

$$\Delta_{\max} = N_{i\max}^0 - N_c^0, \quad (4)$$

$$\Delta_{\max} = N_{i\max}^0 - N_{cR}^0 \quad (5)$$

Результати розрахунків за (4) та (5) зведені в табл.3.

Таблиця 3

Значення максимального розкиду показів цифрового термометра без послідовно увімкненого опору та з послідовно увімкненим опором в нуль-термостаті, в паровому термостаті та за температури довкілля

| Максимальний розкид показів цифрового термометра | у нуль-термостаті | у паровому термостаті | за температури довкілля |
|--|--|--|--|
| без послідовно увімкненого опору | $\Delta_{\min}=-0,1^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,2^{\circ}\text{C}$ | $\Delta_{\min}=-0,3^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,4^{\circ}\text{C}$ | $\Delta_{\min}=-0,2^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,2^{\circ}\text{C}$ |
| з послідовно увімкненим опором | $\Delta_{\min}=-0,1^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,2^{\circ}\text{C}$ | $\Delta_{\min}=-0,3^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,4^{\circ}\text{C}$ | $\Delta_{\min}=-0,2^{\circ}\text{C}$ $\Delta_{\max}=+0,3^{\circ}\text{C}$ |

5. Висновки. Отже, дослідження показали, що перспективними як сенсори температури є серійні транзистори типу КТ3107Ж. Виконавши всі необхідні експериментальні дослідження та отримавши певні результати, можна зробити висновок, що в розробленому макеті цифрового термометра забезпечена практична незалежність показів від впливу опорів ліній зв'язку. Важливо також відзначити те, що розкид його показів від зразка до зразка не перевищив $+0,3\text{ K}$, причому для 60 % від всієї кількості транзисторів цього розкиду не було виявлено.

1. Albrecht H. I. *Transistors as thermometers and bolometers* // *Geof. Pure e appl.* 1957, v. 37, № 2, p. 191-196. 2. McNamara A.G. *Semiconductor diodes and transistors as electrical thermometers* // *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 33, 1962. – P. 330–320. 3. Степаненко И.П. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем.* – М., 1977. 4. Фогельсон И.Б. *Транзисторные термодатчики.* – М., 1972. 5. Патент 10540А. Україна, МКВ G01K7/22. 1996 р. 6. Патент 15274А. Україна, МКВ G01R19/00. 1997 р. 7. Столярчук П., Яцук В., Яцук Ю. *Унифікація параметрів напівпровідникових сенсорів // Вимірювальна техніка та метрологія, 2002. – № 9. – С. 65–69.* 8. Патент 23648А. Україна, МКВ G01K7/02. 9. Shwarts Yu.M., Borblik V.L., Kulich N.R., Venger E.F., Sokolov V.N. *Limiting characteristics of diode temperature sensors* // *Sensors and actuators*, 86(2000). 10. Василюк В.М. *Принципи побудови високоточних сенсорів на основі р–п-переходу // Вимірювальна техніка та метрологія, №53, 1998.*

УДК 536.55

С.П. Яцишин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

АЛГОРИТМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАНИЧНОДОПУСТИМОЇ ПОХИБКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ

© Яцишин С.П., 2006

Керуючись даними досліджень стабільності показів широкого класу перетворювачів температури, запропоновано способи оптимізації граничнодопустимої похибки, що

базуються на статистичній термодинаміці невірноважених процесів

According to the investigation of thermotransducers' stability it was proposed the ways of drift optimization, based upon the statistic thermodynamics of irreversible processes.

Вступ. Безперечною вважають актуальність проблеми підвищення точності вимірювання температури з допомогою термоелектричних, терморезистивних та термошумових перетворювачів температури (ПТ).

Постановка проблеми. Наявні у науково-технічній літературі [1–2] дані не дають змоги повною мірою передбачати їхній метрологічний ресурс роботи як за часом, так і за граничною межею вимірювання, зокрема за температурою. Відсутність знань щодо процесів дестабілізації властивостей термометричних матеріалів (далі – ТМ) стала основною причиною, що гальмує розвиток ПТ. Зокрема, не сформульовано вимог до ТМ, конструкцій, методів вимірювань тощо. Спроби вирішити всі поставлені завдання за допомогою емпіричного підбирання ТМ, перебирання варіантів конструктивного виконання ПТ, їхніх випробувань в умовах, що імітують робочі, а також формального комп'ютерного симулювання привели лише до часткових успіхів.

