

УДК 536.532

Б.І. Стадник, С.П. Яцишин

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПОХИБКИ

*На підставі аналізу розбіжності характеристик і оцінювання змін функції перетворення термоелектричних перетворювачів термометричний матеріал розглянуто як елемент, що формує інформаційний сигнал; подано генезу інструментальної похибки вимірювання і взаємозв'язок її основних складових.*

**Ключові слова:** термоелектричний перетворювач, функція перетворення, похибка.

### Вступ і аналіз останніх досягнень метрології

У зв'язку з покращенням програмно-технічних засобів оброблення результатів вимірювань усе більшої ваги набувають наступні проблеми стабільності термоелектричних перетворювачів (далі - ТП):

- функцію перетворення (ФП) ТП визначають термометричні матеріали (ТМ), тоді як її зміни залежать від стану цих матеріалів, який не можна вважати стабільним під час експлуатації;
- не до кінця вивчено теплові, електричні та інші процеси перенесення у ТМ, що зумовлюють нестабільність ФП, формуючи інструментальну похибку [1];
- за одиничного вимірювання класичний підхід похибок не завжди адекватний [2]. Концепція оцінювання результату вимірювань може базуватись і на підході непевності, і на інших підходах.

**Метою роботи** є дослідження інструментальної похибки ТП, включаючи окремі складові, а також вивчення характеру їх виникнення і змін у світлі нових концепцій оцінювання результатів вимірю-

вання та у зв'язку з постійним розвитком знань процесів всередині самого ТМ.

### Проблеми точності вимірювання температури

Унаслідок особливостей виготовлення ТМ функція перетворення ТП, навіть, однієї партії характеризується певним розкидом  $P_0$  (рис. 1) [3]. У свою чергу, виробник ТП враховує, що незалежно від умов експлуатації в ТМ відбуваються внутрішні процеси, які зумовлюють істотне розширення одного із параметрів інструментальної похибки інтервалу охоплення номінального значення ФП (рис. 1, кр.  $P_1$ ).

Окрім того, під час експлуатації ФП змінюється під дією факторів впливу. При коректній технології виробництва ТП ці зміни не повинні виходити поза межі розширеної й гарантованої виробником інструментальної похибки, що значення якої встановлено відповідно до планових умов експлуатації. До прикладу, для 1000 год. при 900 К гарантована виробником ТП (типу ХА) інструментальна похибка  $P_1$  не перевищує  $\pm 1\%$ .

Для зменшення цієї розширеної похибки ТП проведено дослідження [4], що дають змогу виділити в ній систематичну складову  $\Delta U_{\text{сист}} = \Delta U_{\text{пізн}}$  із власним знаком і звужити інтервал охоплення випадкової складової до  $P_2 < P_1$ . Вказаний підхід до розгляду похибки стає чинним за умови, що виявлено тенденцію направленої зміни ФП під час експлуатації. Найчастіше це трапляється у початковий – 10 годин – період експлуатації, коли зміни ФП направлені, а їхня інтенсивність – максимальна [5].

### Інструментальна похибка як ія процесія перенесення

**Методологія.** Зміни ФП визначаються процесами у ТМ, що формують систематичну складову інструментальної похибки внаслідок дії різних внутрішніх і зовнішніх чинників впливу (пізнана частина похибки). Наслідки дії згаданих процесів можна вивчати з допомогою термодинаміки [6], яка здавна вважається теоретичною базою термоелектрики і має розвинутий фізико-математичний апарат.

Основною засадою праці вважається виділення ТМ із складу ТП, що дає змогу вивчати дію на ТМ термодинамічних параметрів контрольованого середовища, включаючи температуру. При цьому, стан ТМ описується ентропією  $S$ , а його зміни – мінімізацією приросту ентропії. Коли термодинамічна система ТМ незначно віддалена від стану рівноваги,

процеси перенесення описуються термодинамічними потоками  $J$  й силами  $X$ , що зв'язані співвідношенням взаємності Онзагера. Останнє отримано розкладом у ряд Тейлора потоку  $J = J(X_1; X_2; \dots; X_J)$ , залежно від конкретних термодинамічних сил. Термодинаміка, за винятком [7], розглядає процеси перенесення у лінійному наближенні, за умови  $J_1(0) \rightarrow 0$ :

$$J_1(X_1, \dots, X_J) = \sum_J \left. \frac{\partial J_1}{\partial X_J} \right|_{(0)} (X_J - 0) = \sum_J \beta_{1J} X_J.$$

