

УДК 623.004.67

М.М. Калініна, А.М. Науменко, І.П. Ольшевський

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТОНКОПЛІВКОВИХ ТЕНЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

В статті розглянуті методи будови тонкопліткових термокомпенсаційних тензоперетворювачів та вплив їх характеристик на функцію перетворення сили в електричний сигнал.

**Ключові слова:** термокомпенсація, тензоперетворювач, технічний ефект, сила.

### Вступ

**Постановка задачі.** Впровадження новітніх технологій при проектуванні вагових приладів з метою управління технологічними процесами значно підвищує ефективність вимірювально-інформаційних систем. Використання тонкопліткових тензорезисторів в якості чутливого елемента перетворювачів сили в електричний сигнал впливає на точність цих перетворювачів, що підтверджує актуальність статті.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1–5] визначаються теоретичні основи технічних вимірювань, їх оцінювання, розглянуті принципи побудови засобів вимірювальної техніки та їх раціонального використання для вимірювання неелектричних величин, але в цій літературі не визначається питання пов'язані з дослідженням створення тонкопліткових термокомпенсаційних тензоперетворювачів.

**Метою статті** є аналіз методів будови тонкопліткових термокомпенсаційних тензоперетворювачів сили та визначення впливу їх функції перетворення на точність ваговимірювальних приладів.

### Основний матеріал

Створення прицелів мікроелектронних перетворювачів сили в електричний сигнал – це одне з найперспективніших сучасних напрямків розвитку вагових пристроїв.

У якості цих перетворювачів здебільше використовуються тензоперетворювачі.

Як відомо основною характеристикою чутливості матеріалу до механічної деформації є коефіцієнт відносної тензочутливості  $k$ , що визначається як відношення відносної зміни опору до відносного видовження провідника.

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_\ell} = \frac{\Delta R/R}{\Delta \ell/\ell}.$$

Оскільки опір провідника з питомим електричним опором  $\rho$ , завдовжки  $l$  та поперечного перерізу  $S$  дорівнює:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

то відносна зміна опору, викликана деформацією провідника під дією рівномірного механічного напруження  $\sigma$

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial \sigma}.$$

При кінцевих приростах напруження  $\sigma$  відносна зміна опору

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}.$$

При деформації твердих тіл зміна їх довжини пов'язана зі зміною об'єму. В зоні деформацій для кожного матеріалу їх відношення є величиною сталою і характеризується коефіцієнтом Пуассона  $\mu = -\Delta d/\Delta l$ , де  $\Delta d = \Delta d/d$  (тут  $d$  – діаметр провідника круглого перерізу чи поперечний розмір провідника квадратного перерізу).

Враховуючи, що

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{S} = -\mu \frac{\Delta l}{l},$$

вираз для коефіцієнта відносної тензочутливості запишемо

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta \ell/\ell} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta \ell/\ell}.$$

У деяких металів питомий електричний опір не змінюється під дією механічних деформацій.

Тоді можна вважати, що коефіцієнт  $k$  дорівнює  $1+2\mu$ . Однак, в загальному випадку коефіцієнт тензочутливості провідника має складову, яка визначається зміною питомого електричного опору, але є незначною і може бути як додатною, так і від'ємною. Для металів коефіцієнт тензочутливості становить (коефіцієнт Пуассона лежить у межах 0,24...0,40).

Для того, щоб у матеріалі чутливого елемента тензорезистора не відбулися необоротні зміни внаслідок великих механічних напружень, допустиме

значення напружені, у них по повинно перевищувати 20...30% границі пружності.

Оскільки значення відносної деформації  $\Delta l/l$  у межах пружних властивостей матеріалу не перевищує  $(2,0...2,5)10^{-3}$ , то при  $k=0,5...4$  відносна зміна опору  $\Delta R/R=(1,0...0,8)10^{-2}$ , тобто не перевищує 1%. При таких незначних змінах опору від вимірюваної величини чутливі елементи тензорезисторів повинні відрізнятися дуже високою стабільністю опору в часі, мати незначний ТКО.

Для напівпровідникових тензорезисторів коефіцієнт тензочутливості визначається, головним чином, зміною питомого електричного опору

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta \ell/\ell} \approx m = \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta \ell/\ell}.$$

Значення  $k$  для напівпровідникових тензорезисторів залежить також від типу провідності і досягає 150...200. У напівпровідниках  $n$ -типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках  $p$ -типу – додатний. На відміну від провідникових тензорезисторів, коефіцієнт тензочутливості напівпровідникових тензорезисторів значною мірою залежить від значення та знака деформації, а також від температури.

Для плівкового тензорезистора, що встановлений на вільно розширюючому зразкові з заданим коефіцієнтом лінійного розширення, температурна характеристика в невеликому інтервалі температур описується рівнянням:

$$(\Delta R/R)_2 = a(t - t_n) + (\beta_m - \beta_\chi) K_{\text{ПР}}(t - t_n), \quad (1)$$

де  $a$  – температурний коефіцієнт опору (ТКО) плівкового елемента;

$\beta_m$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу зразка (деталі), на який встановлений тензорезистор;

$\beta_\chi$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення чутливого елемента (ЧЕ) тензорезистора;

$t_n, t$  – початкове та кінцеве значення діапазону температур;

$K_{\text{ПР}}$  – коефіцієнт перетворення деформації ЧЕ.

