

6. Громик А. П. Температурні поля в кусково-однорідних просторових середовищах / А. П. Громик, І. М. Конет. — Кам'янець-Подільський : Абетка-Світ, 2011. — 200 с.
7. Конет І. М. Гіперболічні крайові задачі математичної фізики в кусково-однорідних просторових середовищах / І. М. Конет — Кам'янець-Подільський : Абетка-Світ, 2013. — 120 с.
8. Конет І. М. Гіперболічні крайові задачі в напівобмежених кусково-однорідних циліндрах / І. М. Конет // Волинський математичний вісник. Серія прикладна математика. — 2012. — Вип. 9(18). — С. 117–134.
9. Шилов Г. Е. Математический анализ. Второй специальный курс / Г. Е. Шилов. — М. : Наука, 1965. — 328 с.
10. Гельфанд И. М. Некоторые вопросы теории дифференциальных уравнений / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилов. — М. : Физматгиз, 1958. — 247 с.

The method of integral transforms in combination with the method of main solutions built an exact analytical solution of a mathematical model of oscillatory processes (hyperbolic boundary value problem) in semi-confined wedge-shaped piecewise homogeneous solid cylinder.

Key words: *modelling, oscillating, hyperbolic equation, initial and boundary conditions, conditions of conjugation, integral transformation, the influence function, Green's function.*

Отримано: 19.03.2013

УДК 519.2,536.532

В. О. Єрмоєнко, канд. фіз.-мат. наук,

О. В. Кочан, канд. техн. наук

Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль

ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ДРЕЙФУ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕРМОПАР

Розглянуто проблеми, що виникають при моделюванні наслідків процесу деградації електродів термопар — похибки часового дрейфу функції перетворення та похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності термоелектродів. Показано, що, при використанні класичного методу найменших квадратів (МНК), отримані при умові рівності нулю вільного члена оцінки моделей є зміщеними. Оцінки параметрів моделей, в яких вільний член не рівний нулю володіють всіма властивостями МНК-оцінок, але вони не мають фізичного змісту.

Ключові слова: *метод найменших квадратів, МНК-оцінки параметрів моделі, термопари, похибка від часового дрейфу, похибка від набуто термоелектричної неоднорідності.*

Вступ. Для вимірювання температури, особливо у діапазоні 500–1500 °С, у промисловості та наукових дослідженнях найбільш вживаними давачами є термоелектричні термометри (ТТ), чутливим елемен-

нтом яких є термопара [1; 2]. Їх популярність викликана широким діапазоном вимірюваних температур, стійкістю до механічних впливів, відносною простотою, тощо.

Однак ТТ мають доволі великі похибки вимірювання. Один з найбільш популярних типів — хромель-алюмель (ХА) — має початкові відхилення функції перетворення (ФП) від номінальної від 4 °С до 8 °С [3; 4] при вимірюванні температури від 300 °С до 1100 °С.

Крім того, під час тривалої експлуатації при високих температурах електроди термопар деградують через окислення, дифузію, зміни хімічного складу та кристалографічного стану тощо. При цьому слід відзначити, що степінь деградації залежить як від часу експлуатації ТТ, так і від температури експлуатації кожної ділянки термопари, що входить в ТТ. Тому, згідно [5], деградація термоелектродів веде до появи двох додаткових похибок вимірювання температури, які по різному проявляють себе:

- похибки дрейфу ФП ТТ, що проявляється як поступова зміна генерованої термо-е.р.с. за час його експлуатації. Згідно [6; 7], для ТТ типу ХА за 1000 годин експлуатації при вимірюванні температури 800 °С, дрейф ФП сягає 8 °С;
- похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації ТТ неоднорідності термоелектродів, що проявляється як залежність генерованої термо-е.р.с. не тільки від різниці температур робочого і вільних кінців, а і від профілю температурного поля вздовж термоелектродів. Згідно [8—10], для ТТ типу ХА за 1000 годин експлуатації при вимірюванні температури 800 °С і великих змінах профілю температурного поля, похибка від набутої неоднорідності може досягати 10-11 °С.

