим законом розподілу. Аналіз зводиться до пошуку виду цього закону розподілу. За таких умов метрологічно справний стан ЗВТ зберігається доти, доки миттєве значення випадкового процесу зміни похибки коливається в межах інтервалу  $[-\Delta_{\text{доп}}, +\Delta_{\text{доп}}]$ , а вихід випадкового процесу  $\Delta(\Theta, t)$  за ці межі класифікується як метрологічна відмова.

Неоптимальність такої моделі пояснюється тим, що ймовірність виходу випадкового процесу за межі  $\pm\Delta_{\text{доп}}$  однакова як на початку його експлуатації, так і через певний час від початку. Тобто для цієї моделі зміни похибки час між метрологічними відмовами є сталий, що і покладено в основу рівномірних міжперевірних інтервалів.

Насправді ж може спостерігатися значне зростання ймовірності виходу похибки за встановлені межі зі зростанням часу від початку експлуатації ЗВТ [6]. Тому для промислових ЗВТ доцільно зміну похибки подавати у вигляді нестационарного випадкового процесу зі сталою в часі дисперсією  $D$  та лінійно зростаючим математичним сподіванням [6]. Цю залежність можна представити виразом:

$$\Delta(\Theta, t) = \Delta_0 + k_p \cdot \sqrt{D}(0) + V_{\Delta} \cdot t, \quad (3)$$

де  $V_{\Delta}$  – швидкість зміни значення похибки.

Однак така спрощена модель не враховує можливої зміни швидкості наростання похибки, а тому її застосування для прогнозування похибок промислових ЗВТ є обмеженим. При пришвидшенні чи сповільненні метрологічного старіння ЗВТ характер зміни похибки набуває нелінійний характер. Тоді кожен наступний міжперевірний інтервал буде відрізнятися від попереднього.

Перехід від лінійної моделі зміни похибки ЗВТ (3) до нелінійної кардинально змінює характер описуваного процесу і його використання виправдане, якщо подібні властивості дійсно притаманні реальним засобам. У такому разі нелінійну модель похибки ЗВТ можна представити виразом:

$$\Delta(\Theta, t) = \Delta_0 + k_p \cdot \sqrt{D}(0) + V_{\Delta} \cdot t + a \cdot t^2, \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що враховує динаміку зміни похибки.

Отже, використання математичної моделі (4) для прогнозування значення похибки можливе, якщо відомі чотири незалежні параметри:  $\Delta_0$ ,  $D(0)$ ,  $V_{\Delta}$ , і  $a$ .

#### **Прогнозування похибок промислових ЗВТ температури**

Отримати експериментальні дані про характеристики, що входять до (4), нині досить складно, оскільки при перевірці промислових ЗВТ переважно констатують факт знаходження похибки в заданих межах, а не фіксують конкретні їх значення.

Однак якщо під час експлуатації ЗВТ все ж виконувати метрологічні дослідження, то на їх основі можна прогнозувати характеристики його похибок [5]. Прогнозування зміни похибок ЗВТ буде ґрунтуватися на результатах їх ідентифікації в різні моменти часу та при різних значеннях зовнішньої температури.

Ще одним важливим моментом стосовно забезпечення високої метрологічної надійності сучасних промислових ЗВТ є можливість використання для прогнозування його метрологічного стану результатів автоматичної самодіагностики. Важливо оптимально пов'язати результати самодіагностики з прогнозуванням характеристик ЗВТ.

Розглянемо один з варіантів прогнозування похибок промислових ЗВТ. Співвідношення між початковим значенням похибки  $\Delta_0$  в момент перевірки засобу вимірювання та допустимим значенням  $\Delta_{\text{доп}}$  можна виразити:

$$\varphi = \frac{\Delta_0}{\Delta_{\text{доп}}}, \quad (5)$$

де  $\Delta_{\text{доп}}$ ,  $\Delta_0$  – відповідно граничнодопустиме нормоване значення похибки та початкове значення похибки ЗВТ в момент перевірки, визначене у нормальних температурних умовах.

Визначивши для конкретного ЗВТ  $\Delta_0$ , можна знайти допустимий температурний діапазон експлуатації та інтервал між черговими перевірками. Вирази для визначення допустимого значення часового та температурного дрейфів можна подати у вигляді:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = \frac{(1 - \varphi)}{\varphi} \cdot \lambda_t \cdot \Delta_0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \Theta} = \frac{(1 - \varphi)}{\varphi} \cdot \lambda_{\Theta} \cdot \Delta_0, \quad (7)$$

де  $\partial \Delta / \partial t$ ,  $\partial \Delta / \partial \Theta$  – відповідно часовий та температурний дрейфи похибки ЗВТ;

$\lambda_t$ ,  $\lambda_{\Theta}$  – вагові коефіцієнти відповідно часової та температурної складових похибок.

Як було показано в [5], прогнозування температурних та часових дрейфів похибки ЗВТ найкраще здійснювати, відповідно, лінійною та експоненційною моделями:

$$\frac{\partial \Delta(t)}{\partial \Theta} = \frac{\partial \Delta_0}{\partial \Theta} (1 + V_{\Theta} \cdot t), \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Delta(t)}{\partial t} = \frac{\partial \Delta_0}{\partial t} (\exp V_t \cdot t - 1). \quad (9)$$

де  $V_{\Theta}$ ,  $V_t$  – швидкість зміни відповідно температурного дрейфу та часового дрейфу за час експлуатації вимірювального пристрою.