Мета роботи. Виробничі вимоги спричиняють необхідність розроблення та впровадження засад стабілізації та прогнозування функцій перетворення ПТ. Причому згідно з попередньо виконаними роботами [3–4] оптимальними за можливостями вважають статистично-термодинамічні засади та побудований за їхньою допомогою алгоритм [5] визначення граничнодопустимої похибки ПТ, призначених для роботи у напружених температурно-механічно-часових умовах.

Експериментальні дані. Поле експериментальних даних стосовно стабільності показів промислових термоелектричних ПТ вважається достатньо великим, свідченням чого є наявність значної кількості об'ємних видань [6–7], які, проте, не обмежують його подальшого зростання у зв'язку з розвитком науки та промислових технологій.

Дослідження електричних теплових шумів термометричних матеріалів (ТМ) термошумових ПТ – платини, нікелю, міді, вуглецю, константану, ніхрому, аморфних стопів та композитів на основі електропровідних окислів – у діапазоні 4,2...769 К підтвердили зв'язок термодинамічного стану і стабільності функцій перетворення термошумових ПТ. За похибки вимірювання потужності шумів, нижчої від 0,92 % при 4,2 К; 0,5 % при 77 К та 0,1 % при 273 К у діапазоні 4,2...77 К виявлено відхилення від лінійності функції перетворення для чутливих елементів, виконаних з нікелю, міді та платини. Отримані при 77 К відхилення уклалися на пряму залежності $\delta T \sim c / \chi \sqrt{ad}$, де a – розмір зерна; c – швидкість звуку; d – атомний розмір; χ – температуропровідність. У композитів і стопів, зокрема й аморфних, відхилення відсутні, що свідчило про термодинамічну стійкість їхнього метастабільного стану в області низьких температур.

Відхилення функції перетворення термошумових ПТ посилювалися при восьмигодинному вакуумному відпалі (373 і 473 К). Найістотніші відхилення виявлені у нікелю: вони сягали 35 % вимірюваної температури 4,2 К (для зразків, відпалених за 473 К). Унаслідок гартування (від температури 473 К зануренням чутливих елементів у рідкий азот, льодоводяну суміш і киплячу воду) зі швидкістю зміни температури відповідно 380; 150 і 80 К/с зменшувались відхилення функцій перетворення для нікелю (від 12,62 % до 8,52 %), для міді й платини. У стопів та композитів не зауважено впливу гартування на функції перетворення, що зумовлено особливостями їхньої структури.

Механічний чинник нестабільності електричних теплових шумів вивчено за допомогою лінійного розтягу ніхромового чутливого елемента. Функція впливу з коефіцієнтом 0,1 у області пластичності була пропорційною до лінійної деформації, вираженої у %.

Статистично-термодинамічні засади та розроблення алгоритму оптимізації гранично-допустимої похибки термоперетворювачів.

Фізико-механічна модель нестабільності функції перетворення [8], що ґрунтувалась на термодинаміці, вводячи як додаткову термодинамічну силу градієнт механічних напружень, надала можливість врахувати особливості технології виготовлення та практики застосування ПТ й приділити більше уваги структурному стану ТМ. Це зумовило вивчення ТМ як виділених термодинамічних систем, до яких була застосована статистична термодинаміка нерівноважних процесів.

Так, стани ТМ розділено на стаціонарні й нестаціонарні. Перші з них зберігали у часі набуті значення термодинамічних та похідних від них параметрів. Зміна у часі хоча б одного з термодинамічних параметрів системи виявлялась необхідною й достатньою умовою нестаціонарності.

