

К. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, А. Н. БОНДАРЕНКО

Украина, г. Киев, Межотраслевой НИИ проблем механики "Ритм" при НТУУ "КПИ"

Дата поступления в редакцию  
30.01 2001 г.

Оппонент д. т. н. А. В. ЗБРУЦКИЙ

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛА

*Рассмотрены физико-технические основы проектирования прецизионного датчика давления для бортового оборудования ЛА и контрольно-проверочной аппаратуры.*

Современное бортовое оборудование летательных аппаратов и контрольно-проверочная аппаратура требуют точных и, в то же время, достаточно простых в изготовлении и недорогих датчиков первичных величин. Датчики давления с пневмомеханическим резонатором, удачно сочетающие в себе вышеперечисленные качества, разрабатываются в США (NASA-Ames), в Великобритании (фирма "Solartron"), в России (МПКБ "Восход"), в Японии (Fuji Elec. J.).

### Постановка задачи

Основным функциональным преобразователем датчика давления (ДД) с пневмомеханическим резонатором (ПМР) является пневмомеханическая автоколебательная система (ПМАС), выходная частота которой зависит от измеряемого давления. ПМАС (рис. 1) представляет собой планарный ПМР, который посредством системы съема (СС) и системы возбуждения (СВ) подключается в контур положительной обратной связи широкополосного усилителя У с нелинейной выходной характеристикой. Усилитель компенсирует потери энергии за период колебаний ПМР.

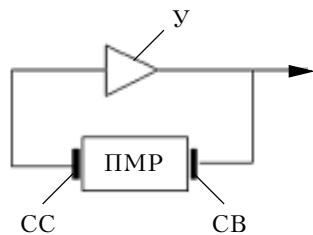


Рис. 1. Пневмомеханическая автоколебательная система

Конструктивно ПМР включает (рис. 2) плоскую пневмокамеру 1, заполненную газом, и плоский резонирующий элемент (РЭ), который совершает периодические незатухающие колебания с собственной резонансной частотой колебаний ПМР вблизи газонепроницаемого экрана (ГНЭ) 2. На рис. 2 РЭ условно представлен в виде жесткой эффективной части 3 с рабочей поверхностью  $S_{эф}$ , подвешенной на упругих элементах 4. На рис. 2 также обозначены усилитель 5, электроды СС 6 и СВ 7. (Обозначение

элементов 1-5 сохраняются на следующих рисунках.)

ПМР является работоспособным (его частота колебаний однозначно и требуемым образом зависит от измеряемого давления), если величина поперечного размера пневмокамеры (зазора  $\delta$  между РЭ

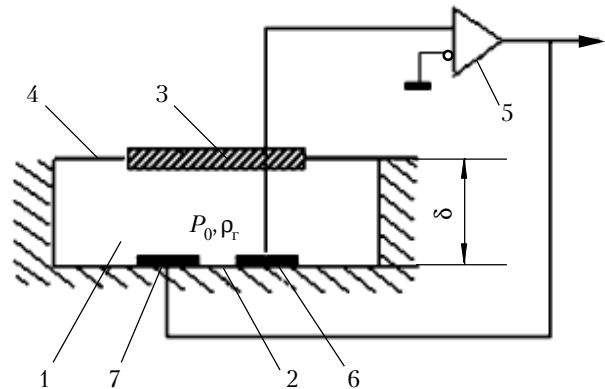


Рис. 2. Пневмомеханический резонатор:

1 — пневмокамера; 2 — газонепроницаемый экран; 3 — эффективная часть; 4 — упругий элемент; 5 — усилитель; 6 — электрод системы съема; 7 — электрод системы возбуждения

и ГНЭ) достаточно мала. При этом газ не успевает вытекать из пневмокамеры (или втекать в нее) за половину периода колебаний РЭ в вакууме. Он сжимается (расширяется), внося добавку в суммарную жесткость ПМР. Эта добавка называется присоединенной жесткостью РЭ или жесткостью упругой среды  $c_{пр}$ . Присоединенная жесткость  $c_{пр}$  зависит от давления газа, подаваемого в пневмокамеру, и конструктивных параметров пневмокамеры. Колеблющийся РЭ своей поверхностью увлекает часть окружающего его газа. Увлекаемый газ дает добавку в суммарную массу ПМР. Эта добавка называется присоединенной массой РЭ  $m_{пр}$  и зависит от плотности  $\rho_r$  газа и геометрии пневмокамеры. Собственная частота колебаний ПМР с учетом описанных выше эффектов качественно определяется выражением

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_{рз} + c_{пр}}{m_{рз} + m_{пр}}}, \quad (1)$$

где  $c_{рз}$  и  $m_{рз}$  — жесткость упругих элементов и масса РЭ.

Частота  $f$ , как и ее элементы  $c_{пр}$  и  $m_{пр}$ , зависит от давления  $P_0$  газа, заполняющего пневмокамеру, и конструктивных параметров пневмокамеры.

ДД с ПМР существующих конструкций [1, 2] измеряют давление контролируемой среды  $P_{и}$ , которая подается непосредственно в пневмокамеру ПМР ( $P_0=P_{и}$ ). Однако наиболее перспективно использование зависимости присоединенной жесткости  $c_{пр}$  от толщины  $\delta$  пневмокамеры. Базовая функциональная схема такого ДД представлена на рис. 3, а (здесь  $h$  – толщина РЭ,  $z$  – прогиб первичного преобразовательного элемента (ППЭ),  $\Delta_y$  – ширина упругих элементов,  $\Delta_n$  – ширина прорезей в РЭ,  $L$  – диаметр эффективной части РЭ). Величина  $\delta$  здесь определится прогибом ППЭ в зависимости от перепада давлений  $\Delta P=P_{и}-P_0$  между неизменным  $P_0$  в подмембранной (б) и измеряемым  $P_{и}$  в надмембранной (7) полостях датчика. ППЭ представляет собой мембрану 8 с жестким центром 9, к которому крепится подвижный ГНЭ 3. Резонирующий элемент в таком датчике является системой с сосредоточенными параметрами. Его круговая эффективная часть 3 и упругие элементы 4 изготавливаются электроэрозией или химическим травлением из одной тонкой круговой пластинки (рис. 3, б).

