УДК 043.5

DOI: http://doi.org/10.20535/2219-3804202019177602

Л. В. Кузьмич[1], *докторант*

ЦИФРОВИЙ МЕТОД КОРЕКЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕНЗОДАТЧИКОМ

En This article is aimed at finding the opportunities to improve the remote measurements accuracy and noise immunity of the stress - strain state measuring, in particular in a detailed study of the polynomial coefficients behavior for the most used temperatures range of load cells.

Based on the analysis of destabilizing factors, it is established that among the main destabilizing factors that limit the measurement accuracy of instrument systems equipped with strain gauges are the effects of external climatic and mechanical factors, in particular temperature, humidity and so on.

The temperature change range influence on the most common materials used for the of strain gauges manufacturing, namely, karma and constan, alloys with a minimum temperature coefficient of resistance, is investigated The variation of the temperature error values (± 10%) on the rms error of the approximation error by power polynomials was investigated.

The NUMERY package determines the dependence of the approximation error on the order of the approximating polynomial revealed that over a wide temperature range the errors for the karma and the constan have a weak relationship with the polynomial order.

Calculations indicate that by narrowing the temperature range the error sharply depends on the order of the approximating polynomial, and at the sixth order it almost becomes zero.

The effect of tabulated accuracy recording on polynomial coefficients was also investigated, and it was determined that a random error in the coefficients determination up to ± 10% for the karma and the constan practically does not affect the mean square error of approximation. The influence of the temperature range changing and the temperature error values variation on the rms error of the approximation error by power polynomials is investigated.

[1] *Національный авіаційний університет*

The NUMERY package determines the dependence of the approximation error on the order of the approximating polynomial.

A digital temperature error correction method that allows the correction of sensor errors by using TEDS is proposed. The algorithm efficiency in terms of nonlinearity of the temperature error is determined by the accuracy of the fit of the approximating polynomial.

Ru

Данная статья ориентирована на поиск возможностей по повышению точности дистанционных измерений и помехозащищенности средств измерения напряженно - деформированного состояния, в частности в детальном исследовании поведения полиномиальных коэффициентов для наиболее применяемого диапазона температур работы тензодатчиков.

Было исследовано влияние диапазона изменения температур, разброса значений температурной погрешности на среднее значение погрешности аппроксимации степенными полиномами.

Предложен метод цифровой температурной коррекции погрешностей, который позволяет корректировать погрешности датчика с помощью использования teds. Эффективность алгоритма в условиях нелинейности температурной погрешности будет определяться с точностью подгонки аппроксимирующего полинома.

Вступ

На сьогоднішній день одними із найпоширеніших засобів вимірювання напружень та деформацій є приладові системи, оснащені тензорезисторами та тензодатчиками [1 – 6].

Для корекції похибок датчиків, використовуються методи автоматичної корекції на основі методів допоміжних вимірювань, які регламентуються міжнародним стандартом *IEEE* 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактору (*TEDS*).

Аналіз останніх досліджень

На основі здійсненого у [7] аналізу дестабілізуючих факторів встановлено, що серед основних дестабілізуючих факторів, які обмежують точність вимірювання приладових систем, обладнаних тензодатчиками, є впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів, зокрема, температури, вологості тощо.

Також нами було досліджено вплив діапазону зміни температур [7] для одного з найпоширеніших матеріалів, що застосовується для виготовлення тензорезисторів, а саме, константану – сплаву за мінімальним температурним коефіцієнтом опору. Було досліджено розкид значень температурної похибки $(\pm 10\%)$ на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами [8 – 10].

Із метою визначення залежності похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному був застосований пакет *NUMERY*, що якнайбільш пристосований для вирішення задач обробки сигналів вимірювальної інформації, розроблений професором Шрюхером у монографії [11].

За допомогою пакету *NUMERY* було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному, за результатами було встановлено, що у широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок із порядком поліному.

Постановка задачі

Дана робота є продовженням досліджень, викладених у [7], і зорієнтована на пошук можливостей щодо підвищення точності дистанційних вимірювань та завадозахищеності засобів вимірювання напружено – деформованого стану, зокрема у детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо поведінку поліноміальних коефіцієнтів у більш вузькому діапазоні температур від $-50°C$ до $+100°C$ для сплавів карми та константану [5], що відображено нами у табл. 1.

***Таблиця* 1.**

Табульоване значення похибки для сплавів константану та карми [5]

Температура T, °C	Відносна похибка вимірювання для константану, овд	Відносна похибка вимірювання для карми, овд
-75	-500	-260
-50	-266	-190
-25	-89	-120
0	-13,5	-70
+25	0	0
+50	-6	+45
+75	-50	+60
+100	-100	+70
+125	-135	+85
+150	-95	+60
+175	-20	+40

Температура T, °C	Відносна похибка вимірювання для константану, овд	Відносна похибка вимірювання для карми, овд
+200	+90	0
+225	+210	-40
+250	+450	-90

Залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному була визначена за допомогою пакету *NUMERY* для двох сплавів (табл. 2 і табл. 3).

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[\%]}$ визначалося згідно формули:

$$\sigma_{[\%]} = \sqrt{\frac{\sum \theta^2}{n-1}} \Big/ \delta_{nom} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

де θ^2 – сума квадратів нев’язок;

n – кількість результатів вимірювань;

δ_{nom} – номінальна деформація пружини, овд.

***Таблиця* 2.**

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів (для карми)

Порядок поліному	Поліноміальні коефіцієнти										$\sum\theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9		
IV	-63,1818182	2,07671	-0,0083273	0,0000165	$-5{,}81818*10^{-8}$						705,1948052	0,54
V	-57,8246753	2,1524242	-0,0233273	0,0000565	$-4{,}7*10^{-6}$	$-3{,}84*10^{-8}$					608,7662338	0,5
VI	-70,0	3,4933333	0,0177333	-0,0021253	$-1{,}0667*10^{-7}$	$6{,}016*10^{-7}$	$-4{,}2667*10^{-9}$				$2{,}09353*10^{-20}$	10^{-11}

Як свідчать розрахунки, при звуженні температурного діапазону похибка різко залежить від порядку апроксимуючого поліному і вже у шостому порядку практично стає нулевою .

Було також досліджено вплив точності запису табульованих значень на поліноміальні коефіцієнти і визначено, що випадкова похибка визначення коефіцієнтів розміром до $\pm 10\%$ для константана практично не впливає на значення середньоквадратичної похибки апроксимації.

Це дає можливість спростити алгоритм цифрової корекції похибок тензодатчика по відношенню до способу, описаного в [4].

Розглянемо спосіб цифрової температурної корекції похибок, який полягає у наступному:

- визначаємо значення похибки для певних значень вхідної величини із кроком 10%, починаючи з «нуля»;
- за визначеною температурою датчика визначаємо значення похибок для всіх реперних точок;
- апроксимуємо залежність поліномом шостого порядку;
- визначаємо поправку для отриманого результату вимірювання за цим поліномом і обчислюємо скорегований результат.

***Таблиця* 3.**

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів (для константану)

Порядок поліному	Поліноміальні коефіцієнти										$\sum\theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9		
IV	-13,521645	1,3580664	-0,0465485	0,0003526	$-1,640121 \cdot 10^{-6}$						60,1937229	0,16
V	-16,349026	1,6181061	-0,0386318	0,0003315	$-3,93455 \cdot 10^{-6}$	$2,02667 \cdot 10^{-8}$					33,3336039	0,12
VI	-13,50000	1,3043333	-0,04824	0,000842	$-2,8 \cdot 10^{-6}$	$-1,29493 \cdot 10^{-7}$	$9,984 \cdot 10^{-10}$				$1,60869 \cdot 10^{-24}$	10^{-10}

Для перевірки цього алгоритму промоделюємо температурну похибку впливом зміни жорсткості пружини тензодатчика, зумовленої температурною залежністю модуля пружності E. Для пружинної сталі $\frac{\delta_E}{dt} = -24 \cdot 10^{-5}(1/°C)$, що буде відповідати мультиплікативній похибці $\gamma = 24 \cdot 10^{-3}(\frac{\%}{°C})$, а також не лінійність функції перетворення датчика модуляцією інших коефіцієнтів [5].

Розглянемо ефективність запропонованого методу на наступному прикладі: будемо вважати, що матеріал, з якого виготовлена пружина тензодатчика, буде мати температурний коефіцієнт $\theta = \frac{\delta_E}{dt} = -10^{-3}(1/°C)$, що значно перевищує реальний температурний коефіцієнт пружинної сталі.

Тоді деформація пружини тензодатчика буде визначатися:

$$\varepsilon_x = x + (1+\theta) \cdot 10^{-3} \cdot t, \tag{2}$$

де x – «ідеальне» значення відносної деформації;

θ – температурний коефіцієнт; t – робоча температура пружини.

За допомогою пакету *NUMERY* отримуємо коефіцієнти лінійної регресії підсумкової похибки від температури:

$$y = a_0 + a_1 x$$

$$\begin{cases} a_0 = 0,025 \\ a_1 = 0,000025, \\ \sum \delta_i = 0 \end{cases} \tag{3}$$

де y – абсолютна похибка; x – значення вимірювальної величини;

a_0, a_1 – коефіцієнти лінійної регресії; $\sum \delta_i$ – сума квадратів нев'язок.

Обчислене значення вхідної величини за запропонованою методикою повністю співпадає із теоретичним значенням вхідної величини.

Результати моделювання корекції похибок за визначеною методикою наведено у табл. 4.