**Функція перетворення ТП** – це залежність інтегральної термо-ЕРС від температури. Для її визначення слід розв'язати рівняння перенесення електричного потоку в ТМ за наявності, принаймні, 4-х термодинамічних сил (електричної  $\square \nabla \phi$ , хімічної  $\square \nabla(\mu/T)$ , теплової  $\square \nabla T$  і механічної  $\sim \nabla \sigma$ ). Ці сили пропорційні градієнтам відповідних потенціалів – хімічного  $\mu$  і електричного  $\phi$ , а також градієнтам механічних напружень  $\sigma$  та температури  $T$ :

$$J_e = -L_{11} \nabla \phi - \frac{L_{12}}{T} \nabla T - L_{13} \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right) - L_{14} \nabla \sigma. \quad (1)$$

Тут  $L_{ik}$  – коефіцієнти пропорційності. Оскільки переважно термоелектроди ТП розімкнені або використовується компенсаційний метод вимірювання сигналу, то надалі вважаємо, що електроперенесення під час вимірювання відсутнє.

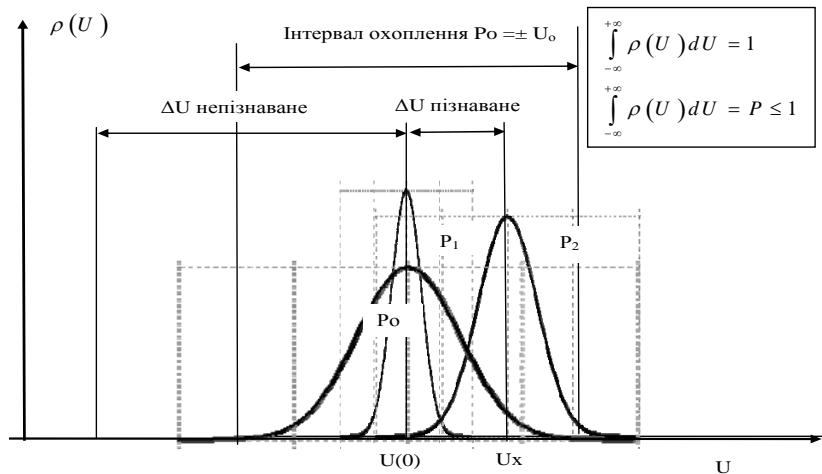


Рис. 1. Розкид метрологічних характеристик та інструментальна похибка ТП: систематична й випадкова складові (підхід похибок)

На підставі традиційних уявлень стосовно порядку аналізу дії на ФП різних функцій впливу, насамперед, оцінимо дію кожної окремої функції, а потім їх спільну дію:

а) слабо деформовані ТМ з інтенсивним масоперенесенням, зумовленим високою температурою;

б) сильно деформовані ТМ за кімнатних температур, коли відбувається деформаційне масоперенесення;

в) середньо деформовані ТМ за середніх температур (умови повзучості ТМ), коли механічні й хімічні чинники впливу взаємокорелюють.

**А. Випадок високих температур та незначних деформацій ТМ.** Коли використовуються недеформовані ТМ, то останньою складовою в (1) можна знехтувати. Виразимо із (1) напруженість електричного поля:

$$E_1 = \frac{k_2 - k_1 \mu}{ek_1 T} \nabla T + \frac{1}{e} \nabla \mu = \alpha \nabla T + \frac{1}{e} \nabla \mu,$$

( $k_1, k_2$  – коефіцієнти) та проінтегруємо її по довжині термоелектродів ТП. Отримаємо інтегральну термо-ЕРС у вигляді ФП (1-й доданок) із величиною, зв'язаною зі зміною хімічного потенціалу ТМ в зоні градієнту температури (2-й доданок):

$$U = \int_x \alpha [T(x)] \nabla_x T dx + \frac{1}{e} \int_x \nabla_x \mu [T(x)] dx = \\ = U_0 (T_H; T_C) + \Delta U_X (T_H; T_C; \nabla T; \nabla \mu; \dots).$$

Тут 2-й доданок – *хімічний вид систематичної складової інструментальної похибки* (функція впливу). Раніше ТМ спрощено розглядалися як однорідні і цим доданком нехтували; на даний момент подібне вважається несумісним з намаганням термометрії мінімізувати похибки. Даний доданок стає гранично максимальним за тривалої витримки ТМ у полі градієнту температури, коли устанавлюється стаціонарний термодинамічний стан з мінімумом ентропії. Тоді потік перенесення маси відсутній, а потік тепла зберігається. Розв'язання рівнянь тепло-масо-перенесення через отримані градієнт хімічного потенціалу й розподіл домішок дає змогу визначити ФП, як алгебраїчну суму вихідного значення й хімічного виду систематичної складової похибки:

$$U = U_0 + \Delta U_X = \int_T \alpha(T) dT + \frac{Q^* C}{e} \ln \frac{T_H}{T_C}; \\ \delta U_X = K_X (C, Q^*, T, t) = \frac{\Delta U_X(C, Q^*, T, t)}{U_0}. \quad (3)$$

У працях [4, 5] експериментально досліджено хімічний вид систематичної складової похибки для різних ТМ у різноманітних умовах експлуатації. Ця складова  $A \pm B$  (значення  $A$  характеризується непевністю з інтервалом охоплення  $\pm B$ , що згідно з (3) залежить від розкиду розподілу домішок.