Термоелектричні ПТ. ТМ зараховано до термічно розподілених, оскільки їм притаманний поздовжній градієнт температури. Термодинамічний стан можна вважати стаціонарним за умови тривалого перебування у полі температури. Стаціонарному нерівноваженому стану притаманне мінімальне виробництво ентропії S у часі t – $dS/dt \rightarrow 0$ – при перенесенні тепла, маси m й заряду q , що призводить до виникнення хемічної неоднорідності ТМ по довжині x термоелектродів – $\nabla_x \mu \neq 0$, де μ – хемічний потенціал. Інтегральна термо-ЕРС, за результатами розв’язання рівнянь перенесення, отримала, окрім відомої першої складової U_0 , додаткову другу складову ΔU [9]:

$$U(t) = \int_x \alpha_o [m(x)] \nabla_x T dx + \frac{1}{q} \int_x \nabla_x \mu dx = U_o + \Delta U \quad (1)$$

де α_o – коефіцієнт термо-ЕРС. Будь-яка дія на ТМ, здатна змінити хемічний потенціал останнього до μ_t , призводила до дрейфу інтегральної термо-ЕРС $U(t)$ на ΔU порівняно з вихідною термо-ЕРС U_0 , коли розподіл хемічного потенціалу у ТМ був рівномірним – $\nabla_x \mu = 0$; $\mu = \mu_0$:

$$\Delta U(t) = U(t) - U_0 = \frac{1}{q} \int_x \nabla_x \mu_t dx - \frac{1}{q} \int_x (\mu_t - \mu_0) \nabla_x T dx \quad (2)$$

ПТ характеризуються методичною похибкою вимірювання як наслідком невідповідності температури ТМ температурі довкілля. Переважно це зумовлено відведенням тепла по чутливому елементу та арматурі ПТ з поповненням втраченої енергії коштом довкілля, що призводило до виникнення ентропії та, як наслідок, зміни показів ПТ.

Відповідно до принципу Ле Шательє дифузійний потік ТМ мінімізував виробництво ентропії, оптимізуючи зміни функції перетворення. Спряження двох нерівноважених процесів перенесення – тепла й маси у ТМ з рівномірним у вихідному стані розподілом компонентів створювало перехресний ефект, який призводив до появи градієнта хемічного потенціалу. Досягнутий з часом стаціонарний нерівноважений стан з нерівномірним розподілом хемічного потенціалу по довжині термоелектродів характеризувався відсутністю сумарного потоку речовини. Його інтегральна термо-ЕРС становила:

$$U = \int_T \alpha(T) dT + \frac{Q}{q} \ln \frac{T_h}{T_c} = U_0 + \Delta U \quad (3)$$

де $T_h; T_c$ – відповідно температури гарячого (h) та холодного (c) злутів ТМ; Q – тепло перенесення атомів певних компонент. Тут друга складова – функція впливу, зумовлена тепломасоперенесенням. У монокристалічних вольфрамі й молібдені найактивнішими виявились розчинні домішки заліза й нікелю із значною міграційною здатністю вмістом заліза й нікелю $C_{Fe}; C_{Ni}$, що становив 0,001 мас.%. Функція впливу для монокристалічного вольфраму, відпаленого упродовж 100 годин за 2273 К,

обчислена за формулою:

$$\Delta U = \frac{1}{q} (Q_{Fe} C_{Fe} + Q_{Ni} C_{Ni}) \ln \frac{T_h}{T_c}, \quad (4)$$

становила 15 мкВ (при 1400 К), що відповідало експериментальним даним.

При гідростатичному деформуванні функція впливу зв'язана з термодинамічними параметрами об'єму V та тиску P рівнянням:

$$\Delta U = \frac{P}{qm} \int_{T_c}^{T_h} \int_{V_1}^{V_2} dV dT, \quad (5)$$

де індекси h ; c – відповідають гарячому та холодному кінцям термоелектродів. Цей вираз підтверджений експериментально для платинородій-платинової термопари ПР 10/0. Механічні напруження σ і деформації ε також проявляли вплив на термодинамічний стан ТМ через механічний ступінь вільності, зумовлюючи дію функції впливу на покази ПТ. За умов пружного лінійного деформування функція впливу була оборотною і становила:

$$\Delta U = \frac{\sigma}{2q} \int_{T_c}^{T_h} \int_{\sigma_c}^{\sigma_h} d\varepsilon dT. \quad (6)$$

Оскільки прирости модуля Юнга E й деформації ε зв'язані між собою: $\Delta E = -\frac{\sigma}{\varepsilon^2} \Delta \varepsilon$ ($\delta E = -\delta \varepsilon$, де δE ; $\delta \varepsilon$ – відповідно відносні зміни модуля Юнга та деформації), то функція впливу корелювала зі змінами модуля Юнга.

