

УДК 043.5

DOI: <http://doi.org/10.20535/0203-3771372019171900>

Л. В. Кузьмич¹, докторант

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА СИСТЕМ

En

Nowadays the modern wave of intellectualization of measuring instruments proposes the digital methods of correction are acquired not only for primary measuring transducers, but also for secondary sensors. Since the conversion function of the secondary measuring transducers is linear, the method of the model measures by two points is used for automatic correction of the systematic components of the errors of such converters.

The method of digital compensation was describe [4], which provides a more significant reduction in the errors of measuring transducers compared with the method of analog compensation. Features and technical indicators of this method are considered on an example of measuring pressure transducer with foil strain gauges.

This method is universal, allows us to adjust not only the errors of the measurement channel nonlinearity and additional errors, but also the errors associated with the effect of interferences of the general type due to ground resistance, which induces the connection between the measuring channels of the main and destabilizing factor.

The disadvantages of this method include a significant amount of computations, which sharply increases with increasing order of approximating polynomials.

The purpose is to develop a method and means of measuring stress - strain state

¹ Національний авіаційний університет

using strain gauge, free from the above - mentioned shortcomings.

The main destabilizing factors that limit the measurement accuracy using strain gauge are:

- Random processes (noises, obstacles, etc.);
- Changes in parameters of measuring transducers due to aging and physical degradation;
- Effects of external climatic and mechanical factors (temperature, humidity, etc.).

Regarding the systematic components, the most important in statistical measurements are the errors of nonlinearity and the temperature component of the error.

We studied the influence of temperature range variations, the spread of values of temperature error ($\pm 10\%$) on the mean square error of approximation by power polynomials.

Using the NUMERY Program, the dependence of the approximation error on the order of the approximating polyphony was determined.

It is established that in a wide temperature range, the error for constantan has a weak relation with the order of a polynomial.

Ru

В статті проаналізовано вплив основних дестабілізуючих факторів, впливаючих на точність вимірювання напружено - деформованого стану складних технічних об'єктів і систем з допомогою тензодатчиків.

Було досліджено вплив діапазона змін температури для тензодатчиків на основі сплаву карми, розброса значень температурної погрешності на середнє значення погрешності апроксимації степенними поліномами.

С допомогою пакета *NUMERY* було визначено залежність погрешності апроксимації від порядку апроксимуючого полінома.

Вступ

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, головним із яких є температура, використовуються на сьогоднішній день 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*).

Ці дані використовуються для отримання скорегованого результату шляхом вирішення систем нелінійних рівнянь [1-2, 7-11].

Аналіз останніх досліджень

Аналіз різноманітних вимірювальних перетворювачів, у тому числі терезисторних, показує, що основні складові їхніх похибок створені внаслідок впливу кліматичних факторів, зокрема температури. Впливи шумів можуть бути значно знижені звуженням робочої смуги частот вимірюваль-

них перетворювачів, а дрейф і старіння – враховані відповідними градуваннями [4].

Для зниження температурної похибки тензорезисторних вимірювальних перетворювачів найбільш практичне застосування мають аналогові компенсаційні пристрої, котрі передбачають застосування додаткових температурнозалежних резисторів. У [4], наприклад, описано метод цифрової компенсації, який забезпечує більш значне зниження (на порядок) похибок вимірювальних перетворювачів у порівнянні із методом аналогової компенсації. Особливості та технічні показники даного методу розглядаються на прикладі вимірювального перетворювача тиску із фольговими тензорезисторами. Такий вимірювальний перетворювач складається із круглої металевої мембрани, в якій на одній із поверхонь наносяться чотири однакових фольгових тензорезистори, котрі з'єднані за мостовою схемою і розміщуються таким чином, якщо у разі деформації мембрани під дією тиску два тензорезистори працюють на розтяг, а два інших – на стиск. У якості матеріалу фольгового тензорезистора взято сплав із мінімальним температурним коефіцієнтом опору.

На поверхні мембрани також улаштовуються додаткові компенсаційні резистори. Із підвищенням температури жорсткість мембрани зменшується внаслідок температурних змін модуля пружності матеріалу мембрани, яке призводить до збільшення чутливості вимірювального перетворювача.

Даний метод є універсальним, дозволяє скорегувати не лише похибки нелінійності вимірювального каналу та додаткові похибки, але й похибки, пов'язані із впливом завад загального виду через опір заземлення, який спонукає зв'язок між вимірювальними каналами основного та дестабілізуючого фактору.

До недоліків цього методу можна віднести значний об'єм обчислень, який різко зростає за збільшення порядку апроксимуючих поліномів [3, 11].

Постановка задачі

Метою є оптимізація модуля приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчика, вільного від зазначених вище недоліків.

Виклад основного матеріалу

Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання із використанням тензодатчика, є:

– випадкові процеси (шуми, перепони тощо);

- часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації;
- впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів (температура, вологість тощо).

Що стосується систематичних складових, то найбільш вагомими під час статистичних вимірювань є похибки нелінійності та температурна складова похибки.

Під час статичних вимірювань головна вимога зводиться до отримання лінійної залежності між вхідною і вихідною величинами перетворювача.

Залежність «вхід – вихід» вимірювальних приладів без врахування таких факторів, як гістерезис, сповзання нуля тощо описується у вигляді рівняння:

$$Y_{out} = (a_0 + a_1 x_{in} + a_2 x_{in}^2 + \dots + a_n x_{in}^n) x_{in} \quad (1)$$

де x_{in} – вхідна величина; Y_{out} – вихідна величина; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – градуовальні коефіцієнти.

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика у багатьох практичних задачах є не менш важливим за вплив навантаженням і є важливим фактором, який здатний змінити опір тензорезистора. У разі зміни температури навколишнього середовища виникає чотири ефекти, які здатні змінити функціональні характеристики датчика[5]:

- зміна тензочутливості металевого сплаву S_A ;
- подовження або скорочення решітки датчика ($\Delta L/L = \alpha \Delta T$);
- подовження або скорочення зразка ($\Delta L/L = \beta \Delta T$);
- зміна опору датчика ($\Delta R/R = \gamma \Delta T$).

Тензочутливість S_A одного із найбільш широко вживаних сплавів – карми є лінійною функцією температури [5], де для карми $\Delta S_A/\Delta T$ складає 0,00975 % на 1°C . У зв'язку із тим, що зміни S_A досить малі (менше 1% для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), то у разі звичайного аналізу напружень вони не враховуються. Однак під час дослідження температурних напружень, коли систематично спостерігаються перепади температури $\sim 10^2^\circ\text{C}$, необхідно враховувати зміни S_A . Тому найбільш суттєвими є другий, третій та четвертий ефекти, котрі викликають зміну опору датчика з температурою $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T}$ відповідно до залежності:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T \quad (2)$$

де α - коефіцієнт теплового розширення матеріалу датчика; β - коефіцієнт теплового розширення матеріалу зразка; $S_g \Delta$ - тензочутливість датчика; γ - температурний коефіцієнт опору матеріалу датчика.

Відмінність у тепловому розширенні матеріалів датчика і зразка призводить до механічних деформацій решітки датчика $\varepsilon_T = (\beta - \alpha)\Delta T$, які викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ε_T так само, як і на деформацію зразка ε , зумовленої навантаженням, яке породжує компоненту вихідного сигналу, яка відповідає температурі [5].

У разі рівності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів датчика і зразка, наявна деформація визначається другим членом рівняння (2), оскільки перший член дорівнюватиме нулю. Температурна компенсація датчика досягається лише за умови, коли обидва члени рівняння (2) або рівні нулю, або взаємно знищуються.

Величини α і γ є досить чутливими до вмісту сплаву та режиму його холодної обробки у процесі прокатки фольги. Загальноприйнятим етапом виробничого циклу виготовлення тензодатчиків є вибіркове вимірювання температурних характеристик декількох датчиків із кожного рулону фольги, яка використовується під час виготовлення решіток. Існування варіацій у величинах α і γ від плавлення до плавлення та від рулону до рулону дозволяє підбирати датчики, що виготовлені на базі карми, які застосовуються до різноманітних конструкційних матеріалів.

Матеріали для тензорешіток повинні відповідати таким вимогам [5, 6]:

- мати високий питомий опір, який дозволяє виготовляти малобазні тензорезистори із досить великим опором;
- володіти високою і стабільною чутливістю до деформацій;
- зміни опору, викликані деформацією, повинні підпорядковуватися лінійному закону в достатньо широкому діапазоні;
- бути нечутливим до впливу температури, тобто температурний коефіцієнт опору повинен бути близьким до нуля;
- термоЕРС у парі із міддю повинна бути якомога менше – це дуже важливо у разі живлення тензорезисторів постійним струмом;
- температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу проволочки і матеріалу досліджуваної деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятись, в іншому випадку зміни температури будуть викликати уявну деформацію і, отже, створювати похибки при вимірах;
- не мати гістерезису;

- володіти технологічністю, яка дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;
- мати високе відношення межі пропорційності до модуля пружності;
- сплави, котрі застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окислювальному впливу зовнішнього середовища.

Що стосується карми, то у даний час більшість тензорезисторів виготовляється із цього сплаву, причому у порівнянні із константаном він володіє трьома перевагами[5, 6, 10]:

- він може бути температурно компенсований у більш широкому діапазоні температур;
- нікельхромова основа сплаву карма забезпечує тензодатчикам значніші характеристики втоми;
- сплав проявляє високу тимчасову стабільність і тому кращий під час вимірювання статичних деформацій впродовж тривалих періодів часу - від кількох місяців до кількох років.

Головний недолік сплаву карма – складне паяння вивідних провідників до контактних площадок датчика.

Слід зазначити, датчики із вибіркового плавлення не є повністю компенсованими у широкому діапазоні температур через присутність нелінійних членів рівняння (2). Типові датчики із вибіркового плавлення виявляють присутність похибки, яка змінюється зі зміною температури [5].

Дослідженнями [5] встановлено: похибка, яка викликана зміною температури у декілька градусів у межах 24°C , є досить малою (менше $0,5 \text{ мкм/м}^{\circ}\text{C}$). Однак за суттєвих змін температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. Із цією метою необхідно виміряти температуру поблизу датчика і використати залежність вимірювальної похибки від температури [5].

Нами було досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки ($\pm 10\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами.

У табл. 1 наведено значення похибки в температурному режимі від -75°C до $+250^{\circ}\text{C}$ для карма.

За допомогою пакету *NUMERY* було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному. Отримано наступні дані (табл. 2).

Таблиця 1.

Табульоване значення похибки для карми на основі [5]

Температура T , °C	-75	-50	-25	0	+25	+50	+75	+100	+125	+150	+175	+200	+225	+250
Відносна похибка вимірювання, ОВД	-260	-190	-120	-70	0	+45	+60	+70	+85	+60	+40	0	-40	-90

Таблиця 2.

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів

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	-59,4985896	2,3378146	-0,0073338	-0,0000311	$8,45742 \cdot 10^{-8}$						401,7717577	0,28
V	-59,2890159	2,383342	-0,0076761	-0,0000389	$1,62815 \cdot 10^{-7}$	$-1,78836 \cdot 10^{-10}$					388,5985531	0,27
VI	-59,4350495	2,3808412	-0,0075186	-0,000039	$1,416 \cdot 10^{-7}$	$-3,08899 \cdot 10^{-11}$	$-2,81803 \cdot 10^{-13}$				388,3926909	0,27
VII	-60,8352669	2,430404	-0,0058324	-0,0000712	$1,67130 \cdot 10^{-8}$	$4,20751 \cdot 10^{-9}$	$-2,28700 \cdot 10^{-11}$	$3,68788 \cdot 10^{-14}$			368,043922	0,265

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		
VIII	-61,1024734	2,5971917	-0,0062909	0,0001677	$8,32583 \cdot 10^{-7}$	$1,26061 \cdot 10^{-8}$	$-1,54142 \cdot 10^{-10}$	$6,0149 \cdot 10^{-13}$	$-8,06588 \cdot 10^{-16}$		317,6564148	0,247
IX	-62,4482056	2,5050862	-0,0023297	-0,0001245	$-9,79289 \cdot 10^{-7}$	$1,81908 \cdot 10^{-8}$	$1,83977 \cdot 10^{-11}$	$-1,15602 \cdot 10^{-12}$	$5,51833 \cdot 10^{-15}$	$-8,03164 \cdot 10^{-18}$	295,1436973	0,24

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[\%]}$ визначатиметься за формулою:

$$\sigma_{[\%]} = \sqrt{\frac{\sum \theta^2}{n-1}} / \delta_{\text{пот}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де θ^2 – сума квадратів нев'язок;

n – кількість результатів вимірювань;

$\delta_{\text{пот}}$ – номінальна деформація пружини, овд.

Висновки

Як бачимо із таблиць, у широкому температурному діапазоні похибка для карми має слабкий зв'язок із порядком поліному. У майбутньому є потреба у детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур.

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. L. Kuzmich; O. Kobylanskyi; 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, Communica-

- tions, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/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. *Мехеда В. А.* Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
 7. *Серьезнов, А. Н.* Методы и средства измерений в прочностном эксперименте [Текст] / А. Н. Серьезнов, А. К. Шашурин. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 200 с.
 8. *Уикзер, Дж.* Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы [Текст] / Дж. Уикзер // Датчики и системы. - 2002. - № 10. - С. 50-55.
 9. *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](https://doi.org/10.1002/nme.1720).
 10. *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.
 11. *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](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.129).