*Б. Випадок кімнатних температур та значних деформацій.* За відносно низьких температур у ТП, коли практично відсутнє дифузійне перенесення компонентів, для деформованих термоелектродів визначено *механічний вид систематичної складової інструментальної похибки* (функція впливу):

$$U = U_0 + \Delta U_M = \int_{\bar{O}} \alpha [T(x)] \nabla_x T d\bar{o} + \frac{1}{em} \times \\ \times \int_{\bar{O}} \frac{1}{E_U} \sigma \nabla_x \sigma [T(x)] dx; \quad \delta U_M = K_M = \frac{\Delta U_M}{U_0}. \quad (4)$$

Прийняте значення цього виду систематичної складової інструментальної похибки становить  $C \pm D$  (тут  $\pm D$  – непевність, зумовлена розкидом механічних деформацій та мікронапружень, а також температури й швидкості деформування).

*В. Випадок середніх температур і деформацій.* Цей випадок є проміжним між випадками А і Б. Одночасно відбуваються дифузійне і механічне масоперенесення, що посилюють зміни ФП. На підставі співвідношення Онзагера можна дійти до взаємної незалежності 2-х вищеописаних видів систематичної складової похибки. Відсутність їх кореляції зумовлена незалежністю термодинамічних сил унаслідок цільового вибору системи координат: за [6] “вибір термодинамікою системи координат ґрунтується на наявності або відсутності ознаки адитивності у властивостях ТМ”.

Одночасна дія зазначених процесів перенесення служить основою для формування *пізнаваного компоненту інструментальної похибки* вимірювання температури. При цьому, сумуються самі значення похибок та їх непевності. Так, у випадку незалежності окремих видів систематичних складових отримуємо похибку:

$$\delta_\Sigma = K_M + K_X = A + C \pm (B + D). \quad (5)$$

У разі кореляції 2-х видів систематичної складової інструментальної похибки, а це можна вважати найбільш реальним випадком, скористаємось підходом ІМС [8] для сумування непевностей корельованих величин. За ним сумарна непевність результату визначається середньоквадратичним значенням непевності окремих величин.

*Термоциклювання* стрімко посилює інтенсивність процесів перенесення, позаяк у ТМ виникає нестаціонарний термодинамічний стан. Систематична складова інструментальної похибки збільшується в  $K_T$  разів ( $K_T$  – коефіцієнт кратності):

$$K_T = 1 + \frac{\tau_{in}}{\tau} \left( \frac{T_{max}}{T_{min}} - 1 \right) N^i \geq 1. \quad (6)$$

Тут  $T_{max}; T_{min}$  – максимальна і мінімальна температура циклу;  $\tau_{in}$  – стала інерції сенсора (ТМ);  $\tau$  – тривалість стаціонарного режиму до моменту вимірювання;  $i$  – показник степеню (0...1), який приймають рівним 1 при збіжності напрямків градієнтів температури й механічних напружень.

Коефіцієнту кратності притаманна власна непевність:  $K_T = E \pm F$ . До прикладу, в умовах 12-кратного термоциклювання (273 К – 1373 К) чутливого елемента типу ВР-5/20 з термоелектродами діаметром 0,2 мм за відношення сталих часу – 0,2 с / 10 с і показника степеня – 1, коефіцієнт кратності оцінено у  $2,0 \pm 0,2$ .

У результаті, формується *граничне значення систематичної складової інструментальної похибки вимірювання температури*, як добуток сумарної систематичної складової інструментальної похибки та коефіцієнта кратності:

$$\delta_\Sigma = K_\Sigma K_T = (K_X + K_M) K_T. \quad (7)$$

Це граничне значення визначено як систематична складова  $(A + C)E$  при її інтервалі охоплення, отриманому сумуванням інтервалів 2-х видів систематичної складової похибки. Останній змінюється від  $\pm \left( \frac{B+D}{A+C} + \frac{F}{E} \right)$  (незалежні хімічний і механічний

види) через  $\pm \left( \frac{\sqrt{B^2 + D^2}}{A+C} + \frac{F}{E} \right)$  (корельовані види)

до  $\pm \left( \frac{\sqrt{B^2 - D^2}}{A+C} + \frac{F}{E} \right)$  (для  $K_{кор.} = -1$ ).

