

Д. ф.-м. н. Я. И. ЛЕПИХ, к. т. н. В. К. ЛОПУШЕНКО,
к. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Одесса, НТЦ "Фонон";
г. Киев, НИИ ПМ "Ритм", Минпромполитики
E-mail: ndl_lepikh@gomail.com.ua

Дата поступления в редакцию
09.10 2001 г.

Оппонент к. т. н. Е. Б. ПЛАВИНСКИЙ
(ОНПУ, г. Одесса)

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ПАВ ДЛЯ АЭС

Показана возможность построения акустоэлектронных датчиков давления для АЭС, основанных на тензочувствительности скорости распространения поверхностных акустических волн.

Датчики давления являются основными элементами автоматизированных систем управления технологическими процессами АЭС.

В широко применяемых на АЭС Украины датчиках давления типа «Сапфир» среднего класса точности в качестве чувствительного элемента используется структура КНС — кремний на сапфире. Промышленная технология КНС в Украине отсутствует, а ее освоение требует больших капитальных затрат, что в условиях мелкосерийного производства невыгодно (для АЭС нужны датчики давления большой номенклатуры, но в относительно небольших количествах). Кроме того, существенно возросли требования к датчикам такого назначения по метрологическим характеристикам, надежности, по использованию возможностей микропроцессорной техники.

Вместе с тем в последнее время получили развитие более перспективные принципы построения датчиков, в их числе акустоэлектронные на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

В настоящей работе представлены результаты проектирования датчика давления (ДД) жидкости и газа для АЭС на основе измерительных преобразователей (ИП) на ПАВ, действие которых основано, в частности, на тензочувствительности скорости распространения ПАВ [1, 2].

Функциональная схема дифференциального автогенераторного ДД на ПАВ приведена на рис. 1. Здесь $У1, У2$ — усилители электронные; $СМ$ — смеситель сигналов; $ФНЧ$ — фильтр нижних частот, P — измеряемое давление.

ДД строится по разомкнутой схеме, включающей последовательно соединенные первичный и вторичный преобразовательные элементы (ППЭ и ВПЭ). ППЭ представляет собой пьезоэлектрический упругий деформируемый чувствительный элемент (ЧЭ), жестко закрепленный по периметру в основании корпуса ДД, на внешней поверхности которого расположены встречно-штыревые преобразователи (ВШП), образующие линии задержки (ЛЗ) на ПАВ. Это дает возможность непосредственного измере-

ния давления. В качестве пьезоэлектрика преимущественно используется пьезоэлектрический кварц, обладающий высокой температурной и временной стабильностью (ТКЧ для ST-среза близок к нулю) [3].

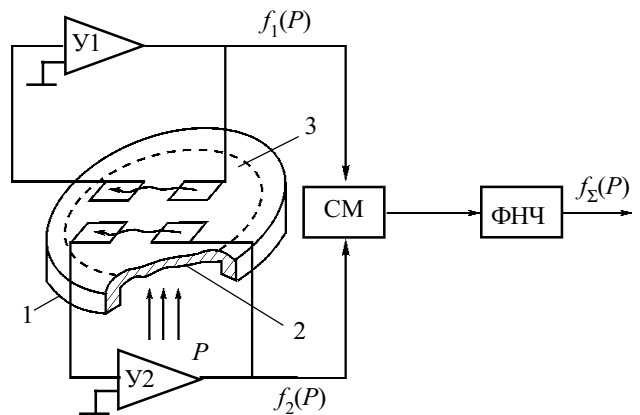


Рис. 1. Функциональная схема датчика давления с первичным преобразователем на ПАВ:

1 — профилированная мембрана; 2 — приемная полость; 3 — внешняя поверхность мембраны

ЧЭ ДД (рис. 1) представляет собой профилированную мембрану 1 из SiO_2 , воспринимающую внутренней приемной полостью 2 давление измеряемой среды P , уравнивающее его силами упругости и редуцирующее это давление в напряженно-деформированное состояние $\epsilon_j^0(p)$ характерных участков внешней плоской поверхности 3 мембраны, на которой методами тонкопленочной технологии формируются входной ВШП1 и выходной ВШП2 преобразователи двух ЛЗ — ЛЗ1 и ЛЗ2, расположенных в областях, испытывающих деформации противоположно знака [4] (рис. 2).