Такими похибками дуже часто не можна нехтувати. Тому багато наукових праць було присвячено як покращенню самих ТТ (створенню стабільніших матеріалів термоелектродів [11—13], зменшенню їх початкової неоднорідності [14; 15]), так і корекції перелічених складових похибки ТТ — від початкового розкиду [16], від часового дрейфу шляхом повірки на місці експлуатації [7; 17], калібрування [18—20] та використання ефекту Пельтьє [21; 22], а також від набутої неоднорідності шляхом перерахунку похибки ТТ з одного профілю температурного поля в інше [23; 24], корекції впливу похибки неоднорідності на результат вимірювання температури [25] та створенню умов, коли похибка неоднорідності не може себе проявити [26]. Також розроблено методи корекції похибки шляхом побудови індивідуальних математичних моделей дрейфу в процесі експлуатації за результатами повірки ТТ на місці експлуатації або калібрування [27—29].

Для вибору методу, що відповідає заданим умовам експлуатації ТТ та забезпечує максимальну точність результату вимірювання тем-

ператури, необхідно провести порівняльні дослідження різних методів. Слід відзначити, що лише експериментальні дослідження не дають змоги детального дослідження різних методів:

- 1) вони мають дуже високу трудомісткість та великий час проведення, тому їх об'єми принципово обмежені;
- 2) при їх проведенні буде визначена похибка лише в обмеженій кількості конкретних варіантів прояву деградації електродів ТТ через те, що в деяких заданих умовах проведення експериментальних досліджень не можуть проявити себе всі можливі варіанти впливу деградації на генеровану термо-е.р.с.

Більш універсальними є дослідження методом імітаційного моделювання, де обмеження на кількість реалізацій практично не існують, а досліджувані варіанти впливу деградації на генеровану термо-е.р.с. обмежуються тільки можливістю їх існування згідно фізичних і хімічних законів. Такі дослідження перелічених методів підвищення точності проводилися [30; 31], але вони були не повними та не імітували процес експлуатації ТТ. Тому їх результати мають обмежене значення.

Однак для проведення повномасштабних досліджень як відомих, так і нових методів підвищення точності ТТ, необхідні відповідні моделі, що описують часовий дрейф та наростання похибки від набутої неоднорідності електродів ТТ. Ці моделі повинні давати можливість імітувати процес експлуатації ТТ, із відомою точністю відображати результати експериментальних досліджень прояву деградаційних процесів у процесі експлуатації ТТ, а також бути зручними в користуванні під час підготовки та проведення імітаційного експерименту. Відомі моделі [22; 25—27; 29] таких властивостей не мають. Тому розроблення математичної моделі, яка виконує приведені вище вимоги, залишається актуальною задачею.

Така математична модель, з однієї сторони, повинна опиратися на дані експериментального дослідження проявів деградації електродів ТТ, з іншої – оцінювати такі дані з точки зору їх придатності для побудови самої моделі. Як показав аналіз, для виконання такої суперечливої задачі найкраще пристосовані методи регресійного аналізу. Регресійний аналіз дозволяє отримати не тільки математичні залежності, що описують зміни ФП ТТ, а і оцінити статистичну значущість цих залежностей в цілому, а також їх окремих коефіцієнтів. Така статистична оцінка потрібна через стохастичний характер процесу дрейфу.

Метою статті є вивчення можливостей застосуванні регресійного аналізу при побудові моделі дрейфу функції перетворення термоелектричних термометрів та виявлення проблем, які виникають при цьому.