Цим показано можливість одночасного застосування підходів похибок і непевності, що відповідає

дає *гібридному підходові* оцінювання результату вимірювання, що його розвиває проф. Ранев. Хр. К. [8]. Зазначений підхід нами модифіковано у *гібридно-термодинамічний підхід*, що передбачає вивчення інструментальної похибки ТП із залученням термодинаміки необоротних процесів [6].

### Гібридно-термодинамічний підхід

Окремі функції впливу, як адитивні види систематичної складової інструментальної похибки, створюються у ТМ дією градієнтів зовнішніх термодинамічних полів. Коефіцієнт кратності визначається інтенсифікацією процесів перенесення внаслідок термоциклювання. У результати, посилюються функції впливу і збільшується похибка вимірювання.

До кожного із вказаних видів систематичних складових похибки долучаються мультиплікативні складові, зумовлені флуктуаційністю ТМ:

– при масоперенесенні враховується зумовлений зернистістю ТМ коефіцієнт  $K_P$ , як множник щодо хімічного виду складової;

– у деформованих ТМ розподілені мікропори послаблюють вплив механічних напружень, що виражається коефіцієнтом  $K_{II}$ , як множником щодо механічного виду складової;

– ентропійний коефіцієнт  $K_E$ , що враховує передісторію ТМ, служить множником щодо коефіцієнту кратності.

Це пояснює вигляд *граничного значення систематичної складової інструментальної похибки*, як адитивної сукупності мультиплікативних пар функцій впливу і коефіцієнтів до них:

$$K_{\Sigma} = (K_X K_P + K_M K_{II}) K_T K_E. \quad (8)$$

Поєднання у пари, де один із множників визначений флуктуаціями властивостей ТМ, а інший – флуктуаціями параметрів прикладених зовнішніх полів відповідає змісту *флуктуаційно-дисипаційної теорії термодинаміки*.

### Висновки

Узагальненість гібридного підходу до оцінки результатів вимірювань температури і відсутність конкретизації наслідків дії експлуатаційних чинників на термоелектричні перетворювачі зумовлюють

збільшення закладеної виробником інструментальної похибки (розширення інтервалу охоплення метрологічних характеристик).

Запропоновано гібридно-термодинамічний підхід до оцінювання результатів вимірювання, в основу якого покладено вивчення джерел походження похибки та окремих функцій впливу.

Дослідження процесів перенесення у термометричних матеріалах перетворювачів, базоване на термодинаміці, дає змогу визначити пізнаваний компонент систематичної складової інструментальної похибки та істотно зменшити гарантовану виробником ТП інструментальну похибку.

### Список літератури

1. Яцишин С.П. *Розвиток теоретичних основ і створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термометричних перетворювачів на основі статистичної термодинаміки: дис. ....доктора техн. наук : 05.11.04 / Яцишин Святослав Петрович*. – Львів, 2008. – 275 с.
2. Дорожовець М.М. *Обробка результатів вимірювань / М.М. Дорожовець*. – Львів : НУ „Львівська політехніка”, 2007. – 621 с.
3. *Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики: ДСТУ 2837-94*. – [Чинний від 1997-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994 р. – (Національні стандарти України).
4. *Вимірювання температури: теорія і практика / Я.Т. Луцьк, О.П. Гук, О.І. Лах, Б.І. Стадник*. – Львів : Бескид Біт, 2006. – 559 с.
5. *Стадник Б.І. Пути стабилизации эксплуатационных характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров. ТС-6. Приборы и устройства контроля и регулирования технологических процессов / Б.И. Стадник, С.П. Яцишин, О.И. Лах*. – М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1979. – 41 с.
6. Булатов Н.К. *Термодинамика необратимых физико-химических процессов / Н.К. Булатов, А.Б. Лундин*. – М.: Химия, 1984. – 334 с.
7. *Стратонович Р.Л. Нелинейная неравновесная термодинамика / Р.Л. Стратонович*. – М.: Наука, 1985. – 479 с.
8. *Сб. докладов Международ. конф. «Метрология 2009»*. – Минск: БЕЛГИМ, 2009. – С. 24-31.

Надійшла до редколегії 17.07.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.М. Дорожовець, Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Б.И. Стадник, С.П. Яцишин

*На основе анализа расходимости характеристик и оценки изменений функции преобразования термоэлектрических преобразователей рассмотрено термометрический материал как элемент, формирующий информационный сигнал; изучено генезис инструментальной погрешности измерения и взаимосвязь ее основных составляющих.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический преобразователь, функция преобразования, погрешность измерения.

### THERMOELECTRIC TRANSDUCCERS INVESTIGATION OF INSTRUMENTATION ERROR

B.I. Stadnyk, S.P. Yatsyshyn

*Thermometric material is considered as information signal forming element, according to behavior analysis of thermoelectric transducers transformation function. It is investigated the instrumentation error genesis, including its main components.*

**Keywords:** thermoelectric transducer, transformation function, measurement error.