Враховано також необхідність введення поверхневої поправки до механічного коефіцієнта нестабільності функції перетворення, зумовленого поверхнево-зернограничним ступенем вільності. Для цього оцінено приріст поверхні залежно від поруватості ТМ металокерамічної технології. Виходили з того, що збільшення поверхні ΔS за рахунок певної кількості мікропор сферичної форми радіусу r зв'язане зі збільшенням об'єму цих пор на ΔV виразом: $\Delta S = 3 \Delta V / r$. У такому разі для 1 % середньої поруватості зразків, що відповідала експериментальним даним, і радіуса пор – 10 мкм їхня поверхня перевищувала зовнішню поверхню зразка приблизно у 50 разів, а для такої самої поруватості при дрібніших порах радіусом 1 мкм і 0,1 мкм перевищення поверхні пор над загальною поверхнею монолітного зразка становить відповідно 500 і 5000 разів.

Зміни функції перетворення термоелектричних ПТ у часі за рахунок поруватості ТМ можна описати третьою складовою загального значення нестабільності $\Delta U(t)$, названою поверхневою складовою нестабільності $\Delta U_\gamma(t)$:

$$\Delta U(t) = \Delta U_\mu(t) + \Delta U_\sigma(t) + \Delta U_\gamma(t) = 1/q \int_x \nabla_x \mu(t) dx + 1/k \int_x \nabla_x \sigma(t) dx + \gamma/p \int_x \nabla_x M(t) dx \quad (7)$$

де k – стала, зв'язана з деформацією; P – стала, пов'язана з поверхневим натягом γ . Тут $\Delta U_\mu(t)$; $\Delta U_\sigma(t)$ – відповідно складові нестабільності, зумовлені електрохімічними шумами під дією градієнта хемічного потенціалу $\mu(t)$ або електромеханічними шумами під дією градієнта механічних напружень $\sigma(t)$. Згідно з теорією консолідації металокерамічного матеріалу механічні напруження прикладають саме до пор, не викликаючи змін у моноліті, що дало змогу вивчити вплив змін густини при ущільненні на дрейф інтегральної термо-ЕРС ТМ через зміни зазначених складових

нестабільності [10].

Для пружного лінійного деформування, притаманного, наприклад, монокристалічному молібденовому дроту діаметром 0,4 мм, де прирости механічних напружень $d\sigma$ і модуля Юнга dE взаємозв'язані: $d\sigma = \epsilon dE$, зміни інтегральної термо-ЕРС визначені другою складовою:

$$\Delta U_{\sigma} = -\frac{\epsilon^2}{2q} \int_{T_c}^{T_h} \int_{E_c}^{E_h} dEdT \quad (8)$$

Для реального ТМ густиною ρ модуль Юнга $E(\rho) = E_0 \rho / \rho_0$ визначено через характеристики монолітного ТМ – $E_0; \rho_0$, а зміни інтегральної термо-ЕРС $\Delta U_{\sigma}'$ набувають множника ρ/ρ_0 . Це зумовило лінійну залежність між змінами термо-ЕРС і густини для металокерамічних зразків різного ступеня ущільнення. У процесі почергових деформувань/відпалів (у міру ущільнення ТМ) нерівномірності густини вирівнювались, а розкид термо-ЕРС – зменшувався. Оптимізація теплових чинників в процесі переробки штабки у дріт, коли здійснювався перехід від холодного до теплого деформування, дала змогу зменшити термоелектричну неоднорідність на 30–40 % – від ± 120 мкВ до ± 70 мкВ.

Термошумові ПТ. Їхні ТМ вважають термічно однорідними, а функція перетворення описана формулою Найквіста. У процесі виготовлення чутливого елемента відзначено [11] нагромадження надлишкової енергії внаслідок тривалого існування нестационарного невривноваженого термодинамічного стану в реперних точках “азоту” й “гелію”. Тут дисипативний потік ентропії

досягав $dS/dt = -\Delta S/\tau_{\Sigma}$ (ΔS – релаксаційна зміна ентропії; τ_{Σ} – сумарна стала релаксації, визначена ймовірністю різних процесів дисипації, що зумовили відхилення функції перетворення від лінійності).