Фізичні основи побудова регресійних моделей похибок електродів ТТ. В основу моделі слід покласти те, що похибки від часового дрейфу ФП електродів ТТ і від набутої в процесі тривалої експлуатації

термоелектричної неоднорідності електродів ТТ є проявами одного і того ж процесу — деградації термоелектродів. Тому для заданого часу і температури експлуатації максимальні значення похибок від неоднорідності та дрейфу рівні [перша око]. Таким чином модель обох похибок може бути описана одними і тими ж залежностями. Крім того, для побудови такої моделі можна використати результати відомих експериментальних досліджень часового дрейфу. Тоді модель похибки від набутої неоднорідності електродів ТТ можна отримати без проведення додаткових експериментальних досліджень (тим більше, що дослідження саме похибки неоднорідності у відомих джерелах не описані).

Для побудови регресійної моделі [32—33] дрейфу ФП електродів використаємо результати експериментальних досліджень часового дрейфу, подані у [34], як найбільш повні. Вони дозволяють побудувати як залежність зміни ФП ТТ від часу експлуатації (похибка від часового дрейфу ФП ТТ), так і зміни ФП ТТ від зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів (похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності). Ці моделі є мінімальним набором, що дає змогу досліджувати методом імітаційного моделювання похибки вимірювання температури різними засобами і системами в процесі життєвого циклу ТТ.

Однак масив експериментальних даних, представлених у [34], все таки доволі обмежений (мала кількість реалізацій), а методика експерименту не достатньо чітко описана. Тому необхідне спеціальне дослідження та статистичне оцінювання параметрів отриманої регресійної моделі часового дрейфу ФП електродів ТТ для того, щоби потім оцінити отриману якість моделі, зокрема, довірчі інтервали [32—33].

Для побудови регресійної моделі дрейфу було обрано масив результатів вимірювань значень дрейфу ФП термоелектрода хромель діаметром 0,7 мм від часу експлуатації при заданій температурі [34]. Характер точок кривої дає підстави побудувати поліноміальну регресію, в якій як незалежну змінну τ (факторна ознака, регресор) обирається для моделі похибки від часового дрейфу ФП ТТ, час експлуатації, або, для моделі похибки від набутої термоелектричної неоднорідності, температура діапазону (в межах якої може мінятися температура термоелектродів ТТ при зміні профілю температурного поля).

Як залежну (результативну) змінну Y вибираємо відхилення значення генерованої ТТ термoe.p.c. від початкової. Як було вказано раніше, початкові відхилення ФП ТТ від номінальної досить великі, їх причиною є недосконала технологія виготовлення термоелектродного дроту, вони визначаються при первинній повірці та коригуються на початку експлуатації. Процес деградації термоелектродів в процесі експлуатації визнається в основному умовами експлуатації ТТ і залежить від великого

числа впливаючих величин [35]. Тому похибки від початкового відхилення ФП ТТ від номінальної та від деградації термоелектродів є некоорельованими. Таким чином, результатом корекції на початку експлуатації є рівність нулю похибки ТТ на початку експлуатації для обох моделей (точніше їх похибка на початку експлуатації визначається лише похибкою їх первинної повірки, яка нам не відома).

Важливо також додати, що регресійна модель працює лише за умов, коли факторна ознака відома без похибки, а похибка наявна лише для результативної ознаки. Для даного випадку це відповідає дійсності лише приблизно. Але відхилення часу визначення термо-е.р.с. термоелектрода в межах однієї години при часі експлуатації 1000...10000 годин становить 0,1...0,01%, чим можна нехтувати. Відхилення дійсної температури діапазону від номінальної при експериментальних дослідженнях не перевищують 4...5 °С, а функції похибки як від часового дрейфу ФП ТТ, так і від набутої термоелектричної неоднорідності, є гладкими, не мають розривів та стрибків, тому відхиленнями вимірних змін від дійсних також можна нехтувати як похибками другої степені малості.

Побудова регресійної моделі часового дрейфу ФП електродів ТТ. На рис. 1 представлено графіки залежності часового дрейфу ФП електродів хромель та алюмель для температури експлуатації 800 °С отримані в результаті експериментальних досліджень [34]. Як видно з графіків, загальний вид рівняння регресії для хромелю в цьому випадку близький до функцій виду $\hat{y} = \sqrt[n]{x}$.

