

$$W(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{10} \rho(t) \left\{ \mu(\omega_{mn}^2 - \omega^2) \left[ (k \cos \theta)^2 + \left( n \frac{\pi}{b} \right)^2 \right] \left[ (k \sin \theta)^2 + \left( m \frac{\pi}{a} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \times$$

$$\times \exp i \left\{ \omega t + k \left[ (b \cdot \delta) \cos \theta - a \sin \theta \right] + \frac{\pi}{2} + \text{tg} \varphi(t) \right\} \times$$

$$\times \left\{ \left[ S_1 m \frac{\pi}{a} \exp i k a \sin \theta - S_2 n \frac{\pi}{b} \exp i (k b \cos \theta) - S_1 S_2 \right] + \frac{m n}{a b} \right\} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b}.$$

где  $\text{tg} \varphi(t) = \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_{mn}} \sin \omega_{mn} t \right) \left( \cos \omega t - \cos \omega_{mn} t \right)^{-1}$ .

### Выводы

Из формулы (7) следует, что при наступлении равенства частот  $\omega_{mn}$  и  $\omega$  величина прогиба мембраны стремится к бесконечности и она становится «прозрачной».

Варьируя значения физико-механических характеристик можно установить желаемый режим упругого взаимодействия прямоугольной мембраны с волной избыточного давления.

### Література

1. Карачун В.В., Каюк Я.Ф., Мельник В.Н. Волновые задачи поплавкового гироскопа. –К.: Корнейчук, 2007. - 228 с..
2. Мельник В.Н., Карачун В.В. Нелинейные колебания в полиагрегатном подвесе гироскопа. –К.: Корнейчук, 2008. - 104 с.
3. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Унвер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Под пред. Э.И. Гречалюка. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

Панченко Р.Н. **Мембрана в акустичному середовищі**

Будується розрахункова модель пружної взаємодії прямокутної мембран з хвилею надлишкового тиску. Визначається закон згинного примусового руху залежно від фізико-механічних характеристик.

**Ключові слова:** мембрана, акустичне середовище

Panchenko R.N. **The diaphragm in acoustic medium**

The calculation model of resilient co-operation of rectangular is built membranes with the wave of surplus pressure. The law of the bend forced motion is determined depending on physics-mechanical descriptions.

**Keywords:** diaphragm, acoustic medium

Надійшла до редакції  
3 березня 2010 року

УДК 681.317

### КОРЕКЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОХИБКИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ВИМІРЮВАЧА ТИСКУ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ТЕРМОВПЛИВІ

Тихан М.О., Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

Показано, що термодформація корпусу вимірювача тиску є істотною причиною певної складової температурної похибки і запропоновано спосіб швидкодуючого коригування вихідного сигналу вимірювача виходячи з цієї похибки

**Ключові слова:** температура похибка, вимірювач тиску, корекція

## Вступ

У системах керування, чи контролю об'єктів енергетичного комплексу, аерокосмічній техніці, наукових дослідженнях тощо вимірювання тиску функціональних середовищ часто супроводжується впливом різкозмінної (нестационарної) температури [1-3]. Такий факт призводить до того, що результат вимірювання може мати суттєву (інколи до 60%) додаткову температурну похибку, причому динамічного характеру. Оскільки для систем автоматики і керування вкрай важливо підвищувати швидкодію і точність вимірювань, тому залишається актуальною проблема розроблення таких вимірювачів тиску, які б забезпечували швидкодіюче коригування похибки в умовах нестационарного термовпливу.

Для вимірювання тиску у згаданих умовах довели свою перспективність тензометричні вимірювачі (датчики) побудовані на базі технологій точної механіки і мікроелектроніки. Покладається, що у тензометричних вимірювачах первинною причиною додаткової температурної похибки є термомеханічні процеси у мембрані вимірювача [4]. Проте, як показують дослідження, суттєвий вплив на температурну похибку при нестационарному термовпливі мають взаємодія термопружних процесів у мембрані і корпусі вимірювача [5].

## Теоретичні аспекти

Конструктивна схема тензорезистивного вимірювача тиску містить циліндричний корпус, в якому жорстко защемлена мембрана, на якій спеціальними технологіями утворюють механо-електричні перетворювачі-тензорезистори (рис.1).

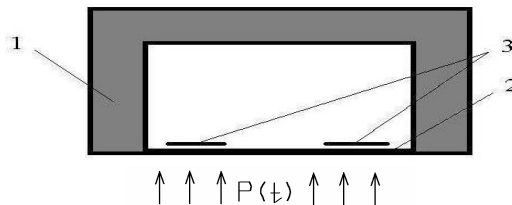


Рис. 1. Конструктивна схема типового тензорезистивного вимірювача тиску, де: 1-корпус, 2- мембрана, 3- тензорезистори

Відомо [4], що при дії нестационарної температури на жорстко закріплену мембрану у ній виникають термонапруження, а відповідні їм радіальні стискуючі (чи розтягуючі) зусилля визначаються з формули

$$N_r(t) = \frac{-E\lambda_{\text{л}}}{1-\nu} \frac{1}{R} \int_0^R \int_0^l T(r,z,t) dz dr \quad (1)$$

де  $E$  - модуль пружності,  $\lambda_{\text{л}}$  - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу мембрани,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона,  $R$  і  $l$  - радіус і товщина мембрани,  $T(r,z,t)$  - температурне поле у мембрані.

Нагадаємо, що температурне поле  $T(r, z, t)$  в круглій пластинці (мембрані) при теплообміні на зовнішній (контактній), внутрішній і боковій поверхнях за законом Ньютона описується рівнянням [4]

$$T(r, z, t) = T_n + T_{\text{дин}}(r, z, t) + T_{\text{уст}}(r, z) \quad (2)$$

де  $T_n$  - початкова температура мембрани;

$$T_{\text{дин}}(r, z, t) = -\frac{4\Delta T \cdot h_2}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Xi_1(z, \beta_m) \cdot e^{-\chi(\alpha_n^2 + \beta_m^2)t} \cdot \beta_m \cdot \Xi(r, \alpha_n)}{(\alpha_n^2 + \beta_m^2) \cdot \Xi_3(\beta_m)} \quad (3)$$

$$T_{\text{уст}}(r, z) = \frac{2\Delta T \cdot h_2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n \cdot ch(\alpha_n \cdot (l - z)) + h_1 \cdot sh(\alpha_n \cdot (l - z))}{\alpha_n \cdot ch(\alpha_n \cdot l) + h_1 \cdot sh(\alpha_n \cdot l)} \cdot \Xi(r, \alpha_n) \quad (4)$$

де  $h_1, h_2$  - нормовані коефіцієнти теплообміну на внутрішній і боковій поверхнях;  $\beta_m$  - корені рівняння  $ctg\beta_m l = -\frac{h_1}{\beta_m}$ ,  $\alpha_n$  - корені рівняння  $\alpha_n J_1(\alpha_n R) - h_2 J_0(\alpha_n R) = 0$ .

$$\Xi(r, \alpha_n) = \frac{J_0(\alpha_n r)}{(h_2^2 + \alpha_n^2) \cdot J_0(\alpha_n R)}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Xi_1(z, \beta_m) &= \beta_m \cdot \cos(\beta_m \cdot (l - z)) + h_1 \cdot \sin(\beta_m \cdot (l - z)), \\ \Xi_3(\beta_m) &= \beta_m \cdot l \cdot \sin(\beta_m \cdot l) - (1 + h_1 l) \cdot \cos(\beta_m \cdot l), \end{aligned} \quad (6)$$

Зазначимо, що зусилля  $N_r(t)$  доволі сильно впливає на динаміку мембрани і, таким чином, формує термопружну складову додаткової температурної похибки.

У роботі [6] запропоновано спосіб, який дозволяє практично у реальному часі коригувати вихідний сигнал вимірювача тиску відповідно до появи термонапружень у мембрані. Суть цього способу полягає у сумісному вимірювання тиску і температури поверхонь мембрани. За результатами вимірювання температури, використовуючи (1), можна розрахувати зусилля  $N_r(t)$ , які еквівалентні термонапруженням. Своєю чергою, як показують дослідження [5], при нестационарності термпливів термонапруження і відповідні їм зусилля  $N_r(t)$  з плином часу можуть зменшуватися, хоча значення додаткової похибки при цьому може зрости. Такий важливий факт пояснюється тим, що з плином часу зазнає термодформації і корпус вимірювача. Саме через настання радіальних термодформацій корпусу зменшуються зусилля  $N_r(t)$ , але тензорезистори, що розташовані на мембрані отримують додаткову деформацію, котра перетворюється ними у термодформативну складову вихідного сигналу. Така термодформація корпусу у місці закріплення мембрани ( $z = 0.0045$ , рис.2) може сягати  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  в.о., тому навіть попри зменшення значення зусиль  $N_r(t)$ , значення додаткової температурної похибки може зрости [5].

Розроблений у роботі [6] спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарної температури дозволяє коригування вихідного сигналу вимірювача відповідно до можливих зусиль  $N_r(t)$ . Проте у цьому способі не враховується можливість

термодеформацій корпусу і, відповідно, появу ще однієї складової температурної похибки вимірювача.

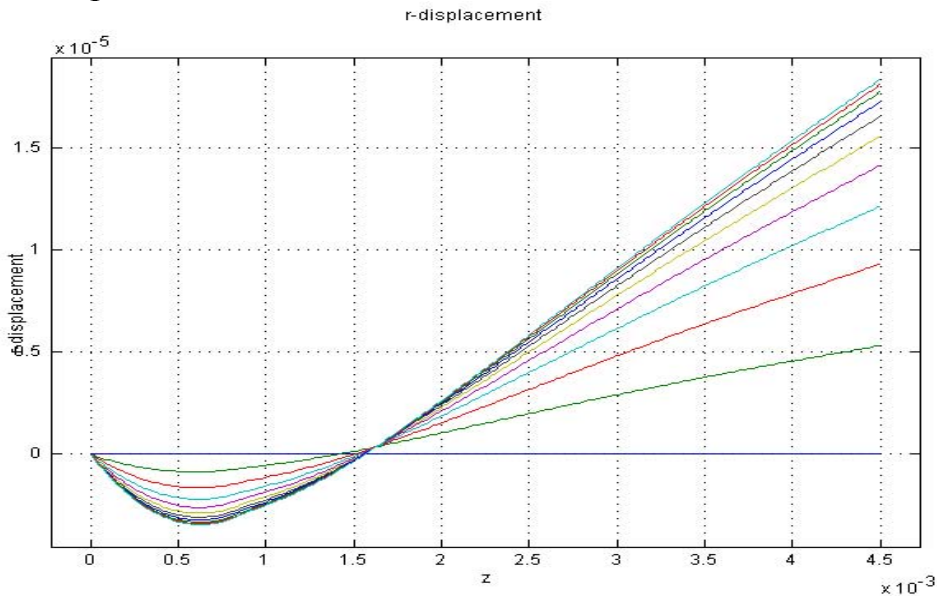


Рис.2. Динаміка радіальних термодеформацій по внутрішній твірній у стінці циліндричного корпусу вимірювача тиску при термоударі  $\Delta T = 400^{\circ}C$  (висота корпусу  $z = 0.0045$  м.; товщина стінки  $\delta = 0.002$  м.; внутрішній радіус(радіус мембрани)  $R = 0.005$  м; товщина мембрани  $l = 0.0002$  м)

Нехай з плином часу корпус разом з мембраною в зоні її защемлення зазнає радіальних термодеформацій  $\delta_k(t)$ . Тоді термонапруження в мембрані зміняться, а відповідні їм зусилля становитимуть

$$\tilde{N}_r(t) = \frac{\delta_k(t)lE}{R(1-\nu)} + N_r(t) = \frac{E\lambda_{\text{л}}}{R(1-\nu)} \left( \frac{\delta_k(t)l}{\lambda_{\text{л}}} - \int_0^R \int_0^l T(r,z,t) dz dr \right) \quad (7)$$

Саме це значення необхідно підставляти у формули, що описують значення власної частоти, статичного коефіцієнта перетворення і перетворюючої функції мембранного перетворювача. Таким чином буде врахована дія нестационарної температури на динаміку мембрани і відкоригована термопружна складова температурної похибки.

Після врахування дії термонапружень на перетворюючу функцію мембрани необхідно врахувати її термодеформацію, яку відчуватимуть тензорезистори, що на ній розташовані.

Для компенсації термофізичних процесів у самих тензорезисторах їх на мембрані розташовують у зонах рівних, але різнознакових деформацій, і у електричному колі вони підключаються у протилежні плечі містка Уїнстона.

Отже, при наявності радіальної термодеформації мембрани у зоні її закріплення  $\pm\delta_k(t)$  (+розтяг, – стиснення) сигнал з радіально розташованого на мембрані тензорезистора розтягу буде

$$U^+(t) = \zeta \left( \varepsilon_r^+(t) \pm \frac{\delta_k(t)}{R} \right), \quad (8)$$

а сигнал з тензорезистора стиснення становитиме

$$U^-(t) = \zeta \left( \varepsilon_r^-(t) \mp \frac{\delta_k(t)}{R} \right), \quad (9)$$

де  $\zeta$  - коефіцієнт перетворення електричного кола, в яке включені тензорезистори;  $\varepsilon_r^+(t)$  і  $\varepsilon_r^-(t)$  - відносні деформації розтягу і стиснення відповідних тензорезисторів при прогині мембрани від дії тиску;

Утворивши різницю цих сигналів, отримуємо термодформативну складову додаткової температурної похибки

$$\Delta U^0(t) = \varepsilon_r^+(t) \pm \frac{\delta_k(t)}{R} - \varepsilon_r^-(t) \pm \frac{\delta_k(t)}{R} = \pm 2 \frac{\delta_k(t)}{R} \quad (10)$$

Коригуючи вихідний сигнал вимірювача відповідно до цього значення, усувається ще одна складова температурної похибки.

З формули (10) отримуємо значення термодформації мембрани

$$\delta_k(t) = \pm 2 \Delta U^0(t) R \quad (11)$$

Отже, якщо вихідні сигнали з робочих тензорезисторів додатковим каналом подати на суматор, то виходячи з (11) можна розрахувати значення термодформації мембрани. Саме це значення необхідно підставити у формулу (7) для розрахунку термопружної складової додаткової температурної похибки.

Після цього можна здійснити повне коригування вимірювального сигналу на значення температурної похибки. Причому таке коригування здійснюватиметься в реальному часі, що вкрай важливо для швидкодіючих систем керування.

### **Висновки**

Отже, температурна похибка при вимірюванні тиску в умовах нестационарних термовпливів має складну природу, а одна з її складових залежить від взаємодії термомеханічних процесів практично у всій конструкції вимірювача. Тому конструкції елементів вимірювача необхідно проектувати якомога простішими і такої форми, які б мали передбачувану термомеханіку.

Принципово, для врахування всіх складових температурної похибки в умовах нестационарних температур необхідне сумісне вимірювання тиску і температури та відповідне математичне опрацювання вихідних сигналів.

### **Література**

1. Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, Н.В. Громов. Проблемы и основные направления исследований тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем датчиков давления // Датчики и системы. - 2009. - № 8. - С. 54-58.
2. Мокров Е.А. НИИ физических измерений. 45 лет в космическом приборостроении // Датчики и системы. - 2005. - № 9. - С.2-3.
3. Мокров Е.А., Белозубов Е.М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Датчики и системы. - 2005. - № 6. - С. 10-14.
4. Тихан М.А. Тензометрические датчики переменного давления для систем автоматики с нестационарными термовлияниями. Автореф. диссер. на соискание ученой степени канд.

- техн. наук.-Пенза, 1995 г., -18 с.
- Тихан М. О., Малець Р. Б., Шинкаренко Г. А. Моделирование термомеханических процессов в конструктивных элементах измерителей давления // *Машинознание*. Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал. – 2008. - №6. - С. 26-31.
  - Тихан М. О. Спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарних температур. Приладобудування // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Серія приладобудування. - 2008. – Вип. 35, - С. 77-84.

<p>Тихан М.А. <b>Коррекция температурной погрешности тензорезистивного датчика давления при нестационарном термовлиянии.</b> Показано, что термодформация корпуса датчика давления является существенной причиной определенного слагаемого температурной погрешности и предложен способ быстродействующей коррекции выходного сигнала датчика исходя из этой погрешности <b>Ключевые слова:</b> температурная погрешность, датчик давления, коррекция</p>	<p>Tykhon M.O. <b>The compensation of piezoresistive pressure sensors temperatures error under nonstationary temperatures.</b> The thermodeformations of pressure sensors body is important source of temperatures error has been show. The method of fast compensation of sensors output signal relevant to temperatures error has been proposed. <b>Keywords:</b> temperatures error, pressure sensor, compensation</p>
---	---

Надійшло до редакції  
15 березня 2010 року

## ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 621.923

### МЕТОДИКА РЕЄСТРАЦІЇ КУТОВИХ ДІАГРАМ ВІДБИВАННЯ І РОЗСІЯННЯ СВІТЛА ПРЕЦИЗІЙНИХ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

<sup>1)</sup>Ящук В.П., <sup>1)</sup>Пригодюк О.А., <sup>2)</sup>Філатов О.Ю., <sup>2)</sup>Філатов Ю.Д., <sup>3)</sup>Хайзель У.,  
<sup>3)</sup>Сторчак М., <sup>4)</sup>Монтей Г., <sup>1)</sup>Київський Національний Університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, <sup>2)</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, <sup>3)</sup>Штуттгартський університет, м. Штуттгарт, Німеччина, <sup>4)</sup>Національна Вища школа механіки і мікротехніки, м. Безансон, Франція

Описано методику реєстрації куткових діаграм відбивання і розсіяння світла і показано, що за індикатрисами розсіяння при оптимальному напрямку спостереження можна оцінити шорсткість оптичних поверхонь за шириною піка, що спостерігається на фоні незмінного п'єдесталу

**Ключові слова:** методика реєстрації куткових діаграм, прецизійні оптичні поверхні.

#### Вступ. Постановка завдання

При поліруванні поверхонь деталей з неметалевих матеріалів найважливішим завданням є контроль шорсткості обробленої поверхні, яка кількісно характеризує якість обробки. З цією метою зазвичай використовують профілометричні методи [1–3], а останнім часом – методи атомно-силової мікроскопії [4]. Ці методи дозволяють отримати детальну характеристику профілю обробленої поверхні.