

Л. В. КУЗЬМИЧ, Д. П. ОРНАТСЬКИЙ, В. П. КВАСНИКОВ

Національний авіаційний університет, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

У статті розроблено принципи побудови, проектування та математичного моделювання вимірювання деформацій і напружень складних технічних конструкцій, що мають широке застосування у відповідальних галузях промисловості, зокрема в авіації та ракетобудуванні, за допомогою тензорезисторів та тензодатчиків з урахуванням дестабілізуючих факторів, що дає змогу суттєво зменшити рівень похибок по відношенню до існуючих методів вимірювання та відомих аналогів.

Було проаналізовано вплив основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій за допомогою тензодатчиків, серед яких одними з найвагоміших є впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів. Встановлено, що вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика є не менш важливим за вплив навантаженням і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. Що стосується систематичних складових, то найбільш вагомими при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки.

На основі аналізу впливу основних дестабілізуючих факторів, що впливають на фізико – механічні властивості матеріалу тензодатчиків, було виокреслено основні вимоги до матеріалу тензорешіток.

Для дослідження було взято два основні сплави, що мають на сьогоднішній день найбільш широке застосування в якості матеріалу для тензорешіток – це константан та карма. Для даних матеріалів було встановлено переваги та недоліки у застосуванні їх в якості тензорешіток, а також було досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами.

За допомогою пакету NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному. Встановлено, що середньоквадратичне значення похибки в широкому температурному діапазоні як для константану, так і для карми має слабкий зв'язок з порядком поліному. Постає потреба у майбутньому детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур, наприклад в межах від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключові слова: засіб вимірювання; деформація; напруження; тензодатчик; температурна складова похибки; поліноміальний коефіцієнт; константан; карма.

Вступ

Найбільш поширеним засобом вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій, що мають широке застосування у відповідальних галузях промисловості, зокрема в авіації та ракетобудуванні, на сьогоднішній день є тензодатчики та тензорезистори. Як правило, тензорезистори підключаються до приладової системи вимірювання за мостовою схемою, забезпечує усунення систематичних помилок вимірювання і компенсацію температурних деформацій. Переваги та недоліки їхнього застосування для зазначеної мети досить добре відомі [1-3].

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення яких, як правило, є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів,

основним з 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 [4-6].

Аналіз останніх досліджень

Аналіз різноманітних вимірювальних перетворювачів, у тому числі тензорезисторних, показує, що основні складові їхніх похибок створені внаслідок

впливу кліматичних факторів, зокрема температури. Впливи шумів можуть бути значно знижені звуженням робочої смуги частот вимірювальних перетворювачів, а дрейф і старіння – враховані відповідними градуваннями [6-8].

Для зниження температурної похибки тензорезисторних вимірювальних перетворювачів найбільш практичне застосування мають аналогові компенсаційні пристрої, що передбачають застосування додаткових температурнозалежних резисторів. В [4], наприклад, описано метод цифрової компенсації, що забезпечує більш значне зниження (на порядок) похибок вимірювальних перетворювачів в порівнянні з методом аналогової компенсації. Особливості і технічні показники даного методу розглядаються на прикладі вимірювального перетворювача тиску з фольговими тензорезисторами. Такий вимірювальний перетворювач складається із круглої металевої мембрани, в якій на одній із поверхонь наносяться чотири однакових фольгових 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 інших – на стиск. В якості матеріалу 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 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 з 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 при збільшенні порядку апроксимуючих поліномів [9-11].

Формулювання мети

Метою є оптимізація способів та засобів вимірювань напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчиків, вільних від зазначених вище недоліків.

Виклад основного матеріалу

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика в багатьох практичних задачах є не

менш важливим за вплив навантаженням і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. При зміні температури навколишнього середовища виникає чотири ефекта, що здатні змінити функціональні характеристики датчика [5]:

1. Зміна тензочутливості металевого 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 двох найбільш широко вживаних сплавів (константан та карма) є лінійною функцією температури [5], де для константана $\Delta S_A / \Delta T$ складає 0,00735 %, а для карми - 0,00975% на 1 °C. У зв'язку з тим, що зміни S_A досить малі (менше 1 % для $\Delta T = 100$ °C), то при звичайному аналізі напружень вони не враховуються. Однак при дослідженні температурних напружень, коли систематично спостерігаються перепади температури $\sim 10^2$ °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:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)\Delta T = (\beta - \alpha)S_g \Delta T + \gamma \Delta T, \quad (1)$$

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 в тепловому розширенні матеріалів датчика і зразка призводить до механічних деформацій решітки датчика $\epsilon_T = (\beta - \alpha)\Delta T$, що викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ϵ_T так само, як і на деформацію зразка ϵ , зумовленої 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 (1), оскільки перший член дорівнюватиме нулю. Температурна

компенсація датчика досягається лише за умови, коли обидва члени рівняння (1) або рівні нулю, або взаємно знищуються.