Для алюмелью можна використати аналогічний вид рівняння регресії або поліном третього степеня.

Було опрацьовано експериментальні дані [34] та отримано моделі часового дрейфу електродів термопар, які мають найменшу суму квадратів залишків (збурень) серед інших кривих. У табл. 1 представлено регресійні моделі часового дрейфу електродів термопар.

Як видно з таблиці 1, всі без винятку моделі без вільного члена ($a_0 = 0$, рядки 4, 5 табл. 1) обох термоелектродів мають одну і ту ж саму особливість, а саме, сума залишків (збурень) моделі не дорівнює нулю (рядок 6). А умова $a_0 = 0$ є необхідною для того, щоби дана модель була математичним сподіванням процесу, отже адекватно описувала процес часового дрейфу термоелектродів. В усіх регресійних моделях, які досліджуються класичним методом найменших квадратів (МНК) або його узагальненнями, автори явно або неявно постулюють відмінність від нуля вільного члена [32, 33, 36, 37]. Тобто отримана регресійна модель не може бути застосована для опису процесу дрейфу, оскільки оцінки її коефіцієнтів є зміщеними [36, 37]. Крім того, занижується дисперсія оцінок коефіцієнтів моделі, що, в свою чергу, веде до спотворення їх довірчих інтервалів. В такому

випадку кореляційне відношення (коефіцієнт детермінації R^2 [36; 37]) вже не служить адекватною характеристикою якості моделі.

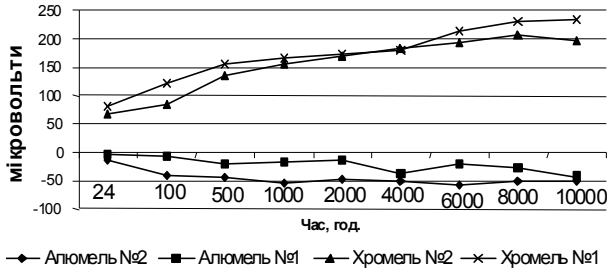


Рис. 1. Залежності часового дрейфу ФП електродів ТТ

Вказаний недолік відсутній у моделях, де вільний член присутній ($a_0 \neq 0$, рядки 7, 8 табл. 1). Однак, як було сказано вище, такі моделі не мають фізичного змісту (суперечать умові рівності нулю дрейфу у початковий момент часу) і у табл. 1 приведені лише для того, щоб переконатися у принциповій можливості побудови кривої, яка задовольняє умову рівності нулю суми залишків регресії (рядок 9) та для порівняння. Як видно з табл. 1, в таких моделях сума залишків (збурень) справді рівна нулю.

Побудова регресійної моделі залежності термо-е.р.с. електродів ТТ від температури діапазону. На рис. 2 представлено графіки залежності похибки ТТ від температури діапазону при сталій температурі експлуатації (рядок 2) для часу експлуатації 1000 годин отримані в результаті експериментальних досліджень [34]. Як видно з графіків, загальний вид рівняння регресії для хромелю та алюмелю в цьому випадку близький до функцій виду $\hat{y} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x^i$, де $n = 2, 3$.

Таблиця 1

Регресійні моделі часового дрейфу електродів терморпар

№		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №1
1	Час експлуатації	Від 0 до 10000 год.	Від 0 до 10000 год.	Від 0 до 10000 год.	Від 0 до 10000 год.
2	Темпер. експлуатації	800 °С	800 °С	800 °С	800 °С
3	Темпер. діапаз.	800 °С	800 °С	800 °С	800 °С
4	Вид моделі	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \tau$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \tau$	$\hat{y} = a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$	$\hat{y} = a_1 \tau + a_2 \tau^2 + a_3 \tau^3$