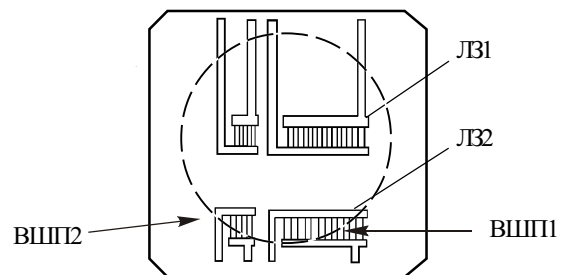


Рис. 2. Схема расположения ЛЗ на ПАВ на поверхности пьезоэлектрического звукопровода-мембраны

ВПЭ представляет собой акустоэлектронный дифференциальный тензопреобразователь, состоящий из двух высокостабильных перестраиваемых ПАВ-автогенераторов (ПАВ-АГ), смесителя (СМ) и фильтра нижних частот (ФНЧ). Каждый АГ включает в себя высокочастотный широкополосный усилитель, в цепь обратной связи которого включен частотозадающий элемент — ЛЗ на ПАВ. Каждый перестраиваемый ПАВ-АГ представляет собой одномодовую колебательную систему, допускающую в определенных пределах непрерывную управляемую измеряемым воздействием модуляцию частоты ПАВ-колебаний.

Для определения динамического диапазона измерений проанализируем работу ПАВ-АГ. Условия существования автоколебаний ПАВ-АГ как линейной резонансной системы определяются уравнением баланса фаз

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{ЛЗ}(\omega) + \varphi_3(\omega) = 2\pi n, \quad n \in Z \quad (1)$$

и уравнением баланса амплитуд

$$A_{\Sigma} = A_y(\omega)A_1(\omega)A_2(\omega) \geq 1, \quad (2)$$

где $\varphi_{ЛЗ}(\omega) = \omega\tau$ — фазовый набег (ФЧХ) в ЛЗ на текущей частоте $\omega = 2\pi f$;

$\tau = LV^{-1}$ — время акустической задержки ПАВ-сигнала в ЛЗ;

L — акустическая длина ЛЗ (расстояние между геометрическими центрами ВШП1 и ВШП2);

V — фазовая скорость ПАВ;

$\varphi_3(\omega)$ — электрический фазовый сдвиг в цепях усилителя;

A_y, A_1, A_2 — амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) усилителя, ВШП1 и ВШП2, соответственно.

Из (1) определяются частоты, на которых возможна генерация n -й моды ПАВ:

$$f_n = (n - \varphi_3/2\pi)\tau^{-1}. \quad (3)$$

Согласно (3), возможные частоты генерации f_n образуют гребенчатый дискретный спектр (рис. 3) с периодическими интервалами $\delta_f \approx \tau^{-1}$ при $\varphi_{ЛЗ}(\omega) \gg \varphi_3(\omega)$.

Узкополосный ВШП1 возбуждает, а ВШП2 детектирует непрерывный частотный спектр ПАВ в пределах полос пропускания АЧХ $A_1(f)$ и $A_2(f)$, которые для неаподизированных эквидистантных преобразователей аппроксимируются функцией

$$A_i(f) = \frac{\sin X_i}{X_i}, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где $X_i = \pi N_i(f - f_A)f_A^{-1}$;

N_i — число пар штырей в соответствующих ВШП;

$f_A = V_0\lambda_0^{-1}$ — частота акустического синхронизма преобразователей;

λ_0 — длина ПАВ.

Интервалы между локальными минимумами главных лепестков $A_i(f)$ составляют $\Delta_i \approx 2f_A N_i^{-1}$. Типовая АЧХ ЛЗ, определяемая выражением (2), а также АЧХ и ФЧХ ВШП1 и ВШП2 приведены на рис. 3.

При соответствующем расчете топологии ЛЗ, обеспечивающем выполнение условия

$$\delta_f \approx 0,5\Delta_1, \quad (5)$$

в резонансной системе устанавливается устойчивый одномодовый (n -я мода) режим колебаний на частоте f_n^0 (рис. 3), что необходимо для устойчивой работы ПАВ-АГ в составе тензопреобразователя (ТП).

