

УДК 531.787

**Проектирование акустоэлектронных тензопреобразователей для мембранных чувствительных элементов датчиков давления**

**Н. Г. Черняк<sup>1</sup>, Т. В. Коваленко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Міжгалузевий науково-дослідний інститут проблем механіки «Ритм», Київ

<sup>2</sup>Національне космічне агентство України, Київ

*Надійшла до редакції 18.11.97*

Отримані аналітичні вирази та номограми, що дозволяють з похибкою до 5 % оцінити чутливість диференціального акустоелектронного вимірювального перетворювача тиску (ВПД) та вибрати розташування тензоперетворювачів на його мембранному чутливому елементі, яке б забезпечило адитивну температурну похибку ВПД не більше  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

В работе [4] экспериментально исследован дифференциальный измерительный преобразователь давления (ИПД) с двумя акустоэлектронными тензопреобразователями (ТП), сформированными на поверхности мембранного чувствительного элемента. ТП представляет собой перестраиваемый автогенератор с регулируемой под воздействием измеряемого давления линией задержки (ЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). ИПД обладает разрешающей способностью в 0.005 % от верхнего предела измерения. Авторами установлено, что адитивная температурная погрешность прибора существенно зависит от взаимного расположения ЛЗ на поверхности мембраны и составляет  $0.005 \pm 0.1 \text{ \% / K}$ .

Целью настоящей статьи является получение расчетных выражений и номограмм, позволяющих количественно оценить чувствительность дифференциального ИПД на ПАВ и выбрать вариант расположения ЛЗ на мембране, обеспечивающий наименьшую адитивную температурную погрешность.

Для решения поставленной задачи получим функцию преобразования дифференциального ИПД на

ПАВ. Исследованию влияния деформации и равномерного нагрева звукопровода на параметры распространения ПАВ посвящена работа [2], на основании которой относительное изменение частоты генерации каждого ПАВ-генератора ( $i = 1, 2$ ) запишем в виде

$$\Delta f_i / f_{0i} \approx \chi_\varepsilon \gamma_{\text{PI}} \Delta P + (K_T - \gamma_{\text{TI}}) \Delta T.$$

Здесь  $\chi_\varepsilon = K_\varepsilon (1 - 2\nu) - 1$ ;  $\gamma_{\text{PI}} = \varepsilon(\Delta P) / (\Delta P)$  — относительный деформационный коэффициент акустической длины ЛЗ;  $\varepsilon$  — деформация ЛЗ;  $\gamma_{\text{TI}} = \varepsilon(\Delta T) / (\Delta T)$  — относительный температурный коэффициент акустической длины ЛЗ;  $K_\varepsilon$  и  $K_T$  — коэффициенты деформационной и температурной чувствительностей фазовой скорости ПАВ, определяемые из выражений

$$K_\varepsilon = -\theta B^{-1} - Q B^{-1} \gamma_1^{-2} (0.5 \hat{c}_{11} + \hat{c}_{12})^2 (0.44 \hat{c}_{11} + \hat{c}_{12})^{-2},$$

$$K_T = \beta K_\varepsilon,$$

$$B = 2 \hat{c}_{11} \gamma_1^{-1} (\gamma_3 - \gamma_4^{-1}) + 2 \hat{c}_{12} \gamma_1^{-1} (\gamma_4^{-1} + \gamma_3^{-1}) + \gamma_3^{-1} (1 - \gamma_4^2) (\hat{c}_{12} \hat{c}_{11}^{-1} \gamma_3^{-2} + 1),$$