Продовження таблиці 1

5	Коефіцієнти моделі	$a_1 = 29,1$ $a_2 = -0,0067$	$a_1 = 26,057$ $a_2 = -0,0059$	$a_1 = -3,09543$ $a_2 = -0,2707$	$a_1 = -0,01851$ $a_2 = 4 \cdot 10^{-06}$ $a_3 = -2 \cdot 10^{-10}$
6	Сума похибок, мкВ	-0,38763	-2,7122023	0,54585	-13,96429454
7	Вид моделі	$\hat{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \tau$	$\hat{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \tau$	$\hat{y} = a_0 + a_1 \sqrt[4]{\tau} + a_2 \sqrt{\tau}$	$\hat{y} = a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2 + a_3 \tau^3$
8	Коефіцієнти моделі	$a_0 = -0,776$ $a_1 = 29,275$ $a_2 = -0,0068$	$a_0 = 5,4286$ $a_1 = 24,878$ $a_2 = -0,00516$	$a_0 = 8,193682$ $a_1 = -7,82527$ $a_2 = -0,19666$	$a_0 = -5,83364$ $a_1 = -0,01312$ $a_2 = 2,6 \cdot 10^{-6}$ $a_3 = -2 \cdot 10^{-10}$
9	Сума похибок	Менше 10^{-12} мкВ	Менше 10^{-13} мкВ	Менше 10^{-12} мкВ	Менше 10^{-13} мкВ

Аналогічно до табл. 1, опрацьовано експериментальні дані [34] та отримано моделі часового дрейфу електродів термопар, які мають найменшу суму квадратів залишків серед інших кривих. У табл. 2 подано регресійні моделі залежності похибки ТТ від температури діапазону різного виду (рядки 4, 5 для $n = 2$, рядки 10, 11 для $n = 3$).

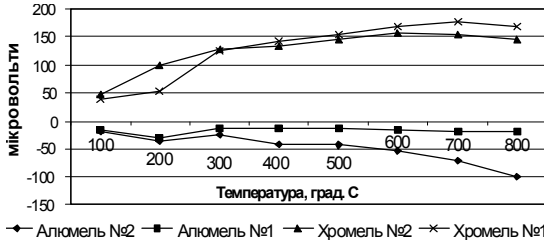


Рис. 2. Залежності похибки ТТ від температури діапазону

В табл. 2, аналогічно до табл. 1, чітко простежується закономірність – у випадку відсутності вільного члена ($a_0 = 0$, рядки 4, 5 та 10, 11 табл. 2) сума залишків (збурень) моделі не дорівнює нулю (рядки 6 і 12 табл. 2). Як було показано при аналізі табл. 1, це не дозволяє використовувати метод МНК для дослідження даної моделі для адекватного процесу опису похибки термоелектродів ТТ.

Моделі з вільним членом ($a_0 \neq 0$, рядки 7, 8 та 13, 14 табл. 2) приведені для порівняння — в них сума залишків (збурень) рівна нулю (див. рядки 9 і 15 табл. 2).

Висновки. Отримані в статті результати дослідження показали наявність суттєвої суперечності між математичними моделями похибок від часового дрейфу ФП ТТ та від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності його електродів і принципами обчислення цих похибок під час експериментальних досліджень. Використання МНК дає коректні результати тільки для моделей із $a_0 \neq 0$, хоча метод обчислення значень змін генерованої ТТ термо-е.р.с. при обробленні результатів експериментальних досліджень виключає наявність вільного члена (він мусить бути рівним нулю). Хоча в деяких випадках значення вільного члена мале (наприклад, часовий дрейф електрода Хромель №1, табл. 1) і ним можна було би нехтувати, однак в більшості випадків це значення співмірне з отриманими при експериментальних дослідженнях змінами генерованої ТТ термо-е.р.с. Отже така модель не прийнятна, у ній присутній параметр, позбавлений фізичного змісту.

