УДК 043.5

Л. В. Кузьмич, *к.т.н., докторант,*
Д. П. Орнатський, *д.т.н., професор,*
В. П. Кваснiков, *д.т.н., професор*
Національний авіаційний університет
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058, Україна

ЦИФРОВА КОРЕКЦІЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕНЗОДАТЧИКА

Стаття зорієнтована на пошук можливостей щодо підвищення точності дистанційних вимірювань та завадозахищеності засобів вимірювання напружено-деформованого стану, зокрема на детальне дослідження поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур роботи тензодатчиків.

Було досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами.

Запропоновано метод цифрової температурної корекції похибок, що дає можливість коригувати похибки датчика за допомогою використання TEDS. Ефективність алгоритму в умовах нелінійності температурної похибки буде визначатися з точністю підгонки апроксимуючого полінома.

Ключові слова: *тензодатчик, температурна складова похибки, середньоквадратичне значення похибки апроксимації, поліноміальний коефіцієнт, константан.*

Вступ. На сьогоднішній день одними з 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 фактора (TEDS).

Аналіз останніх досліджень. На основі здійсненого в [7] аналізу дестабілізуючих факторів встановлено, що серед основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання приладових систем, обладнаних тензодатчиками, є впливи зовнішніх кліматичних і 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 з мінімальним температурним коефіцієнтом опору. Було досліджено розкид значень температурної похибки ($\pm 10\,\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами [8-10].

З метою визначення залежності похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома було застосовано пакет NUMERY як найбільш пристосований для вирішення задач обробки сигналів вимірювальної інформації, розроблений професором Шрюхером у монографії [11].

За допомогою пакета NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома, в результаті чого було встановлено, що в широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв’язок із порядком полінома.

Формулювання мети. Ця 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 детального дослідження поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо поведінку поліноміальних коефіцієнтів у більш вузькому діапазоні температур від $-50\ ^\circ\mathrm{C}$ до $+100\ ^\circ\mathrm{C}$, взятих із таблиці 1 джерела [7].

DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.174598

Залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома була визначена за допомогою пакета NUMERY (див. таблицю 1).

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[\%]}$ визначалося згідно з формулою (3) джерела [7].

Таблиця 1 – **Таблиця поліноміальних коефіцієнтів**

Порядок полінома	Поліноміальні коефіцієнти										$\sum \theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_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}

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

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

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

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

1) визначаємо значення похибки для певних значень вхідної величини з кроком 10 %, починаючи з «нуля»;

2) за визначеною температурою датчика визначаємо значення похибок для всіх реперних точок;

3) апроксимуємо залежність поліномом шостого порядку;

4) визначаємо поправку для отриманого результату вимірювання за цим поліномом і обчислюємо скоригований результат.

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

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

DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.174598

Тоді деформація пружини тензодатчика буде визначатися як:

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

де $x -$ «ідеальне» значення відносної деформації;

$\theta -$ температурний коефіцієнт;

$t -$ робоча температура пружини.

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

$$y = a_0 + a_1 x$$

$$\begin{cases} a_0 = 0{,}025 \\ a_1 = 0{,}000025, \\ \sum \delta_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

де $y -$ абсолютна похибка;

$x -$ значення вимірюваної величини;

$a_0, a_1 -$ коефіцієнти лінійної регресії;

$\sum \delta_i -$ сума квадратів нев'язок.

Обчислене значення вхідної величини за запропонованою методикою повністю збігається з теоретичним значенням вхідної величини.

Результати моделювання корекції похибок за визначеною методикою наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – **Результати моделювання цифрової температурної корекції похибок**

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

В пакеті NUMERY за десятьма реперними поліномами рахуємо їх значення при даній температурі, а саме +25 °С, а потім обчислюємо абсолютну температурну похибку.

При довільному значенні вхідної величини $\varepsilon = 35\ \%$ розраховуємо вихідну величину за функцією перетворення (1).

Маємо:

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

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

Визначаємо значення вимірюваної величини за запропонованим алгоритмом (2) в точці $\varepsilon = 35\ \%$. Вона теж становитиме $0{,}025875$ (іод).

Це означає, що запропонований алгоритм дає можливість коригувати похибки датчика за допомогою використання TEDS. Ефективність алгоритма в умовах нелінійності температурної похибки буде визначатися з точністю підгонки апроксимуючого полінома.

Висновки. В табличній формі наведено апроксимуючі поліноми для датчиків на основі константану і показано, що похибка апроксимації буде вже практично нульовою при шостому порядку апроксимуючого полінома. Це означає, що відомий метод корекції похибок, запропонований Фішером, буде практич-

DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.174598

но неможливо використати в цьому випадку через значне зростання обсягу обчислень при збільшенні порядку поліномів, оскільки у цьому методі поліном обмежується третім порядком у зв'язку із значним збільшенням обчислень, необхідних при збільшенні порядку апроксимуючого полінома.

У той же час запропонований нами алгоритм цифрової температурної корекції похибок є вільним від зазначених недоліків через те, що не залежить від ступеня апроксимуючого полінома.

Список літератури

[1] Л. В. Кузьмич, "Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин", *Вісник Інженерної Академії України,* № 2, с. 180-184, Київ, 2016.