Важным свойством ПАВ-АГ для построения ТП является то, что АЧХ и ФЧХ частотозадающего элемента можно изменять независимо друг от друга, поскольку полоса пропускания АЧХ Δ_1 определяется в первом приближении числом пар штырей ВШП, а крутизна ФЧХ — временем акустической задержки сигнала

$$d\varphi_{ЛЗ}(f)/df = 2\pi\tau. \quad (6)$$

Таким образом, в одномодовом режиме на частоте f_n в пределах полосы пропускания линейной резонансной системы $A_{\Sigma}(f) \geq 1$ возможна непрерывная управляемая внешним измеряемым воздействием (деформацией звукопровода) модуляция частоты генерации ПАВ-АГ согласно (3) и (6) путем изменения τ .

Девиацию частоты n -й моды колебаний в предположении приближенного равенства полных приращений параметров в (3) их дифференциалам можно представить в виде [5]

$$\Delta f_n \approx df_n/d\tau \Delta\tau + df_n/d\varphi_3 \Delta\varphi_3 = \Delta\tau/\tau - \Delta\varphi_3, \quad (7)$$

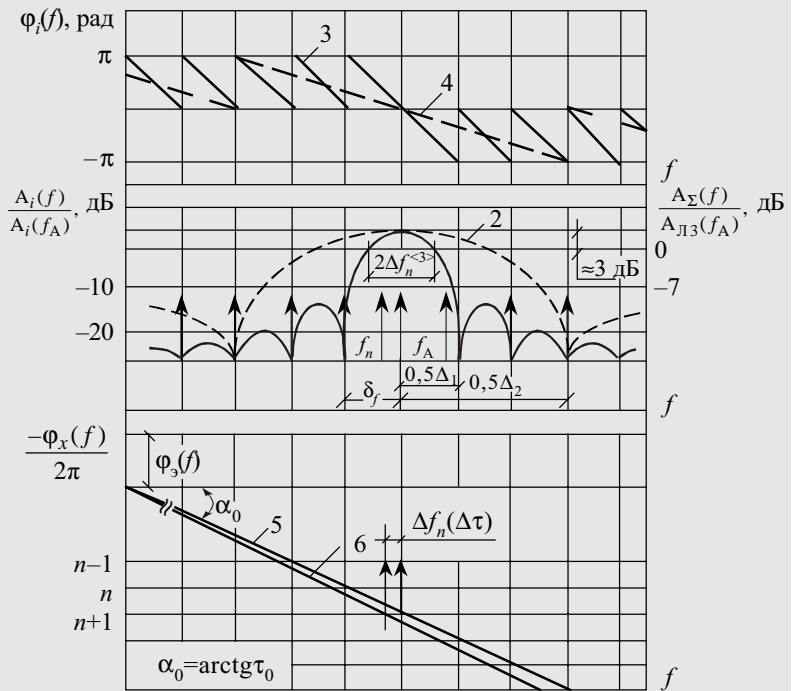


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ ВШП, ЛЗ и перестраиваемого ПАВ-АГ (при $N_1 = 3N_2, L_0 = N_1\lambda_0$):

1 — $A_1(f) \approx A_2(f)$; 2 — $A_2(f)$; 3 — $\varphi_1(f)$; 4 — $\varphi_2(f)$; 5 — $\varphi_2(f)$ при $\varphi_3 \approx \text{const}, \tau = \tau_0$; 6 — $\varphi_{\Sigma}(f)$ при $\tau > \tau_0$

где $df_n/d\tau = n\tau_0^{-2} \approx -V_0 N_1^{-1} \lambda_0^{-2}$ — чувствительность ПАВ-АГ к изменению τ ;
 $df_n/d\varphi_3 = -(2\pi\tau_0)^{-1} \approx -V_0(2\pi N_1 \lambda_0)^{-1}$ — чувствительность ПАВ-АГ к нестабильности φ_3 .