$$\begin{aligned}
 \theta &= \hat{c}_{12}\gamma_6(\gamma_3^{-1} - \gamma_4^{-1}) + \hat{c}_{11}\gamma_6(\gamma_4^{-1} - \gamma_3) - \\
 &\quad - 0.5\gamma_3\gamma_3^{-1}(1 - \gamma_4^{-2})(\hat{c}_{11} - \hat{c}_{12}\gamma_3^{-2}), \\
 Q &= 2\gamma_4(\hat{c}_{11}q_{11} + \hat{c}_{12}q_{12}) - \\
 &\quad - (1 - \gamma_4^2)(\hat{c}_{11}q_{11}\gamma_3 + \hat{c}_{12}q_{12}\gamma_3^{-1}) + \\
 &\quad + 0.5(\hat{c}_{12}q_{11} + \hat{c}_{11}q_{12})[(1 + \gamma_4^2)(\gamma_3^{-1} + \gamma_3) - 4\gamma_4], \\
 \gamma_1 &= 0.5(\hat{c}_{11} - \hat{c}_{12}), \quad \gamma_2 = 0.5(\hat{c}_{11} + \hat{c}_{12}), \\
 \gamma_3 &= -(1 - \rho v_0^2 / \hat{c}_{11})^{0.5}, \quad \gamma_4 = -(1 - \rho v_0^2 / \gamma_1)^{0.5}, \\
 \gamma_5 &= (\hat{c}_{11} + q_{11})\hat{c}_{11}^{-2}, \quad \gamma_6 = 0.5\gamma_1^{-2}(q_{11} - q_{12}) + \gamma_1^{-1}, \\
 q_{11} &= 2l + 22m/15, \quad q_{12} = 2l - 2m/5 + n/3, \\
 \hat{c}_{11} &= (c_{11} + c_{22} + c_{33})/5 + 2(c_{12} + c_{23} + c_{31})/15 + \\
 &\quad + 4(c_{44} + c_{55} + c_{66})/15, \\
 \hat{c}_{12} &= (c_{11} + c_{22} + c_{33})/15 + 4(c_{12} + c_{23} + c_{31})/15 - \\
 &\quad - 2(c_{44} + c_{55} + c_{66})/15, \\
 \hat{E} &= (\hat{c}_{11}^2 + \hat{c}_{11}\hat{c}_{12} - 2\hat{c}_{12}^2)(\hat{c}_{11} + \hat{c}_{12})^{-1}, \\
 \nu &= \hat{c}_{12}(\hat{c}_{11} + \hat{c}_{12})^{-1},
 \end{aligned}$$

$c_{\alpha\beta}$  — элементы матрицы тензора модулей упругости недеформированного кристалла звукопровода;  $l, m, n$  — модули упругости третьего порядка Мэрнагана кристалла;  $\beta$  — коэффициент линейного температурного расширения материала звукопровода.

Функция преобразования дифференциального ИПД может быть представлена следующим образом:

$$f_{\Sigma} \approx f_{0\Sigma} + S_P \Delta P + S_T \Delta T,$$

где  $f_{01}, f_{02}, f_{0\Sigma} = f_{01} - f_{02}$  — соответственно частоты генерации ТП1 и ТП2, выходная частота ИПД при  $\Delta P = 0$ ;  $S_P$  и  $S_T$  — чувствительность и удельная аддитивная температурная погрешность ИПД, определяемые из выражений

$$\begin{aligned}
 S_P &= \chi_{\varepsilon}(f_{01}\gamma_{P1} - f_{02}\gamma_{P2}), \\
 S_T &= f_{0\Sigma}K_T - f_{01}\gamma_{T1} + f_{02}\gamma_{T2}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

С целью определения величин  $\gamma_{P1}$  и  $\gamma_{T1}$  необходимо получить выражение для средней деформации ЛЗ. Для этого рассмотрим деформацию участка мембраны, представляющего узкую полоску длиной  $L_0$  симметрично расположенную относительно оси  $y$  (рис. 1). Пренебрегая небольшой погрешностью, вызванной искривлением рассматриваемого участка, относительное удлинение полоски выразим в виде интеграла

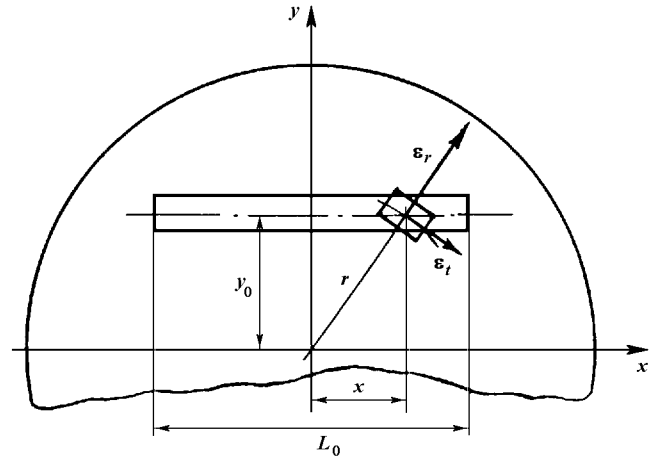


Рис. 1. Деформация участка поверхности мембранного чувствительного элемента

$$\begin{aligned}
 \Delta L/L_0 &= 2L_0^{-1} \left( \int_0^{0.5L_0} \varepsilon_r x (y_0^2 + x^2)^{-0.5} dx + \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^{0.5L_0} \varepsilon_t y_0 (y_0^2 + x^2)^{-0.5} dx \right).
 \end{aligned}$$