Температурний приріст опору тензорезистора може дорівнювати нулю при умові дорівнювання нулю правої частини рівняння (1), тобто будемо мати такий вираз:

$$A = -(\beta_m - \beta_\chi) K_{\text{ПР}}, \quad (2)$$

Рівняння (2) використовують як критерій підгонки, яку виконують віджигом тензорезистора при відповідній температурі.

Такий спосіб підгонки складається у зміні (збільшенні густини) структури матеріалу плівкового

ЧЕ. Процес віджигу триває протягом декількох годин в термокамері. Контролювати та вимірювати цей параметр під час віджигу доволі важко внаслідок обмеженого доступу до термокамери.

Вихід із створеної ситуації можливо знайти шляхом створення плівкових (тонкоплівкових) структур як композиції резисторних плівок з двома або декількома матеріалами. Кількість резисторних елементів та вид їх електричного з'єднання будуть визначати повний опір та ТКО отриманої плівкової структури. Співвідношення між опорами та ТКО тонкоплівкових резисторів, з'єднаних паралельно, мають вигляд:

$$R_1/R_2 = (a_1 - a_0)/(a_0 - a_2), \quad (3)$$

де  $R_1, R_2$  і  $a_1, a_2$  – опори та ТКО першого та другого елементів тонкоплівкової резисторної структури,  $a_0$  – ТКО інтегрального тонкоплівкового резистора з опором  $R_0$ , отриманого в результаті паралельного з'єднання резисторів  $R_1$  та  $R_2$  з ТКО  $a_1$  та  $a_2$ .

Для інтегрального значення опору, отриманого внаслідок послідовного з'єднання резисторів  $R_1$  та  $R_2$  справедливий вираз:

$$R_1/R_2 = (a_2 - a_0)/(a_0 - a_1), \quad (4)$$

При проведенні експерименту було визначено, що обираючи величину опору  $R_0$  тензорезистора, співвідношення  $R_1/R_2$ , тип резисторних матеріалів з визначеними значеннями ТКО  $a_1$  та  $a_2$ , а також спосіб з'єднання отриманих фотоліграфією чутливих тензоелементів на підложці, можливо використовувати співвідношення (3–4), підбираючи ТКО  $a_0$  інтегрального тензорезистора в широкому діапазоні значень для різноманітних матеріалів зразка з визначеними значеннями  $\beta_m$  (1–2).

Точне значення  $a_0$  можна отримати лазерною підгонкою опорів резисторів  $R_1$  та  $R_2$  тензочутливих елементів, використовуючи в режимі підгонки омметр, що підключається безпосередньо до клем резистора  $R_1$ , а потім до клем  $R_2$ .

## Висновки

1. Розглянутий варіант конструкції тонкоплівкового тензорезистора суттєво підвищує ефективність перетворення прицензійних мікроелектронних перетворювачів сили в електричний сигнал.

2. При розробці конструкції тонкоплівкового тензорезистора використовується лазерний метод підгонки, що підвищує стабільність ТКО.

3. Запропонований метод створення термокомпенсаційного тензоперетворювача дозволяє отримати

ти тензорезистори з заданим значенням номінального опору та ТКО, використовуючи при цьому лише один тип інтегральної топології.

4. Поліщук Є.С. *Методи та засоби вимірювання неелектричних величин: підручн.* / Є.С. Поліщук. – Львів: Видавництво "Бекід Біт", 2008. – 618с.

### Список літератури

1. Клоков Н.П. *Тензорезистори: Теорія, методики расчета, разработки* / Н.П. Клоков. – М: Машиностроение, 1990. – 224 с.

2. *Вимірювання температури: теорія та практика: підручн.* / Я.Т. Луцик, О.П. Гук, О.І. Лах, Б.І. Стаднік. – Львів: Видавництво "Бекід Біт", 2006. – 560 с.

3. *Засоби та методи вимірювання неелектричних величин.: підручн.* / Є.С. Поліщук, М.М. Дрожовець, Б.І. Стаднік, О.Ф. Івахів, Т.Г. Бойко, А. Ковальчик. – Львів: Видавництво "Бекід Біт", 2008. – 618 с.

Надійшла до редколегії 15.02.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.Б. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

М.М. Калинина, А.Н. Науменко, И.П. Ольшевский

*В статье рассмотрены методы создания тонкопленочных термокомпенсационных тензопреобразователей и влияние их характеристик на функцию преобразования силы в электрический сигнал.*

**Ключевые слова:** термокомпенсация, тензопреобразователь, технический эффект, сила.

### ANALYSIS OF METHODS OF DEVICE OF THIN-FILM TENSIOREFORMER

M. Kalinina, A. Naumenko, I. Olshevsky

*In the article the methods of creation are considered thin tape thermo compensation of tenzotransformers and influence of their descriptions on the function of transformation of force in a electrical signal.*

**Keywords:** thermo compensation, tenzotransformers, technical effect, force.