Из (7) относительная девиация частоты генерации n -й моды определяется из выражений

$$\Delta f_n/f_n^0 \approx -\Delta\tau/\tau_0 - \Delta\varphi_3/2\pi n \quad (8)$$

или, учитывая, что $\tau = LV^{-1}$,

$$\Delta f_n/f_n^0 \approx \Delta V/V_0 - \Delta L/L_0 - \Delta\varphi_3/2\pi n. \quad (9)$$

Определим максимально возможную полезную девиацию частоты Δf^{\max} ПАВ-АГ, при которой сохраняется одномодовый режим работы. Из выражения (3) видно, что Δf^{\max} определяется максимальным полезным изменением времени акустической задержки $\Delta\tau^{\max}$. Для вычисления $\Delta\tau^{\max}$ рассмотрим переход с n -й на $(n+1)$ -ю моду колебаний.

Пусть в ЛЗ время задержки сигнала равно τ_0 . Согласно рис. 3, ему соответствует частота генерации f_0 . В результате деформации время задержки изменилось на величину $\Delta\tau$: $\tau_0 + \Delta\tau$; соответственно сместилась частота генерации n -й моды и стала равной $f_n = f_0 - X_1$ (рис. 4).

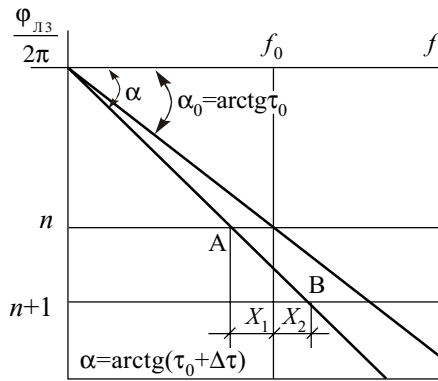


Рис. 4. Фазочастотная характеристика ЛЗ

Из графика рис. 4 видно, что для точек А и В время акустической задержки одинаково: $\tau_A = \tau_B$. При этом τ_A и τ_B определяются из (3) выражениями

$$\tau_A = \frac{n}{f_0 - X_1}, \quad \tau_B = \frac{n+1}{f_0 + X_2}.$$

Тогда максимально возможное время задержки, при котором произойдет переход с n -й на $(n+1)$ -ю моду колебаний, определится как

$$\tau^{\max} = \frac{n}{f_0 - X_1} = \frac{n+1}{f_0 + X_2}, \quad (10)$$

откуда

$$X_1 = f_0 - \frac{n}{\tau^{\max}} = \frac{n}{\tau_0} - \frac{n}{\tau_0 + \Delta\tau^{\max}};$$

$$X_2 = \frac{n+1}{\tau^{\max}} - f_0 = \frac{n+1}{\tau_0 + \Delta\tau^{\max}} - \frac{n}{\tau_0}.$$

Переход с n -й на $(n+1)$ -ю моду возможен при условии $X_1 = X_2$, из которого следует:

$$\frac{n}{\tau_0} - \frac{n}{\tau_0 + \Delta\tau^{\max}} = \frac{n+1}{\tau_0 + \Delta\tau^{\max}} - \frac{n}{\tau_0}$$

или

$$\Delta\tau^{\max} = \frac{\tau_0}{2n} \quad (11)$$

максимально возможное изменение времени задержки сигнала, в пределах которого не происходит переход с n -й на $(n+1)$ -ю моду.

Из (11) и основного уравнения ПАВ-АГ

$$\Delta f_n = -\frac{n}{\tau_0^2} \Delta\tau$$

для теоретически возможной максимальной девиации частоты генерации запишем:

$$\Delta f_n^{\max} = -\frac{n}{\tau_0^2} \Delta\tau^{\max} = -\frac{n}{\tau_0^2} \frac{\tau_0}{2n} = -0,5\tau_0^{-1}. \quad (12)$$

Таким образом, перестройка частоты в пределах n -й моды возможна в диапазоне

$$f_0 \pm \Delta f_n^{\max} = f_0 \mp 0,5\tau_0^{-1}. \quad (13)$$

С учетом (4) и максимальной девиации частоты уровень АЧХ ЛЗ по отношению к максимуму равен:

$$20 \lg \left(\frac{\sin(\pi f_A \tau_0 \frac{f - f_A}{f_A})}{\pi f_A \tau_0 \frac{f - f_A}{f_A}} \right) = 20 \lg \left(\frac{\sin 0,5\pi}{0,5\pi} \right) \approx 4 \text{ дБ.}$$

Ширина частотного спектра $A_1(f)$ на уровне 3 дБ равна $0,885 \tau_0^{-1}$, откуда для перестраиваемого ПАВ-АГ при оптимальном по критерию устойчивости одномодового режима запасе по усилению в 3 дБ примем

$$\Delta f_n^{\max} \approx f_n^{\langle 3 \rangle} = \mp 0,442 \tau_0^{-1} \quad (14)$$

или, в относительных единицах ($f_n^0 \approx f_A$):

$$\frac{\Delta f_n^{\langle 3 \rangle}}{f_n^0} \approx \mp \frac{0,442}{f_n^0 \tau_0} = \mp \frac{0,442}{f_n^0 \frac{N_t}{f_A}} = \mp \frac{0,442}{N_1} 100\%. \quad (15)$$

При $N_1 = 180-220$ получаем $\Delta f_n^{\langle 3 \rangle}/f_n^0 \approx \pm 0,245-0,2\%$.

Высокая несущая частота ПАВ-АГ $f_n^0 \approx 10^8$ Гц обеспечивает в фазовых преобразователях на перестраиваемых АГ до нескольких сот кГц полезной девиации частоты, а реально получаемая кратковременная нестабильность частоты генерации ($\Delta f_3/f_n^0$) на уровне 10^{-8} позволяет создавать измерительные преобразователи с высокой разрешающей способностью (чувствительностью) в динамическом диапазоне около 100 дБ. Прочностные свойства мембраны и коэффициент деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ позволяет производить перестройку ПАВ-АГ в указанном динамическом диапазоне.

Нами установлена существенная зависимость чувствительности и аддитивной температурной погрешности дифференциального измерительного преобразователя давления (ИПД) с двумя акустоэлектронными тензопреобразователями от их расположения на поверхности мембраны (рис. 2).

Согласно [5], относительное изменение частоты генерации каждого ПАВ-АГ ($i=1,2$) имеет вид

$$\Delta f_i/f_{0i} \approx \chi_\epsilon \gamma_{pi} \Delta P + (K_T - \gamma_{Ti}) \Delta T, \quad (16)$$

где $\chi_\varepsilon = K_\varepsilon(1-2\nu)-1$;
 $\gamma_{pi} = \varepsilon(\Delta P)\Delta P^{-1}$ — относительный деформационный коэффициент акустической длины ЛЗ;
 $\gamma_{ti} = \varepsilon(\Delta T)\Delta T^{-1}$ — относительный температурный коэффициент акустической длины ЛЗ;
 K_ε, K_T — коэффициенты деформационной и температурной чувствительности фазовой скорости ПАВ, соответственно.

Функция преобразования дифференциального ИПД может быть представлена следующим образом:

$$f_\Sigma = f_{0\Sigma} + S_p \Delta P + S_T \Delta T, \quad (17)$$

где $f_{0\Sigma} = f_{01} - f_{02}$;
 f_{01}, f_{02} — соответственно выходная частота ИПД и частоты генерации ТП1 и ТП2 при $\Delta P=0$;

S_p, S_T — чувствительность и удельная аддитивная температурная погрешность ИПД, определяемые из следующих выражений:

$$S_p = \chi_\varepsilon (f_{01} \gamma_{p1} - f_{02} \gamma_{p2});$$

$$S_T = f_{0\Sigma} K_T - f_{01} \gamma_{t1} + f_{02} \gamma_{t2}. \quad (18)$$

Для определения величин γ_{pi}, γ_{ti} необходимо получить выражение для средней деформации ЛЗ. Рассмотрим деформацию участка мембраны, представляющую узкую полоску длиной L_0 , симметрично расположенную относительно оси y (рис. 5).