Величини α і γ є досить чутливими до вмісту сплаву та режиму його холодної обробки в процесі прокатки 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 дозволяє підбирати датчики, що виготовлені на базі константану та карми, які застосовуються до різноманітних конструкційних матеріалів.

Матеріали для тензорешіток повинні відповідати певним вимогам [6-8].

Що стосується константану, то в даний час більшість тензорезисторів виготовляється з цього сплаву в силу наступних його переваг [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 константана 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 ($\rho = 0,49$ мкОм / 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 константана. Основними його недоліками є [5, 6, 10]:

- низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);
- значна термоЕРС в парі з міддю (близько 47 мкВ/°С). Правда, останній недолік позначається лише при живленні тензомоста постійним струмом при наявності різниці температур між выводами.

Що стосується карми, то в порівнянні з константаном даний сплав володіє трьома перевагами [5, 6, 10]:

- він може бути температурно компенсований в більш широкому діапазоні температур;

- нікельхромова основа сплаву карма забезпечує тензодатчикам значніші характеристики втоми;

- сплав проявляє високу тимчасову стабільність і тому кращий при вимірюванні статичних деформацій впродовж тривалих періодів часу - від кількох місяців до кількох років.

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

Слід зазначити, що датчики із вибірових плавлень не є повністю компенсованими в широкому діапазоні температур через присутність нелінійних членів рівняння (2). Типові датчики із вибірових плавлень виявляють присутність похибки, яка змінюється зі зміною температури [5, 11].

Дослідженнями [5, 9] встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів в межах 24°C , є досить малою (менше $0,5$ мкм/м $^\circ\text{C}$). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З цієї 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.

В таблиці 1 наведено значення похибки в температурному режимі від -75°C до $+250^\circ\text{C}$ для константана та карми.

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

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

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

де θ^2 – сума квадратів нев'язок; n – кількість результатів вимірювань; $\sigma_{\text{ном}}$ – номінальна деформація пружини, оvd.

Висновки

Як видно з таблиці 2 та таблиці 3, середньоквадратичне значення похибки в широкому температурному діапазоні як для константану, так і для карми має слабкий зв'язок з порядком поліному.

Таблиця 1
Табуюване значення похибки для сплавів константану та карми [5]

Температура Т, °С	Відносна похибка вимірювання для константану, оvd	Відносна похибка вимірювання для карми, оvd
-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
+200	+90	0
+225	+210	-40
+250	+450	-90

Постає потреба у майбутньому детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур, наприклад в межах від -50°С до +100°С.

Література (ДСТУ 7.1:2006)

1. Кузьмич, Л. В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л. В. Кузьмич // Вісник Інженерної Академії України. – 2016. – № 2. – С. 180-184.
2. Kuzmich, L. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems [Text] / L. Kuzmich, O. Kobylanskyi, M. Duk // 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. – 2019. – № 1. – С. 31-36.
4. Erb, K. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern [Text] / K. Erb,

P. Fisher // Bulletin SEV/VSE. – 1989. – Vol. 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 [Текст] : 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. Шауруин. – М. : Изд-во МАИ, 1990. – 200 с.

8. Fatigue reliability assessment for orthotropic steel deck details under traffic flow and temperature loading [Text] / Ya. Liu, H. Zhang, Yo. Liu, Y. Deng, N. Jiang, N. Lu // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 71. – P. 179–194. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.11.007

9. 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.

10. 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. DOI: 10.1016/j.sna.2009.08.007.

11. Schroder, A. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schroder, J. Rautenberg, B. Henning // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 1003-1009. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

References (BSI)

1. Kuzmich, L.V. Modern trends in the creation of instrumentation systems for measuring mechanical quantities. Visnyk Inzhenernoї Akademii Ukrainy, 2016, no. 2, pp. 180-184 (in Ukrainian).
2. Kuzmich, 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. Ornatskyi, D. P., Kuzmich, L. V., Kvasnikov, V. P. Simulation of the Analog Interface for Remote Measurements Using Multiplexer and Resistive Strain Gauges. Metrolohiia ta prylady – Metrology and instruments, 2019, no. 1, pp. 31-36 (in Ukrainian).
4. Erb, K., Fisher, P. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern. Bulletin SEV/VSE, 1989, vol. 80, no.7, 8, pp. 365-368.

Таблица 2

Таблица поліноміальних коефіцієнтів для константана

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a_0	-16,4277781	-15,0129174	-6,3200432	-14,2274504	-13,276337	-16,29822
a_1	1,5921428	1,8995044	2,0483683	2,3282625	1,7345866	1,5277609
a_2	-0,046261	-0,048572	-0,0579458	-0,0484233	-0,0467915	-0,0378965
a_3	0,0002543	0,0002015	0,000209	0,0000271	0,0003704	0,0004673
a_4	$-2,6037 \cdot 10^{-7}$	$2,6784 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$8,25445 \cdot 10^{-7}$	$-2,07862 \cdot 10^{-6}$	$-6,14724 \cdot 10^{-6}$
a_5		$-1,20735 \cdot 10^{-9}$	$-1,00141 \cdot 10^{-8}$	$1,39213 \cdot 10^{-8}$	$-1,59733 \cdot 10^{-8}$	$-3,43268 \cdot 10^{-9}$
a_6			$1,67747 \cdot 10^{-11}$	$-1,10787 \cdot 10^{-10}$	$3,56472 \cdot 10^{-10}$	$7,43916 \cdot 10^{-10}$
a_7				$2,08264 \cdot 10^{-13}$	$-1,80145 \cdot 10^{-12}$	$-5,748 \cdot 10^{-12}$
a_8					$2,87103 \cdot 10^{-15}$	$1,70738 \cdot 10^{-14}$
a_9						$-1,80353 \cdot 10^{-17}$
$\sum \theta^2$	2827,9491538	2227,5429176	1498,0882269	849,1320204	210,7311456	97,2128335
$\sigma_{[\%]}$	0,75	0,65	0,5	0,4	0,2	0,14

Таблица 3

Таблица поліноміальних коефіцієнтів для карми

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a_0	-59,4985896	-59,2890159	-59,4350495	-60,8352669	-61,1024734	-62,4482056
a_1	2,3378146	2,383342	2,3808412	2,430404	2,5971917	2,5050862
a_2	-0,0073338	-0,0076761	-0,0075186	-0,0058324	-0,0062909	-0,0023297
a_3	-0,0000311	-0,0000389	-0,000039	-0,0000712	0,0001677	-0,0001245
a_4	$8,45742 \cdot 10^{-8}$	$1,62815 \cdot 10^{-7}$	$1,416 \cdot 10^{-7}$	$1,67130 \cdot 10^{-8}$	$8,32583 \cdot 10^{-7}$	$-9,79289 \cdot 10^{-7}$
a_5		$-1,78836 \cdot 10^{-10}$	$-3,08899 \cdot 10^{-11}$	$4,20751 \cdot 10^{-9}$	$1,26061 \cdot 10^{-8}$	$1,81908 \cdot 10^{-8}$
a_6			$-2,81803 \cdot 10^{-13}$	$-2,28700 \cdot 10^{-11}$	$-1,54142 \cdot 10^{-10}$	$1,83977 \cdot 10^{-11}$
a_7				$3,68788 \cdot 10^{-14}$	$6,0149 \cdot 10^{-13}$	$-1,15602 \cdot 10^{-12}$
a_8					$-8,06588 \cdot 10^{-16}$	$5,51833 \cdot 10^{-15}$
a_9						$-8,03164 \cdot 10^{-18}$
$\sum \theta^2$	401,7717577	388,5985531	388,3926909	368,043922	317,6564148	295,1436973
$\sigma_{[\%]}$	0,28	0,27	0,27	0,265	0,247	0,24

5. *Experimental mechanics*. Monografia v 2 kn: Kn. 1 / per. s angl.; pod red. A. Kobaiasi. – Moscow, Mir Publ., 1990. 552 p. (in Russian).
6. Mekheda, V. A. *Strain gauge strain measurement. Manual*. Samara, Yzd-vo Samar. hos. aerokosm. un-ta Publ., 2011. 56 p. (in Russian).
7. Sereznov, A. N., Shashurin, A. K. *Methods and measurement tools in the strength experiment*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 1990. 200 p. (in Russian).
8. Liu, Ya., Zhang, H., Liu, Yo., Deng, Y., Jiang, N., Lu, N. Fatigue reliability assessment for orthotropic steel deck details under traffic flow and temperature loading. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 71, pp. 179–194. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.11.007
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, iss. 7, pp. 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, iss. 1, pp. 168–174. DOI: 10.1016/j.sna.2009.08.007.
11. Schroder, A., Rautenberg, J., Henning, B. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization. *Physics Procedia*, 2010, vol. 3, iss. 1, pp. 1003–1009. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