Таблиця 2

*Регресійні моделі дрейфу електродів ТТ
по діапазону вимірювання температури*

		Хромель №1	Хромель №2	Алюмель №1	Алюмель №2
1	Час експлуат.	1000 год.	1000 год.	1000 год.	1000 год.
2	Темпер. експлуат.	800 °С	800 °С	800 °С	800 °С
3	Темпер. діапаз.	Від 0 до 800 °С	Від 0 до 800 °С	Від 0 до 800 °С	Від 0 до 800 °С
4	Вид моделі	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2$
5	Коефіц. моделі	$a_1 = 0,4603$ $a_2 = -0,0003$	$a_1 = 0,526476$ $a_2 = -0,00044$	$a_1 = -0,07483$ $a_2 = 7 \cdot 10^{-05}$	$a_1 = -0,08755$ $a_2 = -3 \cdot 10^{-05}$
6	Сума похибок	11,79339 мкВ	-5,41435 мкВ	13,93251 мкВ	15,89955 мкВ
7	Вид моделі	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2$
8	Коефіц. моделі	$a_0 = -22,955$ $a_1 = 0,56771$ $a_2 = -0,00041$	$a_0 = 10,53864$ $a_1 = 0,477166$ $a_2 = -0,00039$	$a_0 = -27,1186$ $a_1 = 0,052058$ $a_2 = -5 \cdot 10^{-05}$	$a_0 = -30,947$ $a_1 = 0,05725$ $a_2 = -0,0002$
9	Сума похибок	Менше 10-12 мкВ	0	Менше 10-13 мкВ	Менше 10-13 мкВ
10	Вид моделі	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$

Продовження таблиці 2

11	Коефіц. моделі	$a_1 = 0,36423$ $a_2 = 7 \cdot 10^{-05}$ $a_3 = -0,00041$	$a_1 = 0,609592$ $a_2 = -0,00077$ $a_3 = 3 \cdot 10^{-07}$	$a_1 = -0,19275$ $a_2 = 0,000537$ $a_3 = -4 \cdot 10^{-07}$	$a_1 = -0,2474$ $a_2 = 0,0006$ $a_3 = -5 \cdot 10^{-07}$
12	Сума похибок	-3,17164 мкВ	2,044359 мкВ	-3,34995 мкВ	1,555334 мкВ
13	Вид моделі	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$\hat{y} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$
14	Коефіц. моделі	$a_0 = -19,2564$ $a_1 = 0,5292$ $a_2 = -0,00031$ $a_3 = -7 \cdot 10^{-08}$	$a_0 = -12,4122$ $a_1 = 0,715948$ $a_2 = -0,00101$ $a_3 = 4 \cdot 10^{-07}$	$a_0 = -20,339$ $a_1 = -0,01848$ $a_2 = 0,00013$ $a_3 = 1 \cdot 10^{-07}$	$a_0 = -9,4431$ $a_1 = -0,1665$ $a_2 = 0,000414$ $a_3 = 4 \cdot 10^{-07}$
15	Сума похибок	Менше 10-12 мкВ	Менше 10-12 мкВ	Менше 10-12 мкВ	Менше 10-12 мкВ

Таку суперечність не можна пояснити похибками вимірювання, адже рівність нулю вільного члена визначається не в результаті вимірювання, а в результаті наступного оброблення даних вимірювання. Наявність інструментальної або методичної похибки під час вимірювання генерованої ТТ термо-е.р.с. не може впливати на результат віднімання вимірюної початкової термо-е.р.с. від неї ж. Наявність похибок вимірювання може впливати на похибку регресійної моделі при не нульових значеннях аргументів. Тим більше, що в отриманих регресійних моделях (при заданому нульовому значенні вільного члена) також сума залишків (збурень) не рівна нулю.

Цю суперечність також не можна пояснити похибками обчислень, оскільки, по перше, результати досліджень регресійних моделей проведено у всіх версіях програмного комплексу Microsoft Excel (97, 2000, 2002, 2003, 2007, 2010, 2013), а також в програмі Стадія 6.3. Отримані результати ідентичні.