Відомо [3, 6], що на початку експлуатації ЗВТ ймовірність метрологічної відмови дорівнює нулю, тому період безвідмовної роботи визначатиметься ймовірністю грубих відмов. Під час подальшої експлуатації вимірювального засобу, знаючи значення часового та температурного дрейфів, властивих певному типу ЗВТ, умову зростання можливості його відмови можна сформулювати як зміну початкового значення похибки  $\Delta_0$  на 50%:

$$\frac{\partial \Delta_i}{\partial t} \geq \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta_0}{\partial t}, \quad \frac{\partial \Delta_i}{\partial \Theta} \geq \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta_0}{\partial \Theta} \quad (10)$$

Під час експлуатації, знаючи значення температурного та часового дрейфів –  $\frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial \Theta}$ , отриманих при попередній перевірці, та їх значення при здійсненні наступної перевірки  $\frac{\partial \Delta_i}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial \Delta_i}{\partial \Theta}$  можна прогнозувати момент наступного контролю похибки. Прогноз можна здійснити, враховуючи умову:

$$\frac{\partial \Delta_i}{\partial t} - \frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial t} \approx 0, \quad (11)$$

Це означає, що не відбулося відчутної зміни часового дрейфу похибки, то період до наступної операції контролю можна не змінювати порівняно з попереднім.

Якщо виконується умова:

$$\frac{\partial \Delta_i}{\partial t} - \frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial t} > \frac{(1 - \varphi)}{\varphi} \cdot \lambda_t \cdot \frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial t}, \quad (12)$$

тобто відчутно змінився часовий дрейф похибки, то час наступної операції контролю для часового дрейфу необхідно зменшити в  $K_t$  разів, де

$$K_t = \frac{\frac{\partial \Delta_i}{\partial t}}{\frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial t}}. \quad (13)$$

Коли при наступному контролі швидкість часового дрейфу знову зростає, необхідно приймати рішення про ремонт ЗВТ.

Аналогічно для температурного дрейфу, якщо виконується умова:

$$\frac{\partial \Delta_i}{\partial \Theta} - \frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial \Theta} > \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \cdot \lambda_t \cdot \frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial \Theta}, \quad (14)$$

то час наступної операції контролю для температурного дрейфу необхідно зменшити в  $K_\Theta$  разів, де:

$$K_\Theta = \frac{\frac{\partial \Delta_i}{\partial \Theta}}{\frac{\partial \Delta_{i-1}}{\partial \Theta}} \quad (15)$$

Подальше зростання температурного дрейфу під час експлуатації є підставою для ремонту ЗВТ.

### Висновки

Важливою умовою забезпечення прогнозування похибок ЗВТ є, по-перше, визначення статистичних моделей похибок конкретного типу ЗВТ, по-друге, визначення числових значень показників моделей похибок для конкретного екземпляра ЗВТ і технологічного процесу, в якому цей засіб задіяний.

Здійснення прогнозування значень похибок промислових ЗВТ дасть змогу значно зменшити ймовірність роботи несправного засобу в технологічному процесі виробництва певного виду продукції, що, своєю чергою, позитивно вплине на відсоток виходу придатної продукції, яка виготовляється в цьому технологічному процесі.

Вирішальне значення запропонований метод може мати при визначенні і коригуванні періодичності придатності ЗВТ до експлуатації.

Окрім того, метод дає змогу визначити допустиме відхилення інтервалів підтвердження від регламентованих в нормативній документації без шкоди для вірогідності вимірювань, обчислити безвідмовність і, принаймні теоретично, встановити ефективний МПІ. Крім того, обчислений розкид покаже, чи є обґрунтованою межа допустимого значення похибки, зазначена в технічних умовах виробника, а аналіз виявленого температурного і часового дрейфів характеристик ЗВТ допоможе розробити заходи для його запобігання.

Запропонована методика повинна мати значне практичне застосування в технологічних процесах з використанням термоелектричних перетворювачів та термоперетворювачів опору для контролю температурних режимів. Однак при її впровадженні у виробничий процес може виникати ряд труднощів, пов'язаних із затратами при визначенні необхідних параметрів моделей похибок. Ще одним недоліком такого підходу є те, що методика повинна бути "прив'язана" до конкретного технологічного процесу з його температурними режимами і тривалістю роботи конкретного ЗВТ, що задіяний в ньому.

1. Кюзенди О.А. Комплексные исследования и разработка приборов и схем для измерения температуры контактным методом с повышенной точностью и надежностью: Дис. канд. техн. наук: 05.11.04. – Львов, 1971. – 205 с.
2. Микийчук М.М. Шляхи вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювання температури // Мат. четвертої міжн. наук-техн. конф. "Контроль і управління в технічних системах -КУТС - 97", Вінниця, 21–23 жовтня 1997. – Вінниця, 1997. – Том 2. С. 104–107.
3. Кошюхов А.Г. Автоматизация поверки: старые подходы и перспективные принципы // Измерительная техника. – 1987. – № 11. – С. 14–15.
4. Микийчук М.М. Засоби повірки вторинних пристроїв контактної термометрії на основі активних імітаторів опору. Автореф. дисерт. канд. техн. наук – Львів, 1998.
5. Екимов А.В., Ревяков М.И. Надёжность средств электроизмерительной техники. – Л., 1986.
6. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. – Л., 1990.