Здесь  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_t$  — радиальная и окружная составляющие деформации поверхности, которые для мембраны большой толщины ( $R \leq 25h$ ) имеют вид [1]:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r &= A(R^2 - 3r^2) + \alpha \Delta T, \\
 \varepsilon_t &= A(R^2 - r^2) + \alpha \Delta T, \\
 A &= 3(1 - \nu^2)(8h^2 E)^{-1} \Delta P, \\
 r &= y_0^2 + x^2,
 \end{aligned}$$

где  $R$  и  $h$  — радиус и толщина мембраны;  $\alpha$  — коэффициент линейного температурного расширения материала;  $E$  — модуль Юнга материала звукопровода. Обозначив  $y_0 = \delta_0 R$  ( $0 \leq \delta_0 \leq 1$ ),  $L_0 = \delta_1 R$ ,  $h = \delta_2 R$  после интегрирования получим:

$$\gamma_P = S \hat{\gamma}_P, \quad \gamma_T = 2\alpha \hat{\gamma}_T, \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 S &= 3(1 - \nu^2)/4\delta_2^2 E, \\
 \hat{\gamma}_P &= \delta_1^{-1} \left[ \delta_0(1 - 0.5\delta_0^2) \left( \ln \frac{0.5\delta_1 + (\delta_0^2 + 0.25\delta_1^2)^{0.5}}{\delta_0} - 1 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + (\delta_0^2 + 0.25\delta_1^2)^{0.5} (1 + \delta_0^2 - 0.25\delta_1^2 - 0.25\delta_1\delta_0) \right], \\
 \hat{\gamma}_T &= \delta_1^{-1} \left[ \delta_0 \ln \frac{0.5\delta_1 + (\delta_0^2 + 0.25\delta_1^2)^{0.5}}{\delta_0 e} + (\delta_0^2 + 0.25\delta_1^2)^{0.5} \right].
 \end{aligned} \quad (3)$$

Заслуживает внимания, что  $\hat{\gamma}_p$  и  $\hat{\gamma}_T$  определяются только расположением ЛЗ на поверхности мембраны. Графики зависимостей  $\hat{\gamma}_p(\delta_0)$  и  $\hat{\gamma}_T(\delta_0)$  для различных значений  $\delta_1$  показаны на рис. 2.

Из анализа графиков и выражений (1) можно сделать некоторые качественные выводы.

1. Для обеспечения высокой чувствительности ИПД необходимо выполнение условия  $\hat{\gamma}_{p1} \approx \hat{\gamma}_{p2}$ , что возможно при расположении ТП1 в центральной, а ТП2 — в периферийной ( $\delta_0 > 0.75$ ) областях поверхности мембраны, причем большая крутизна зависимости  $\gamma_p$  в периферийной области свидетельствует о более высокой тензочувствительности ТП2 по сравнению с ТП1.

2. Наименьшей аддитивной температурной по-

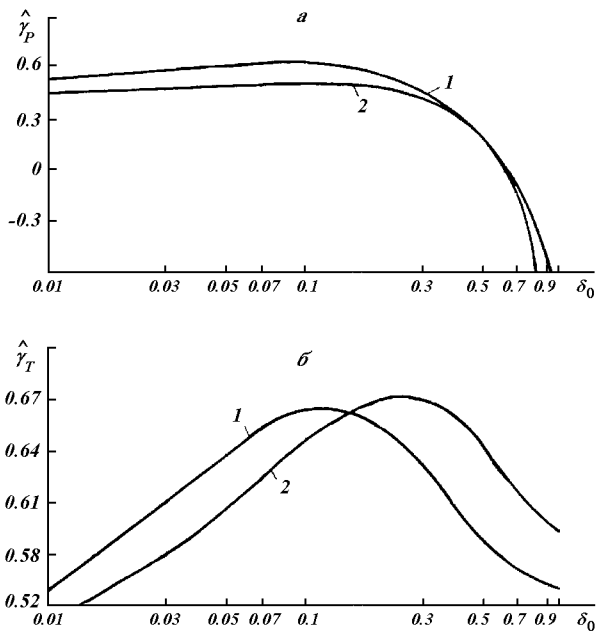


Рис. 2. Зависимость коэффициентов  $\hat{\gamma}_p$  (а) и  $\hat{\gamma}_T$  (б) от координаты  $\delta_0 = y_0 R^{-1}$  при различных длинах  $\delta_1 = L_0 R^{-1}$  исследуемого участка поверхности мембранного чувствительного элемента: 1 —  $\delta_1 = 0.5$ , 2 —  $\delta_1 = 0.9$

грешности ИПД, согласно (1) при  $S_T = 0$ , соответствует условие

$$\hat{\gamma}_{T1} = (0.5f_{0\Sigma}K_T\alpha^{-1} + f_{02}\hat{\gamma}_{T2})f_{01}^{-1}, \quad (4)$$

которое может быть обеспечено выбором параметра  $\delta_0^{\text{ТП1}}$  без существенного снижения его тензочувствительности вследствие малой крутизны зависимости  $\hat{\gamma}_p$  в области  $\delta_0 < 0.05$ .