***Таблиця* 4.**

Результати моделювання цифрової температурної корекції похибок

Ідеальне значення вимірювальної величини, t	Температурна похибка, $\varepsilon\,(t)$	Реальна деформація за 25°C $\varepsilon\,(25°C)$	Абсолютна температурна похибка $\delta = \varepsilon(25°C) - \varepsilon\,(t)$ $\delta = \varepsilon\,(25°C) - \varepsilon\,(t)$, , іод.
0	$\varepsilon_0 = 10^{-3} \cdot t$	$25 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$

Ідеальне значення вимірювальної величини, t	Температурна похибка, $\varepsilon\ (t)$	Реальна деформація за $25°C$ $\varepsilon\ (25°C)$	Абсолютна температурна похибка $\delta = \varepsilon(25°C) - \varepsilon\ (t)$ $\delta = \varepsilon\ (25°C) - \varepsilon\ (t)$, , іод.
10	$\varepsilon_{10} = 1{,}01 \cdot 10^{-3} \cdot t + 10$	10,02525	0,02525
20	$\varepsilon_{20} = 1{,}02 \cdot 10^{-3} \cdot t + 20$	20,0255	0,0255
30	$\varepsilon_{30} = 1{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot t + 30$	30,02575	0,02575
40	$\varepsilon_{40} = 1{,}04 \cdot 10^{-3} \cdot t + 40$	40,026	0,026
50	$\varepsilon_{50} = 1{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot t + 50$	50,02625	0,02625
60	$\varepsilon_{60} = 1{,}06 \cdot 10^{-3} \cdot t + 60$	60,0265	0,0265
70	$\varepsilon_{70} = 1{,}07 \cdot 10^{-3} \cdot t + 70$	70,02675	0,02675
80	$\varepsilon_{80} = 1{,}08 \cdot 10^{-3} \cdot t + 80$	80,027	0,027
90	$\varepsilon_{90} = 1{,}09 \cdot 10^{-3} \cdot t + 90$	90,02725	0,02725
100	$\varepsilon_{100} = 1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot t + 100$	100,0275	0,0275

Отримуємо лінійну регресію залежності абсолютної похибки від значення вхідної величини.

У пакеті *NUMERY* по десяти реперним поліномам рахуємо їх значення при даній температурі, а саме $+25°C$, а потім обчислюємо абсолютну температурну похибку.

У разі довільного значення вхідної величини $\varepsilon = 35\%$ розраховуємо вихідну величину за функцією перетворення (2).

Маємо:

$$\varepsilon_{35} = 1{,}035 \cdot 10^{-3} \cdot 25 + 35 = 35{,}025875,$$

тобто абсолютна температурна похибка $\delta = 0{,}025875$ (іод).

Визначаємо значення вимірювальної величини за запропонованим алгоритмом (3) у точці $\varepsilon = 35\%$. Вона теж становитиме $0{,}025875$ (іод).

Це означає, що запропонований алгоритм дозволяє коригувати похибки датчика за допомогою використання *TEDS*. Ефективність алгоритму в умовах нелінійності температурної похибки буде визначатися із точністю підгонки апроксимуючого полінома.

Висновки

У табличній формі наведено апроксимуючі поліноми для датчиків на основі карми та константану і показано, що похибка апроксимації буде вже практично дорівнювати нулю у разі шостого порядку апроксимуючого поліному. Це означає, що відомий метод корекції похибок, запропонований Фішером, буде, практично, неможливо використати у даному випадку через значне зростання обсягу обчислень у разі збільшення порядку поліномів, оскільки у цьому методі поліном обмежується третім порядком у зв'язку із значним збільшенням обчислень, необхідних за збільшення порядку апроксимуючого поліному.

У той же час, запропонований нами метод цифрової температурної корекції похибок є вільним від зазначених недоліків через те, що не залежить від ступеню апроксимуючого поліному.

Список використаної літератури

1. *Кузьмич Л. В.* Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В.Кузьмич // Вісник Інженерної Академії України. Київ, 2016. – №2. – С. 180-184.
2. *Kuzmych L., Kobylianskyi O., Duk M.* Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501661.
3. *Орнатський Д. П.* Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками [Текст] / Д. П. Орнатський, Л. В. Кузьмич, В. П. Квасніков // Метрологія та прилади. Харків, 2019. – №1. – С. 31-36.
4. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern. Erb. K., Fisher P. "Bulletin SEV/VSE", 1989, 80, №7, 8, p.365-368.
5. Экспериментальная механика [Текст] : монография в 2 кн: Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
6. *Меxеда В. А.* Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
7. *Кузьмич Л. В.* Розробка способу та засобу вимірювань напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчика [Текст] / Л. В. Кузьмич, Д. П. Орнатський, В. П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – Вип. №1. – С. 69 – 74.
8. *Rus, G.* Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test [Text] / G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, S. C. Wooh // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 68, Issue 7. – P. 707–727. doi:10.1002/nme.1720.
9. *Harada, T.* Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate [Text] / T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda,

K. Suzumori, Y. Yamada, K. Sotowa // Sensors and Actuators A: Physical. - 2009. - Vol. 155, Issue 1. – P. 168-174.
10. *Schroder, A.* Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schroder, J. Rautenberg, B. Henning // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 3, Issue 1. – P. 10031009. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.
11. *Шрюфер Е.* Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів: Підручник / За ред. В. П. Бабака. К.: Либідь, 1992. – 296 с.