Описана ситуація, як видно з табл. 1 і 2, носить не поодинокий характер. Тому виявлені протиріччя вказують на принципові проблеми, які виникають при дослідженні регресійних моделей класичним МНК за результатами деяких експериментальних досліджень. Ці проблеми вимагають вирішення.

Список використаних джерел:

1. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. Fourth Edition. Revision of Special Technical Publication (STP) 470B ASTM Publication Code No. (PCN). — 1993. — 312 p.
2. Вимірювання температури: теорія та практика / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. — Львів : Бескид Біт, 2006. — 560 с.

3. International standard Thermocouples : IEC 584-2. – Geneve, 1982. — (Міжнародний стандарт).
4. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94 . — [Чинний від 1986-04-01]. — К. : Держстандарт України, 1994. — (Національний стандарт України).
5. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / О. В. Кочан, Р. В. Кочан, В. Я. Яскілка, Н. М. Васильків // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. — 2007. — №1. — С. 122–129.
6. Приборы для измерения температуры контактным способом / [под ред. Р. В. Бычковского]. — Львов : Вища школа, 1979. — 208 с.
7. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / L. Kortvelyessy. — Vulkan-Verlag, Essen, 1981. — 498 s.
8. Southworth D. J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths / D. J. Southworth. — Handbook of Isothermal Corporation Limited, 1999.
9. Васильків Н. Дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури неоднорідними термопарами / Н. Васильків, О. Кочан // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. — 2010. — №2. — С. 146–154.
10. Термопары (термоэлектрические преобразователи).— Режим доступу: http://temperatures.ru/pages/termoelektricheskie_termometry.
11. Скоропад П.І. Термоперетворювачі з металевих шкел – концепція, нормалізація термоструктурних характеристик, реалізація : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / П. І. Скоропад. — Львів, 2003. — 37 с.
12. Яцишин С. П. Розвиток теоретичних основ та створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термоперетворювачів на базі статистичної термодинаміки : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / С. П. Яцишин. — Львів, 2008. — 37 с.
13. Ромака В. А. Фізичні засади розроблення термоелектричних елементів на основі інтерметалічних напівпровідників: автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / В. А. Ромака. — Львів, 2008. — 36 с.
14. Бубела Т.З. Достандартизаційні дослідження методу контролю якості термоелектродного дроту : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Т. З. Бубела. — Львів, 2003. — 147 с.
15. Столярчук В. П. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин». — Львів, 2012.
16. А.с. № 352152 СССР. Устройство для измерения температуры / А. А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская, В.А. Кочан.
17. Каржавин В. А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / В. А. Каржавин. — Обнинск, 2010. — 147 с.
18. United States Patent 3.499.340. 73-1. G01K 15/00. Self calibrating temperature sensing proube and proube — indicator combination / Alf Hundves, G. Henz. — Buschfort, 1968.
19. Саченко А. А. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами / А. А. Саченко, В. Ю. Мильченко, В. В. Кочан. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.