Відновлення попередньо порушеної термодинамічної рівноваги мікрооб'єму в напрямку до стаціонарного невривноваженого стану відбувалось із залученням механізмів, зв'язаних з ефектичним та тепловим ступенями вільності. За кімнатних температур нагромаджена пружна енергія перетворювалась на енергію поверхні мікротріщин зі сталою релаксації τ_1 . Згідно з конкурентним механізмом вона могла бути відведена у вигляді тепла зі сталою часу τ_2 від місця нагромадження, причому відведення інтенсифікувалось з пониженням температури до “азотної” і нижче. Спільна дія двох згаданих механізмів дала змогу встановити функцію впливу термошумового ПТ у вигляді відносної похибки δT :

$$\delta T = \Delta T/T = \tau_2/\tau_1 = A(ad)^{1/2} c/\chi \quad (9)$$

Середнім температурам притаманний механізм релаксації, зумовлений рухом і розмноженням дислокацій зі сталою τ_3 . Нарешті, високим температурам, аж до температури топлення, відповідав механізм перенесення речовини зі сталою τ_4 за допомогою дифузії: насамперед, зернограничної, а згодом й об'ємної. Для визначення функції впливу у цих умовах розглянуто іншу пару конкуруючих механізмів – дифузії та утворення мікротріщин із дефектів розтягу. Чим вищий коефіцієнт самодифузії, тим більша, за цього значення механічних напружень, довжина утворених мікротріщин, що є наслідком підвищення пластичності. Введений критерій пластичності видозмінювався за збільшення температури до $\tau_4/\tau_1 \sim c/D$, де D – коефіцієнт дифузії, експоненційно залежний від температури. Це підтвердило експериментально відзначену за високих температур відсутність відхилень функції перетворення термошумових ПТ під дією будь-яких

функцій впливу, зокрема зумовлених деформуванням. Тоді нагромаджена в ТМ енергія істотно впливала на функцію перетворення, визначену “електротепловими” шумами, через “електромеханічні” та “механотеплові” шуми, релевантні за походженням стосовно “електротеплових” шумів. У результаті сформовано відповідні функції впливу стосовно функції перетворення термошумового ПТ [11]:

$$T = bP_{el} - bP_{mech}, \quad (10)$$

де $b = (dS/dt)^{-1}$ – стала функції перетворення, визначена швидкістю дисипації ентропії, а P_{mech} – потужність шумів, зумовлених деформуванням, релевантна стосовно потужності електричних теплових шумів P_{el} .

Термоелектричні та термошумові ПТ. У реальних умовах ПТ розміщені у нестационарному температурному полі, коли інтенсивність відведення тепла й дисипації ентропії – змінні у часі. Енергія, нагромаджена у ТМ, підвищувала швидкість виробництва ентропії, що призводило через виникнення термоструктурних напружень, зокрема й за межами пружності, і до посилення функцій впливу. Тобто, нестационарному режиму експлуатації притаманне істотне підсилення механічно-поверхневого чи хемічного коефіцієнтів нестабільності завдяки температурному коефіцієнту K_3 , що дорівнює 1 у стаціонарному режимі та значно більший від 1 у нестационарному режимі.

Посилення швидкості виробництва ентропії за декількох циклів вимірювання, зумовлене нагромадженням інтенсивної дії термодинамічних сил і потоків і посиленням функцій впливу через сталу b , визначалось за допомогою коефіцієнта K_3 :

$$K_3 = 1 + \frac{T_{max} t_{in}}{\Delta T_{met} t} \left(\frac{T_{max}}{T_{min}} - 1 \right) N^i, \quad (11)$$

де $T_{max}; T_{min}$ – відповідно максимальна і мінімальна температури циклу; ΔT_{met} – методична похибка ПТ; t_{in} – стала теплової інерції; t – тривалість стаціонарного режиму до моменту вимірювання; i – показник степеня, дорівнює 0...1; N – кількість термоциклів (їхній вплив на K_3 складний і залежить від збігу градієнтів термоструктурних напружень і температури).