[2] L. Kuzmych; O. Kobylianskyi; and M. Duk, "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 (October 1, 2018); doi: 10.1117/12.2501661

[3] Д. П. Орнатський, Л. В. Кузьмич, та В. П. Квасніков, "Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками", *Метрологія та прилади,* № 1, с. 31-36, Харків, 2019.

[4] K. Erb., P. Fisher, "Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern", *Bulletin SEV/VSE,* 80, no. 7, 8, pp. 365-368, 1989.

[5] *Экспериментальная механика:* монография в 2 кн.: Кн. 1, пер. с англ., А. Кобаяси, ред. Москва: Мир, 1990.

[6] В. А. Мехеда, *Тензометрический метод измерения деформаций:* учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.

[7] Л. В. Кузьмич, Д. П. Орнатський, та В. П. Квасніков, "Розробка способу та засобу вимірювань напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчика", *Вісник Черкаського державного технологічного університету,* № 1, с. 69-74, 2019. *(Технічні науки).*

[8] G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, and S. C. Wooh, "Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test", *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* vol. 68, iss. 7, pp. 707-727, 2006. doi: 10.1002/nme.1720.

[9] T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda, K. Suzumori, Y. Yamada, and K. Sotowa, "Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate", *Sensors and Actuators A: Physical,* vol. 155, iss. 1, pp. 168-174, 2009.

[10] A. Schroder, J. Rautenberg, and B. Henning, "Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization", *Physics Procedia,* vol. 3, iss. 1, pp. 1003-1009, 2010. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

[11] Е. Шрюфер, *Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів:* підручник, В. П. Бабак, ред. Київ: Либідь, 1992.

References

[1] L. V. Kuzmych, "Modern trends in the creation of instrumentation systems for measuring mechanical quantities", *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy,* no. 2, pp. 180-184, Kyiv, 2016. [in Ukrainian].

[2] L. Kuzmych; O. Kobylianskyi; and M. Duk, "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 (October 1, 2018); doi: 10.1117/12.2501661

[3] D. P. Ornatskyi, L. V. Kuzmych, and V. P. Kvasnikov, "Simulation of the analog interface for remote measurements using multiplexer and resistive strain gauges", *Metrolohiia ta prylady,* no. 1, pp. 31-36, Kharkiv, 2019 [in Ukrainian].

[4] K. Erb., P. Fisher, "Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern", *Bulletin SEV/VSE,* 80, no. 7, 8, pp. 365-368, 1989.

[5] *Experimental mechanics:* monograph in 2 books: Book 1, A. Kobaiasi, ed. Moscow: Mir, 1990 [in Russian].

[6] V. A. Mekheda, *Tensiometric method for strain measurement:* manual. Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2011 [in Russian].

[7] L. V. Kuzmich, D. P. Ornatsky, and V. P. Kvasnikov, "Development of the

DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.174598

method and the instrument of the measurement of a stress-deformed state of a strain gauge", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 69-74, 2019 [in Ukrainian].
[8] G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, and S. C. Wooh, "Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 68, iss. 7, pp. 707-727, 2006. doi: 10.1002/nme.1720.
[9] T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda, K. Suzumori, Y. Yamada, and K. Sotowa, "Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 155, iss. 1, pp. 168-174, 2009.
[10] A. Schroder, J. Rautenberg, and B. Henning, "Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization", *Physics Procedia*, vol. 3, iss. 1, pp. 1003-1009, 2010. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.
[11] E. Schruffer, *Signal processing: digital processing of sampled signals:* manual, V. P. Babak, ed. Kyiv: Lybid, 1992 [in Ukrainian].

L. V. Kuzmych, *Ph. D, doctoral candidate,*
D. P. Ornatskyi, *D. Sc., professor,*
V. P. Kvasnikov, *D. Sc., professor*
National Aviation University,
Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

THE DIGITAL CORRECTION OF THE STRAIN GAUGE ERROR

The article is aimed on the search of opportunities to improve the accuracy of remote measurements and noise immunity of measuring the stress-strain state, in particular on a detailed study of polynomial coefficients behavior for the most used range of temperatures of strain gauges.

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 influence of the temperature range change for one of the most common materials used for the manufacture of strain gauges, namely, a constantan alloy with a minimum temperature coefficient of resistance and the variation of the temperature error values (± 10 %) on the rms error of the approximation error by power polynomials is studied.

The NUMERY package has determined the dependence of the approximation error on the order of the approximating polynomial, which reveals that, over a wide temperature range, the error for the constant has a weak relationship with the polynomial order.

As the calculations show, when narrowing the temperature range, the error sharply depends on the order of the approximating polynomial, and already at the sixth order it almost becomes zero.

The influence of recording accuracy of tabulated values on polynomial coefficients is also investigated, and it is determined that a random error in the determination of coefficients up to ± 10 % for a constantan practically does not affect the mean square error of approximation.

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

Keywords: *strain gauge, temperature component of error, mean square error of approximation, polynomial coefficient, constantan.*

Стаття надійшла 31.07.2019
Прийнято 21.08.2019

DOI: 10.24025/2306-4412.2.2019.174598