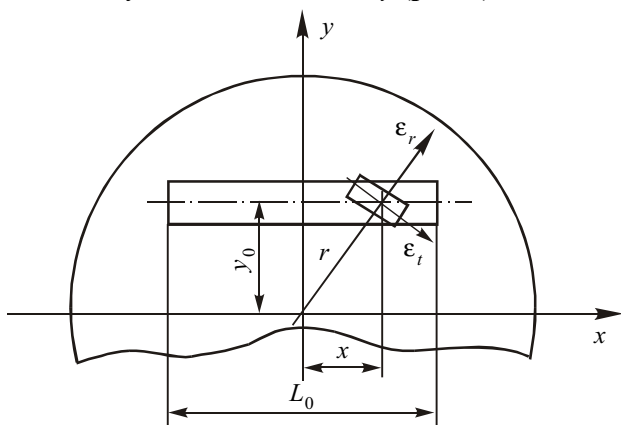


Рис. 5. К определению относительных деформационных (γ_{pi}) и температурных коэффициентов акустической длины ЛЗ

Пренебрегая погрешностью, вызванной искривлением рассматриваемого участка, относительное удлинение полоски выразим в виде интеграла:

$$\Delta L / L_0 = 2L_0^{-1} \left(\int_0^{0,5L_0} \epsilon_r x (y_0^2 + x^2)^{-0,5} dx + \int_0^{0,5L_0} \epsilon_t y_0 (y_0^2 + x^2)^{-0,5} dx \right). \quad (19)$$

Здесь ϵ_r и ϵ_t — радиальные и окружные составляющие деформации поверхности, которые для мембраны большой толщины имеют вид [6, с. 538]

$$\epsilon_r = A(R^2 - 3r^2) + \dots \alpha \Delta T; \quad \epsilon_t = A(R^2 - r^2) + \dots \alpha \Delta T;$$

$$A = 3(1-\nu^2)(8h^2E)^{-1} \Delta P; \quad r^2 = y_0^2 + x^2,$$

где R и r — радиус и толщина мембраны;

α — температурный коэффициент линейного расширения материала.

Обозначив $y_0 = \delta_0 R$ ($0 \leq \delta_0 \leq 1$), $L_0 = \delta_1 R$, $h = \delta_2 R$, после интегрирования найдем:

$$\gamma_p = S \hat{\gamma}_p; \quad \gamma_T = 2\alpha \hat{\gamma}_T, \quad (20)$$

где $S = 3(1-\nu^2)/4\delta_2^2 E$;

$$\hat{\gamma}_p = \delta_1^{-1} \left[\delta_0 \left(1 - 0,5\delta_0^2 \right) \left(\ln \frac{0,5\delta_0 + (\delta_0^2 + 0,25\delta_1^2)^{0,5}}{\delta_0} - 1 \right) + (\delta_0^2 + 0,25\delta_1^2)^{0,5} \left(1 + \delta_0^2 - 0,25\delta_1^2 - 0,25\delta_1\delta_0 \right) \right];$$

$$\hat{\gamma}_T = \delta_1^{-1} \left[\delta_0 \ln \frac{0,5\delta_1 + (\delta_0^2 + 0,25\delta_1^2)^{0,5}}{\delta_0 e} + (\delta_0^2 + 0,25\delta_1^2)^{0,5} \right].$$

Величины $\hat{\gamma}_p$ и $\hat{\gamma}_T$ определяются только расположением ЛЗ на поверхности мембраны.

Графики зависимости $\gamma_p(\delta_0)$ и $\gamma_T(\delta_0)$ для различных значений δ_1 показаны на рис. 6.

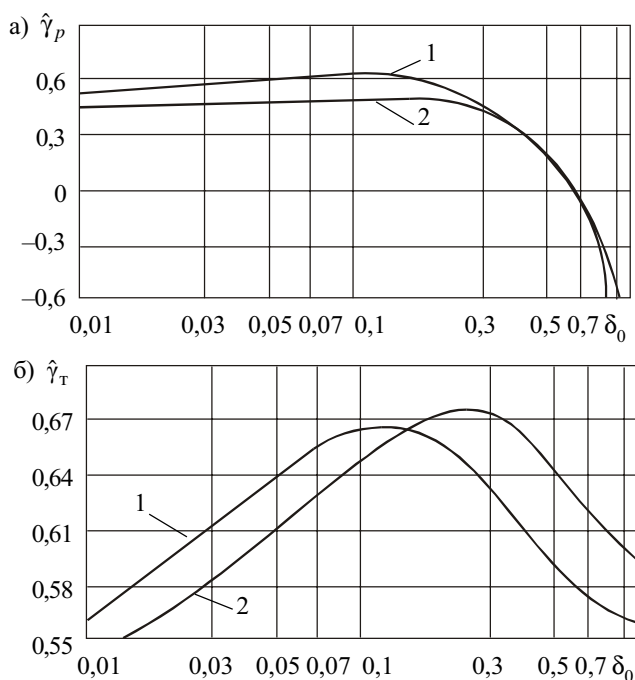


Рис. 6. Зависимость относительных деформационных (а) и температурных (б) коэффициентов акустической длины ЛЗ от положения на поверхности мембраны:

1 — $\delta_1=0,5$; 2 — $\delta_1=0,9$

Анализ графиков и выражений (18) позволяет сделать некоторые качественные выводы:

— для обеспечения высокой чувствительности ИПД необходимо выполнение условия $\gamma_{p1} \approx -\gamma_{p2}$, что возможно при расположении ТП1 в центральной, а ТП2 — в периферийной ($\delta_0 \geq 0,75$) областях поверхности мембраны, при этом большая крутизна зависимости $\hat{\gamma}_p$ в периферийной области свидетельствует о более высокой тензочувствительности ТП2 по сравнению с ТП1;

— наименьшей аддитивной температурной погрешности ИПД соответствует условие

$$\hat{\gamma}_{T1} = (0,5 f_{0\Sigma} K T \alpha^{-1} + f_{02} \hat{\gamma}_{T2}) f_{01}^{-1}, \quad (21)$$

которое может быть обеспечено выбором параметра $\delta_0^{ТП1}$ без существенного снижения его тензо-

чувствительности вследствие малой крутизны зависимости $\hat{\gamma}_p$ в области $\delta_0 < 0,05$.

Таким образом, можно предложить следующую схему выбора по графикам рис. 6 варианта расположения ТП1 и ТП2 на поверхности мембранного ЧЭ и расчета чувствительности ИПД:

а) задавая величины δ_1 и $\delta_0^{\text{ТП2}} = 0,5(4 - \delta_1^2)^{0,5} - 0,5WR^{-1}$ (где W — апертура ЛЗ), определить по рис. 6, б значения $\hat{\gamma}_{\text{Т2}}$;

б) найти значение $\delta_0^{\text{ТП1}}$, удовлетворяющее условию (21);

в) для значений $\delta_0^{\text{ТП1}}$ и $\delta_0^{\text{ТП2}}$ по рис. 6, а определить значение $\hat{\gamma}_{p1}$ и $\hat{\gamma}_{p2}$;

г) по формулам (17) и (19) оценить чувствительность ИПД.

Целью экспериментальной проверки предлагаемой схемы расчета были изготовлены образцы ДД с ИПД двух типов с ЧЭ из пьезоэлектрического кварца ST-среза, имеющие диапазон измерения $0 - 1,6 \cdot 10^2$ кПа.

Конструктивно ДД на ПАВ представляет собой (рис. 7) герметичный корпус из стали, разделенный на две части внутренней полостью. В одной из них размещен чувствительный ПАВ-элемент 1, в другой — электронная часть (У1, У2, СМ, ФНЧ). Электронная часть включает в себя основной измерительный канал (ОК) и температурный канал (ТК), выполненный в виде ГИС, содержащей две микросхемы двух ВЧ-усилителей 8, микросхему смесителя 9, микросхему выходного каскада 10 и микросхему ТК 11. Каждая микросхема ВЧ-усилителя помещена в металлостеклянный корпус. Микросхемы установлены на коммутационные платы 12, которые закрепляются на стойках 13 шпильками 14. К корпусу со стороны ППЭ приваривается стандартный штуцер 3. Со стороны ВПЭ корпус закрывается контактной колодкой 4, которая по специально сформированным кромкам сваривается с основанием. В колодку введены золо-

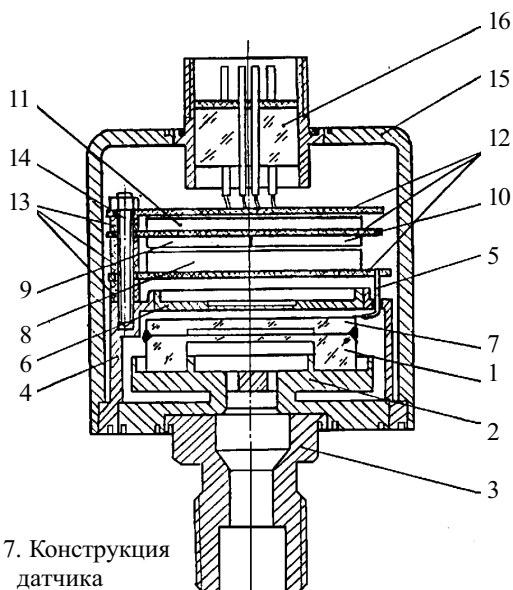


Рис. 7. Конструкция датчика

тые проводники с ЛЗ на ПАВ. В нее же вваривается крышка 6. На рисунке: 2 — основание корпуса; 5 — провод передачи сигнала от чувствительного элемента к электронной части; 7 — крышка кварцевая защитная; 15 — крышка корпуса; 16 — металлостеклянный разъем.

ИПД имели ряд общих конструктивных параметров ($f_{0i} \approx 8,82 \cdot 10^7$ Гц; $f_{0\Sigma} \approx 1,83 \cdot 10^5$ Гц; $\delta_0^{\text{ТП2}} = 0,820$; $\delta_1 = 0,649$; $\delta_2 = 0,488$) и отличались расположением ТП1 в центральной области поверхности мембраны $\delta_0^{\text{ТП1}} = 0$ в ИПД типа 1 и $\delta_0^{\text{ТП2}} = 0,027$ в ИПД типа 2.

Испытания ДД проводились на стенде, оснащенном датчиком давления МПА-15 и термокамерой МС-81 в температурном диапазоне $\pm 80^\circ\text{C}$.

Кратковременная нестабильность выходной частоты ИПД не превысила 10^{-5} за 1,0 мин, что позволило фиксировать изменение давления в $2 \cdot 10^{-3}\%$. Измеренные чувствительности S_p обоих ИПД составили $5,95 \cdot 10^2$ Гц·кПа $^{-1}$, а их удельные аддитивные температурные погрешности S_T не превысили соответственно 25 Гц· $^\circ\text{C}^{-1}$ в ИПД типа 1 и 8 Гц· $^\circ\text{C}^{-1}$ в ИПД типа 2. При этом предварительно рассчитанные по полученным зависимостям значения S_p и S_T соответственно составили $6,09 \cdot 10^2$ Гц·кПа $^{-1}$ и 16 Гц· $^\circ\text{C}^{-1}$ для типа 1, $6,1 \cdot 10^2$ Гц·кПа и 0 Гц· $^\circ\text{C}^{-1}$ для ИПД типа 2.

Результаты исследований датчиков давления демонстрируют хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, полученные аналитические выражения и графики позволяют при проектировании дифференциального ИПД на ПАВ с погрешностью до 5% оценить его чувствительность и обеспечить приведенную к диапазону измерения аддитивную температурную погрешность не более $10^{-2} \%$ · $^\circ\text{C}^{-1}$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лепих Я. И. Датчики механических величин на поверхностных акустических волнах // 35 Internat. wissenschaft. kolloquium technische hochschule. Ilmenau, DDR.— 1990. Vortragsreihe. D. 9.— S. 80—82.
2. Гуляев Ю. В., Колешко В. М., Мешков Ю. В. Тензоэффект в структурах на ПАВ со звуководом из монокристаллического кварца // Радиотехника и электроника.— 1988.— Т. 33, № 11.— С. 2448—2451.
3. Lepikh Ya. I. Strein effect in surface acoustic wave elements with a piezoelectric acoustic line sensors based on this effect // Semicond. Phys. Quart. Electron.— 2000.— Vol. 3, N 1.— P. 91—93.
4. Лопушенко В. К., Тентюк С. В., Черняк Н. Г. Расположение ПАВ-структур на мембранном чувствительном элементе датчика давления // Мат-лы конф. «Акустоэлектронные устройства обработки информации на ПАВ».— Москва, 1990.— С. 330—331.
5. Павловский М. А., Лопушенко В. К., Кондратенко Н. Г. Деформационные, температурные и гироскопические эффекты в автогенераторах по поверхностным акустическим волнам // Механика гироскопических систем.— 1990.— Вып. 9.— С. 50—56.
6. Биргер И.А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов.— М.: Наука, 1986.