Використовуючи статистично-термодинамічні засади, визначено основну похибку, зумовлену нестабільністю функції перетворення ПТ засобів електротермометрії, уведенням сумарного коефіцієнта нестабільності K_{Σ} . Він являє собою інструментальну похибку у вигляді граничного значення відносної похибки певного типу ПТ й виражався у вигляді комбінації трьох безрозмірних коефіцієнтів нестабільності. Кожному з них притаманне власне походження й механізм дії, а також результуюче значення, залежно від особливостей виготовлення і експлуатації ПТ. Наведений вираз отримано як функцію посереднього впливу різних ступенів вільності основного рівняння термодинаміки на функцію перетворення, що описана електротепловими шумами ПТ:

$$K_{\Sigma} = (K_1 + K_2) K_3, \quad (12)$$

де K_1, K_2, K_3 – відповідно хемічний, механічно-поверхневий і температурний коефіцієнти нестабільності функції перетворення, зумовлені відповідними функціями впливу.

Добуток температури і дисипативного потоку ентропії через межі розділу ТМ визначав інтенсивність термодинамічних сил та потоків. Сумарне значення добутку останніх характеризувало нагромаджувані ефекти змін функцій перетворення через температурний коефіцієнт нестабільності

K_3 . Звідси, чим менше відведення тепла вздовж чутливого елемента й, відповідно, чим менша методична похибка ПТ, тим менші притаманні йому нагромаджувані у часі зміни функції перетворення, виражені згаданим коефіцієнтом K_3 .

Гартування та подальша температурна витримка впливали на функцію перетворення через зсув термодинамічного стану ТМ, залежно від процесів, що відбувались. При гартуванні дисипативний потік ентропії стрімко зростає внаслідок зміни температури теплового потоку W : $T dS/dt = -W \Delta T / T^2$ на ΔT . Коли ТМ не встигав врівноважуватися до моменту повторного термоциклу, дисипативний потік ентропії у ньому посилювався, причому пропорційно до кількості термоциклів n . Це було підтверджено експериментально дією термоударів: $\Delta U \sim \Delta T; n$ на зразки ПТ типу ТВР-301-01.

Засади алгоритмічної оптимізації функції перетворення. Для ПТ засобів електротермометрії розроблено вказані засади, враховуючи вплив різних видів термометричних шумів ТМ (через функції впливу) на функції перетворення, що дало змогу реалізувати принципи та способи побудови ПТ з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Визначення базових конструкцій і технології виготовлення ПТ дало змогу усунути хемічну взаємодію ТМ з іншими матеріалами, значно зменшивши сумарний коефіцієнт нестабільності. Зокрема, створено ПТ типу ТМР-0186 для використання у вакуумі та інертних газах за 300...2400 К. Для ПТ (типу ТВММ-002-01 з інверсованою при 1100 К характеристикою) знижено механічний коефіцієнт K_2 внаслідок заміни полікристалічного молібдену на монокристалічний.

Зниження рівня електромеханохемічних шумів у ТМ сприяло підвищенню метрологічної та механічної надійностей ПТ [12]. Нерозривність конструктивно-технологічно-експлуатаційного підходу щодо розроблення, виготовлення і експлуатації високонадійних ТП дала змогу запропонувати

базову конструкцію кабельного ПТ (тип ТХА-1388) з параметрами надійності, підвищеними до $\lambda_{\Sigma} = 0,959$ за 25000 годин експлуатації.

Найвищою стабільністю функції перетворення характеризувались термоелектричні й термошумові ПТ з ТМ із аморфних металевих стопів – відхилень не виявлено за похибки 0,1 %, оскільки внаслідок пружного деформування механічний коефіцієнт $K_2 \rightarrow 0$, а хемічний коефіцієнт K_1 був незначним за умов експлуатації за порівняно низьких температур. Для порівняння, у полікристалічних ТМ відхилення, зумовлені істотним механічним коефіцієнтом – результат мікропластичного деформування, становили 10%.

Науково-технічний поступ загострив вимоги щодо експлуатації ПТ в умовах циклічних температурно-механічних навантажень, а також слабких електромагнетних полів, не спроможних безпосередньо діяти на носії заряду. Непряма дія останніх на функцію перетворення визначилась механічно-поверхневим коефіцієнтом нестабільності K_2 , адитивним стосовно хемічного коефіцієнта K_1 . За високих температур посилювався “електрохемічнотепловий” характер шумів як результат нагромадженого з часом дії хемічного ступеня вільності.