20. Применение самокалибрующихся термоэлементов с реперным материалом при температурах 500-650 С в парогенераторах / Ф. Бернхард, Д. Богун, С. Августин, Х. Маммен, А. Донин // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2003. — № 63. — С. 55–60.
21. Браилов Э. С. Определение погрешности измерения температуры встроенными термоэлектрическими термометрами / Э. С. Браилов, Ю. А. Скрипник, Г. В. Юрчик // Измерительная техника. — 1986. — № 5. — С. 20–22.
22. Столярчук В. П. Моделювання роботи термоперетворювача в динамічному режимі / В. П. Столярчук // Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник. — Львів, 2000. — Вип. 57. — С. 85–87.
23. Мильченко В. Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологическое обеспечение по отраслям» / В. Ю. Мильченко. — М., 1984. — 25 с.
24. Чирка М. І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / М. І. Чирка. — Львів, 1997. — 20 с.
25. Васильків Н. М. Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Н. М. Васильків. — Львів, 2011. — 20 с.
26. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / О. В. Кочан, Р. В. Кочан. — Заявл. 22.02.2007.
27. Саченко А. А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий : дис. ... доктора техн. наук : 05.11.16 / А. А. Саченко. — Ленинград, 1988. — 278 с.
28. Березький О.М. Системи вимірювання температури з елементами штучного інтелекту : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / О. М. Березький. — Львів, 1996. — 20 с.
29. Патент №50830 Україна, МПК 7 G06F15/18. Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі / А. Саченко, В. Кочан, В. Турченко (Україна), В. Головка, Ю. Савицький (Білорусь), Т. Лапоулос (Греція). — Заявл. 04.01.2000. Опубл. 15.11.2002. — 14 с.
30. Васильків Н. М. Вдосконалення метрологічного програмного тесту в комп'ютерних системах вимірювання температури / Н. М. Васильків // Комп'ютеринг. — 2010. — Вип. 2. — Т. 9. — С. 175–182.
31. Кочан Р. В. Тестування інтелектуальних систем збору даних з допомогою метрологічного програмного тесту / Р. В. Кочан // Вісник Національного Університету Львівська Політехніка. Секція Автоматики, вимірювання та керування. — 2004. — №500. — С. 9–18.
32. Rawlings J. O. Applied Regression Analysis: A Research Tool, Second Edition / J. O. Rawlings, S. G. Pantula, D. A. Dickey. — Springer-Verlag, 1998. — 678 p.
33. Економетрія (економетрика) / В. О. Єрьоменко, А. М. Алілуйко, О. М. Мартинюк, С. Ю. Попіна. — Тернопіль : Підручники і посібники, 2011. — 114 с.
34. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алломеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. /

- Н. А. Рогельберг, Э. Н. Пигидина, Г. Н. Покровская и др. // Сб. исследование сплавов для термопар. Труды института Гипроцветметобработка. – М. : Metallurgia, 1969. — Т. III.
35. Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Б.П. Павлов – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 109 с.
36. Назаренко О. М. Основы эконометрики : підбручник / О.М. Назаренко. — 2-ге вид., перероб. – К. : Центр навчальної літератури, 2005. — 392 с.
37. Грубер Й. Эконометрия / Й. Грубер. — К. : Астарта, 1996. — Т. 1. Введение в эконометрию. — 397 с.

Problems of modeling of consequences of degradation processes in thermocouples' electrodes are considered in this paper. Such degradation leads to time drift of conversion characteristic and inhomogeneity error caused by long term operation. The paper shows that polynomial regression coefficients' estimations obtained using the least squares method for models (LSM) without a free member are biased. Polynomial regression coefficients' estimations for models with a free member have all properties of the LSM-estimations, but they are senseless from physical point of view.

Key words: *least squares method, least squares method estimations of the model coefficients, thermocouples, time drift of conversion characteristic, inhomogeneity error.*

Отримано: 12.04.2013

УДК 536.21

В. А. Иванюк*, канд. техн. наук,

Н. Л. Костьян**, старший преподаватель

А. И. Махович*, аспирант

*Каменец-Подольский национальный университет
имени Ивана Огиенко, г. Каменец-Подольский

** Киевский национальный университет технологий и дизайну, г. Киев

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА ТЕПЛОвого ПОТОКА

Работа посвящена получению математических моделей приемников теплового потока в форме передаточных функций. Рассматриваются аналитический метод, метод на основе дифференциально-разностной модели и метод идентификации передаточной функции на основе преобразования Лапласа-Карсона.

Ключевые слова: *математическая модель приемника теплового потока, передаточная функция, интегральные преобразования.*

Измерение плотности потоков теплового излучения имеет место во многих экспериментальных исследованиях и технологических процессах. При разработке методов теплотри усложняющим обстоятельством является разнообразие приемников теплового потока по типам и