Надійшла до редакції 4.06.2019, розглянута на редколегії 12.06.2019

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Л. В. Кузьмич, Д. П. Орнатский, В. П. Квасников

В статье разработаны принципы построения, проектирования и математического моделирования измерения деформаций и напряжений сложных технических конструкций, которые имеют широкое применение в таких ответственных отраслях, как авиация и ракетостроение, с помощью тензорезисторов и тензодатчиков с учетом дестабилизирующих факторов, что позволяет существенно уменьшить уровень погрешностей по отношению к существующим методам измерения и известных аналогов.

Было проанализировано влияние основных дестабилизирующих факторов, ограничивающих точность измерения напряженно-деформированного состояния сложных технических конструкций с помощью тензодатчиков, среди которых одними из наиболее значимых является влияние внешних климатических и механических факторов. Установлено, что влияние колебаний температуры на конструкцию тензодатчика есть не менее важным за влияние нагрузкой и является важным фактором, который способен изменить сопротивление тензорезистора. Что касается систематических составляющих, то наиболее весомыми при статистических измерениях являются погрешности нелинейности и температурная составляющая погрешности.

На основании анализа влияния основных дестабилизирующих факторов, влияющих на физико-механические свойства материала тензодатчиков, были сформулированы основные требования к материалу тензорешеток.

Для исследования были взяты два основных сплава, имеющие на сегодняшний день наиболее широкое применение в качестве материала для тензорешеток - это константан и карма. Для данных материалов были установлены преимущества и недостатки в применении их в качестве тензорешеток, а также было исследовано влияние диапазона изменения температур, разброса значений температурной погрешности на средне-квадратическое значение погрешности аппроксимации степенными полиномами.

С помощью пакета NUMERY была определена зависимость погрешности аппроксимации от порядка аппроксимирующего полинома. Установлено, что среднее значение погрешности в широком температурном диапазоне как для константана, так и для кармы слабо связано с порядком полинома. Возникает потребность в будущем детальном исследовании поведения полиномиальных коэффициентов для наиболее применяемого диапазона температур, например в пределах от -50 °C до +100 °C.

Ключевые слова: средство измерения; деформация; напряжение; тензодатчик; температурная составляющая погрешности; полиномиальный коэффициент; константан; карма.

OPTIMIZATION OF OF THE INSTRUMENTS OF THE MEASUREMENT OF A STRESSED-DEFORMED STATE BY TENSORS

L. Kuzmich, D. Ornatskiy, V. Kvasnikov

In the article, the principles of construction, design and mathematical modeling of deformation and stresses of complex technical constructions are developed with the help of strain gauges and strain gauges taking into account destabilizing factors, which allows to significantly reduce the level of errors in relation to existing measurement methods and known analogs.

The method of digital compensation 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 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.).

The influence of the main destabilizing factors limiting the accuracy of the measurement of the stress-strain state of complex technical constructions with the help of strain gauges was analyzed, among which the influences of external climatic and mechanical factors are one of the most important ones. Regarding the systematic components, the most important in statistical measurements are the errors of nonlinearity and the temperature component of the error.

For the study, two main alloys were taken, which today has the widest use as a material for strain gauges – it is constantan and karma. For these materials, the influence of the range of temperature changes, the spread of the values of temperature error on the mean-square value of the error of approximation by power polynomials was investigated.

Using the NUMERY package, the dependence of the approximation error on the order of the approximating polyphony was determined. It is established that the mean square error value in the wide temperature range for both constantan and karma has a weak correlation with the order of a polynomial.

Keywords: means of measurement; deformation; stress; strain gauge; temperature component of error; polynomial coefficient; constantan; karma.

Кузьмич Людмила Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Орнатський Дмитро Петрович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Квасніков Володимир Павлович – д-р техн. наук, професор, Заслужений метролог України, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Lyudmyla Kuzmych – PhD, Associate Professor, Postdoctoral Fellow of the Department of the computerized electrotechnical systems and technologies, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: klv@nau.edu.ua ORCID Author ID: 0000-0003-0727-0508.

Dmytro Ornatskyi – Doctor of Science, Professor, Professor, Head of the Department of Information and Measurement Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: odp@nau.edu.ua.

Volodymyr Kvasnikov – Doctor of Science, Professor, Honored Metrologist of Ukraine, Head of the Department of the computerized electrotechnical systems and technologies, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kvp@nau.edu.ua.