З часом, за відсутності додаткових збурень, нестаціонарний стан ТМ релаксував експоненційно у напрямку до стаціонарного неврівноваженого стану, де дисипативний потік ентропії ставав мінімально можливим. Зміна функцій перетворення ПТ у часі підлягала прогнозуванню; функції стабілізувались: для термошумових ПТ на нульовому рівні внаслідок мінімізації всіх видів шумів при переході до стаціонарного неврівноваженого стану, а для термоелектричних ПТ – на максимальному рівні внаслідок ефекту нагромадження при встановленні того самого термодинамічного стану.

Висновки

1. Запропоновано, обґрунтовано та розвинуто статистико-термодинамічні уявлення стосовно стабілізації функції перетворення термоелектричних і термошумових перетворювачів температури з чутливими елементами з аморфних, моно- і полікристалічних термометричних матеріалів. Це дало змогу врахувати вплив деформування (аж до руйнування), поруватості, домішок і присадок, включаючи зміни їхнього стану й розподілу, а також низки інших чинників в процесі спільного, часто конкурентного впливу, й описати функції впливу перетворювачів, зумовлені дією конкретних ступенів вільності.

2. Запропоновано критерій нестабільності функції перетворення, який застосовано для дослідження, стабілізації, прогнозування й коректування згаданої функції перетворення різного класу перетворювачів у різноманітних умовах експлуатації.

1. Стаднык Б.И., Яцишин С.П., Лах В.И. Пути стабилизации эксплуатационных характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров. Тс-6. Приборы и устройства для контроля и регулирования технологических процессов. – М., 1979. 2. Самсонов Г.В., Стаднык Б.И и др. Температурные измерения. Справочник. – Киев–Львов, 1986.. 3. Jacyzyn S., Stadnyk B., Lusyк J. i in. Efekty szumowe w termometrii // Pomiarы, automatyka, kontrola. – 2003. – № 7/8. – S.15-17. 4. Lutsyk Ya.T., Stadnyk B.I., Yatsyshyn S.P. Drift of thermoelectric properties and electromechanical noises in thermoelectric converters // Thermoelectricity. – 2004. – № 2. – P.70–75. 5. Стадник Б.И., Луцик Я.Т., Скоропад П.И., Яцишин С.П. Фізико-хімічні основи термометричних матеріалів і статистично-термодинамічний алгоритм проектування термоперетворювачів засобів електротермометрії // Вісник Черкаського національного університету. – № 2. – 2004. – С.27–28. 6. Самсонов Г.В., Стаднык Б.И и др. Температурные измерения. Справочник. – Киев–Львов., 1986. 7. Стадник Б.И., Куритнык И.П. Материалы высокотемпературной термометрии. – М., 1990. 8. Федик И.И., Стаднык Б.И. и др. Термо-э.д.с. и механические напряжения // Теплофизика высоких температур. Т.32. – 1978. – С.376-382. 9. Новиков И.И., Стаднык Б.И., Яцишин С.П. и др. О феноменологической модели нестабильности интегральной термо-э.д.с. термопар // Известия АН СССР. Сер. Металлы. – 1990. – № 3. – С.211–214. 10. Стадник Б.И., Яцишин С.П. Електромеханохімічні шуми термометричних матеріалів // Термоелектрика. – 2003. – №1. – С.56–64. 11. Стаднык Б.И., Яцишин С.П., Колодий З.А. Отклонение тепловых шумов в материалах при низких температурах от равновесных значений // Mereni teplot v priemyslu. – 1 dil. – Praha: CSVTS, Dum Techniky. – 1989. – С.102–112. 12. Guk O.P., Stadnyk B.I., Yatsyshyn S.P. Long life thermoelectric temperature converters. Reliability problems // Thermoelectricity. – 2004. – №2. – P.75–82.

УДК 681.325

А.Й. Наконечний, І.Я. Тишик

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматики та телемеханіки

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ’ЄКТІВ НА ОСНОВІ МАЛОХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ

© Наконечний А.Й., Тишик І.Я., 2006