Таким образом, можно предложить следующую схему выбора по номограммам рис. 2 варианта расположения ТП1 и ТП2 на поверхности мембранного чувствительного элемента и расчета чувствительности ИПД.

1. Задаваясь величинами  $\delta_1$  и

$$\delta_0^{\text{ТП2}} = 0.5(4 - \delta_1^2)^{0.5} - 0.5wR^{-1},$$

где  $w$  — апертура ЛЗ, определить по рис. 2, б значения  $\hat{\gamma}_{T2}$ .

2. Найти значение  $\delta_0^{\text{ТП1}}$ , удовлетворяющее условию (4).

3. Для соответствующих  $\delta_0^{\text{ТП1}}$  и  $\delta_0^{\text{ТП2}}$  по рис. 2, а определить значения  $\hat{\gamma}_{p1}$  и  $\hat{\gamma}_{p2}$ .

4. По формулам (1) и (2) оценить чувствительность ИПД.

С целью экспериментальной проверки предлагаемой схемы расчета были изготовлены два типа дифференциальных ИПД с мембранным чувствительным элементом из плавленого кварца с пьезоэлектрической пленкой окиси цинка. Испытания проводились на стенде, оснащенный датчиком давления МПА-15 и термокамерой МС-81 в температурном диапазоне  $\pm 80^\circ\text{C}$ . Частота измерялась частотомером ЧЗ-54. Кратковременная нестабильность выходной частоты ИПД не превысила  $10^{-5}$  за 1.0 мин, что позволило фиксировать изменение давления в 0.002%. Конструктивные параметры ИПД, экспериментальные и рассчитанные по полученным в статье зависимостям значения чувствительности ИПД и его удельной аддитивной температурной погрешности приведены в таблице. Расчеты проводились при следующих значениях пара-

Расчетные и экспериментальные значения чувствительности и аддитивной температурной погрешности ИПД

Конструктивные параметры ИПД	Диапазон давления $\times 10^2$ кПа	$S_p$ , кГц/ $10^2$ кПа		$S_T$ , Гц/К		
		эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	
$f_{01} \approx 82.2$ мГц $f_{0\Sigma} \approx 183$ кГц	тип 1 $\delta_0^{\text{ТП1}} = 0$	1.6	59.5	60.9	25	16
$\delta_0^{\text{ТП2}} = 0.82$ $\delta_2 = 0.04875$	тип 2 $\delta_0^{\text{ТП1}} = 2.7 \cdot 10^{-2}$	1.6	59.5	61.0	8	0

метров материала чувствительного элемента [3]:

$$c_{11} = 7.85 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$c_{12} = 1.61 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$l = 12.9 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$m = 7.1 \cdot 10^{10} \text{ Па},$$

$$n = -4.4 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

Результаты исследований демонстрируют хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Используя предложенную в статье схему выбора варианта расположения ТП на поверхности мембраны при разработке ИПД типа 2 удалось снизить его аддитивную температурную погрешность в 2.5÷3 раза по сравнению с ИПД типа 1.

Таким образом, полученные аналитические выражения и номограммы позволяют при проектировании дифференциального ИПД на ПАВ с погрешностью до 5 % оценить его чувствительность и обеспечить аддитивную относительную температурную погрешность не более  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

1. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986.—380 с.
2. Павловский М. А, Лопушенко В. К., Черняк Н. Г., Кондратенко Н. Г. Деформационные, температурные и гироскопические эффекты в автогенераторах на поверхностных акустических волнах // Мех. гироскоп. систем.—1990.— Вып. 9.—С. 50—56.
3. Францевич И. И., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. — Киев: Наук. думка, 1982.—190 с.
4. Rokhlin S. I., Korndlit L., Gorodetsky G. Surface acoustic wave pressure transducers and accelerometers // Prog. Aerospace Sci.—1984.—21.—P. 1—31.

---

#### DESIGNING ACOUSTIC-ELECTRIC STRAIN-GAUGE CONVERTERS FOR SENSITIVE DIAPHRAGM ELEMENTS

M. G. Chernyak and T. V. Kovalenko

Analytical expressions and nomograms, are obtained to estimate the sensitivity of differential acoustic-electric measuring pressure converter with an error no more than 5 % and to choose such an arrangement of strain-gauge converters on its sensitive diaphragm element that would ensure an additive temperature error of the measuring pressure converter less than  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .