

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

РОЗРОБКА СПОСОБУ ТА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАНЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕНЗОДАТЧИКА

У статті проаналізовано вплив основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій за допомогою тензодатчиків. Досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами. За допомогою пакета NUMERY визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома. Встановлено, що в широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок із порядком полінома.

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

Постановка проблеми. У зв'язку із сучасною хвилею інтелектуалізації засобів вимірювання набувають поширення цифрові методи корекції не тільки первинних вимірювальних перетворювачів, але й вторинних, тобто датчиків. Оскільки функція перетворення вторинних вимірювальних перетворювачів є лінійною, то для автоматичної корекції систематичних складових похибок таких перетворювачів використовується метод зразкових мір по двох точках.

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення яких, як правило, є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, основним із яких є температура, на сьогоднішній день 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).

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

Аналіз останніх досліджень. У [4], наприклад, описано метод цифрової компенсації, що забезпечує більш значне (на порядок) зниження похибок вимірювальних перетворювачів порівняно з методом аналогової компенсації. Особливості і технічні показники цього методу розглядаються на прикладі вимірювального перетворювача тиску з фольго-

вими тензорезисторами. Такий вимірювальний перетворювач складається із круглої металевої мембрани, в якій на одну з поверхонь наносяться чотири однакові фольгові тензорезистори, що з'єднані за мостовою схемою і розміщуються таким чином, що при деформації мембрани під дією тиску два тензорезистори працюють на розтяг, а два інші – на стиск. Як матеріал фольгового тензорезистора взято сплав з мінімальним температурним коефіцієнтом опору.

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

Цей метод є універсальним, дає можливість скорегувати не лише похибки нелінійності вимірювального каналу і додаткові похибки, але й похибки, пов'язані з впливом завад загального виду через опір заземлення, який спонукає зв'язок між вимірювальними каналами основного та дестабілізуючого фактора.

До недоліків цього методу можна віднести значний обсяг обчислень, який різко зростає при збільшенні порядку апроксимуючих поліномів [3, 12].

Формулювання мети. Метою є розробка способу та засобу вимірювань напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчика, вільного від зазначених вище недоліків.

Виклад основного матеріалу. Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є:

- випадкові процеси (шуми, перепади 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 при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки.

При статичних вимірюваннях основна вимога зводиться до отримання лінійної залежності між вхідною і вихідною величинами перетворювача.

Залежність «вхід-вихід» вимірювальних приладів без урахування 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; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – градувальні коефіцієнти.

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика в багатьох практичних задачах є не менш важливим за вплив навантаження і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. При зміні температури навколишнього середовища виникають чотири ефекти, що здатні змінити функціональні характеристики датчика [5]:

1) зміна тензочутливості металевго сплаву S_A ;

2) подовження або скорочення решітки датчика ($\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$);

3) подовження або скорочення зразка ($\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T$);

4) зміна опору датчика ($\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T$).

Тензочутливість S_A одного з найбільш широко вживаних сплавів – константану – є лінійною функцією температури [5], де для константану $\Delta S_A / \Delta T$ становить 0,00735 % на 1 °C. У зв'язку з тим, що зміни S_A досить малі (менше 1 % для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), то при звичайному аналізі напружень вони не враховуються. Однак при дослідженні температурних напружень, коли систематично спостерігають-

ся перепади температури $\sim 10^2^\circ\text{C}$, необхідно враховувати зміни S_A . При цьому найбільш суттєвими є другий, третій та четвертий ефекти, що викликають зміну опору датчика з температурою ($\frac{\Delta R}{R}$) $_{\Delta T}$ 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 $\varepsilon_T = (\beta - \alpha) \Delta T$, що викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ε_T так само, як і на деформацію зразка ε , зумовлену навантаженням, що породжує компоненту вихідного сигналу, що відповідає температурі [5].

При 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 дорівнюють нулю, або взаємно знищуються.

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

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

- мати високий питомий опір, що дає можливість виготовляти малобазні тензорезистори з досить великим опором;
- володіти високою і стабільною чутливістю до деформацій;
- зміни опору, викликані деформацією, повинні підпорядковуватися лінійному закону в достатньо широкому діапазоні;

– бути нечутливими до впливу температури, тобто температурний коефіцієнт опору повинен бути близьким до нуля;

– термоЕРС в парі з міддю повинна бути якомога меншою, що дуже важливо при живленні тензорезисторів постійним струмом;

– температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу проволочки і матеріалу досліджуваної деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятися, в іншому випадку зміни температури будуть викликати уявну деформацію і, отже, створювати похибки при вимірах;

– не мати гістерезису;

– володіти технологічністю, що дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;

– мати високе відношення межі пропорційності до модуля пружності;

– сплави, що застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окиснювальному впливу зовнішнього середовища.

Що стосується константану, то нині більшість тензорезисторів виготовляється з цього сплаву через наступні його переваги [5, 6, 10]:

– сталість коефіцієнта тензочутливості в досить широкому діапазоні деформацій (до 8 %);

– у відпаленому стані константан може бути використаний при вимірюванні деформацій до 20 %; проте в цьому випадку у константану проявляється зміна початкового опору, що свідчить про систематичну зміну опору при кожному циклі навантаження;

– відсутність істотних змін при переході від пружного деформування до пластичного;

– константан володіє високим питомим опором ($\rho = 0,49 \text{ мОм/м}$);

– константан володіє високою температурною стабільністю;

– можливість створення температурно-компенсованих тензодатчиків шляхом узгодження коефіцієнта температурного розширення датчика з аналогічним параметром технічного матеріалу (в діапазоні від 0 до $100 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$).

Зазвичай тензорезистори виготовляються з м'якого відпаленого константану. Основними його недоліками є [5, 6, 10]:

– низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);

– значна термоЕРС у парі з міддю (близько $47 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$). Правда, останній недолік позначається лише при живленні тензо-

моста постійним струмом при наявності різниці температур між выводами.

Слід зазначити, що датчики із вибірко-вих плавлень не є повністю компенсованими в широкому діапазоні температур через наявність нелінійних членів рівняння (2). Типові датчики із вибірко-вих плавлень виявляють наявність похибки, яка змінюється зі зміною температури [5].

Дослідженнями [5] встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів у межах 24°C , є досить малою (менша $0,5 \text{ мкм/м}^\circ\text{C}$). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З 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 константану.

Таблиця 1 – Табульоване значення похибки для константану на основі [5]

Температура T , $^\circ\text{C}$	Відносна похибка вимірювання для константану, оvd
-75	-500
-50	-266
-25	-89
0	-13,5
+25	0
+50	-6
+75	-50
+100	-100
+125	-135
+150	-95
+175	-20
+200	+90
+225	+210
+250	+450

За допомогою пакета NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома. Отримано наступні дані (див. табл. 2).

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

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

де θ^2 – сума квадратів нев'язок; n – кількість результатів вимірювань; δ_{nom} – номінальна деформація пружини, овд.

Таблиця 2 – Таблиця поліноміальних коефіцієнтів

Порядок полінома	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	-16,4277781	1,5921428	-0,046261	0,0002543	-2,6037*10 ⁻⁷						2827,9491538	0,75
V	-15,0129174	1,8995044	-0,048572	0,0002015	2,6784*10 ⁻⁷	-1,20735*10 ⁻⁹					2227,5429176	0,65
VI	-6,3200432	2,0483683	-0,0579458	0,000209	1,5*10 ⁻⁶	-1,00141*10 ⁻⁸	1,67747*10 ⁻¹¹				1498,0882269	0,5
VII	-14,2274504	2,3282625	-0,0484233	0,0000271	8,25445*10 ⁻⁷	1,39213*10 ⁻⁸	-1,10787*10 ⁻¹⁰	2,08264*10 ⁻¹³			849,1320204	0,4
VIII	-13,276337	1,7345866	-0,0467915	0,0003704	-2,07862*10 ⁻⁶	-1,59733*10 ⁻⁸	3,56472*10 ⁻¹⁰	-1,80145*10 ⁻¹²	2,87103*10 ⁻¹⁵		210,7311456	0,2
IX	-16,29822	1,5277609	-0,0378965	0,0004673	-6,14724*10 ⁻⁶	-3,43268*10 ⁻⁹	7,43916*10 ⁻¹⁰	-5,748*10 ⁻¹²	1,70738*10 ⁻¹⁴	-1,80353*10 ⁻¹⁷	97,2128335	0,14

Висновки. Як видно з таблиць, у широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок з порядком полінома. У майбут-

ньому є потреба в детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур.

Список літератури

1. Кузьмич Л. В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин. *Вісник Інженерної Академії України*. Київ, 2016. № 2. С. 180–184.
2. Kuzmych L.; Kobylanskyi 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., Кузьмич Л. В., Квасніков В. П. Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками. *Метрологія та прилади*. Харків, 2019. № 1. С. 31–36.
4. Erb K., Fisher P. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuehlern. *Bulletin SEV/VSE*. 1989. 80. № 7, 8. P. 365–368.
5. Экспериментальная механика: монография в 2 кн. / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. Москва: Мир, 1990. Кн. 1. 552 с.
6. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
7. Серьезнов А. Н., Шашурин А. К. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте. Москва: Изд-во МАИ, 1990. 200 с.
8. Уикзер Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы. *Датчики и системы*. 2002. № 10. С. 50–55.
9. Rus G., Lee S. Y., Chang S. Y., Wooh S. C. Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 68. Issue 7. P. 707–727; doi: 10.1002/nme.1720.
10. Harada T., Ishikawa N., Kanda T., Suzumori K., Yamada Y., Sotowa K. Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009. Vol. 155. Issue 1. P. 168–174.
11. Schroder A., Rautenberg J., Henning B. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization. *Physics Procedia*. 2010.

Vol. 3. Issue 1. P. 1003–1009; doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

References

1. Kuzmych, L. V. (2016). Modern trends in the creation of instrumentation systems for measuring mechanical quantities. *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*. Kyiv, No. 2, pp. 180–184 [in Ukrainian].
2. Kuzmych, L.; Kobylanskyi, O.; Duk, M. (2018). 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. Ornatskyi, D. P., Kuzmych, L. V., Kvasnikov, V. P. (2019). Simulation of the analog interface for remote measurements using multiplexer and resistive strain gauges. *Metrolohiia ta prylady*. Kharkiv, No. 1, pp. 31–36 [in Ukrainian].
4. Erb, K., Fisher, P. (1989). Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuehlern. *Bulletin SEV/VSE*, 80, No. 7, 8, pp. 365–368.
5. Experimental mechanics (1990): monograph in 2 books. In A. Kobaiasi (Ed.). Moscow: Mir, book 1, 552 p. [in Russian].
6. Mekheda, V. A. (2011). Strain gauge method for strain measurement: manual. Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 56 p. [in Russian].
7. Seryeznov, A. N., Shashurin, A. K. (1990). Methods and measurement tools in the strength experiment. Moscow: Izd-vo MAI, 200 p. [in Russian].
8. Uikzer, J. (2002). Connectivity: intelligent sensors or intelligent interfaces. *Datchiki i sistemi*, No. 10, pp. 50–55 [in Russian].
9. Rus, G., Lee, S. Y., Chang, S. Y., Wooh, S. C. (2006). Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 68, Issue 7, pp. 707–727; doi: 10.1002/nme.1720.
10. Harada, T., Ishikawa, N., Kanda, T., Suzumori, K., Yamada, Y., Sotowa, K. (2009). Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate. *Sensors and*

Actuators A: Physical, Vol. 155, Issue 1, pp. 168–174; doi: 10.1016/j.sna.2009.08.007.
11. Schroder, A., Rautenberg, J., Henning, B. (2010). Evaluation of cost functions for FEA

based transducer optimization. *Physics Procedia*, Vol. 3, Issue 1, pp. 1003–1009; doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

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

DEVELOPMENT OF THE METHOD AND MEANS OF THE MEASUREMENT OF STRESS-STRAIN STATE BY A STRAIN GAUGE

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

The method of digital compensation, which provides a more significant reduction in the errors of measuring transducers compared with the method of analog compensation has been described. Features and technical indicators of this method are considered on the example of measuring pressure transducer with foil strain gauges.

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

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

The aim of the paper is to develop a method and means of measuring stress-strain state using strain gauge, free from the above mentioned shortcomings.

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

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

We have 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 approximation error on the order of approximating polynomial has been determined.

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

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