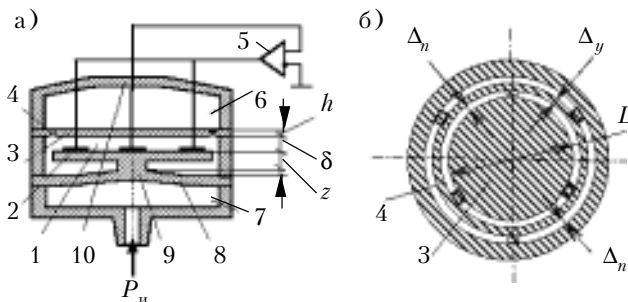


Рис. 3. Датчик давления с пневмомеханическим резонатором

Рассмотрим физико-технические основы работы и проектирования пневмомеханического ДД с ПМР, построенного по функциональной схеме рис. 3, а, а также оценим точностные возможности измерения давлений при помощи такого ДД.

**Исходные положения и условие работоспособности ПМР**

При описании физических процессов, происходящих в ПМР с узкой пневмокамерой, следует пользоваться средними по ее толщине значениями плотности  $\rho_r$  и давления  $P$  газа (т. к. длина возбуждаемой РЭ звуковой волны в газе  $\lambda=c_{зв}/\omega$ , где  $c_{зв}$  – скорость звука в газе,  $\omega$  – круговая частота колебаний РЭ, будет значительно превышать толщину пневмокамеры:  $\lambda \gg \delta$ ). Газ в пневмокамере испытывает адиабатические расширения и сжатия за период колебаний РЭ [3] вследствие большой инерционности процессов теплообмена с ее стенками. Малые амплитуды колебаний РЭ  $w$  определяют малые отклонения давления  $\bar{P}=P-P_0$  от его постоянной составляющей  $P_0$ . Эта постоянная составляющая задается внешним к пневмокамере пространством, объем которого намного превышает объем пневмокамеры.

Согласно методике, описанной в работе [4], эффективную часть (ЭЧ) плоского РЭ сводим к представленной на рис. 4, а эквивалентной прямоугольной пластинке (ЭПП) с характерными размерами  $b$  и  $L$ . Площадь ЭПП равна площади рабочей поверх-

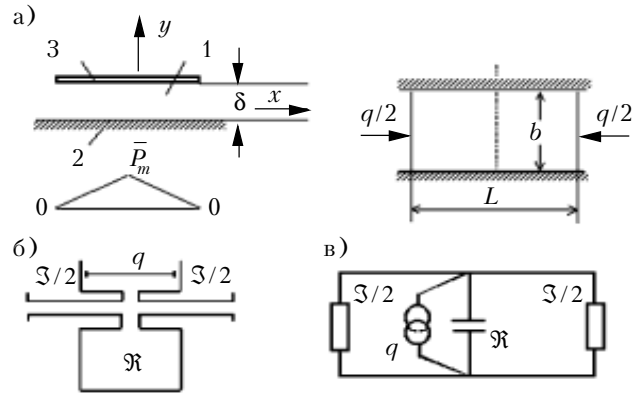


Рис. 4. Эквивалентные схемы

ности ЭЧ  $S_{эф}$ .  $L$  является диаметром ЭЧ,  $b=0,5\pi L$  – длиной средней окружности ЭЧ. Так как в окружном направлении под ЭЧ перепада давлений, а значит, и перетекания газа не будет, то пневмокамеру под ЭПП можно считать изолированной вдоль размера  $L$ . Для малых изменений объема пневмокамеры (малы амплитуды колебаний РЭ) воспользуемся линейным приближением распределения избыточного давления  $\bar{P}$  от  $\bar{P}_m=P_m-P_0$  в центре пневмокамеры до  $\bar{P}_0=0$  на свободном контуре (вдоль координаты  $x$  на рис. 4, а):

$$\bar{P} = \bar{P}_m \left(1 - \frac{2x}{L}\right).$$

Такую пневмокамеру заменим известной в пневмоавтоматике [5] эквивалентной пневмосистемой с сосредоточенными параметрами, которая состоит (рис. 4, б) из пневмоемкости пневмокамеры  $\mathfrak{X}$  и двух пневмосопротивлений  $\mathfrak{Z}/2$ , соединенных параллельно и подключенных к источнику переменной объемной скорости  $q$  с помощью исчезающе коротких соединительных каналов, не оказывающих сопротивления протеканию газа. Выражения для  $\mathfrak{X}$  и  $\mathfrak{Z}$  имеют вид [5, с. 37]

$$\mathfrak{X} = \frac{Lb\delta}{\gamma P_0}, \quad \mathfrak{Z} = \frac{12\eta L}{\delta^3 b}, \tag{2}$$

где  $\gamma$  – коэффициент Пуассона;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости газа, заполняющего пневмокамеру.

Функциональную схему эквивалентной пневмосистемы (рис. 4, б) удобно представить в виде электрической схемы аналога (рис. 4, в) [5, с. 38], постоянная времени  $T_p$  которой

$$T_p = \frac{\mathfrak{X}\mathfrak{Z}}{4} \tag{3}$$

является также постоянной времени исходной пневмокамеры (рис. 4, а).

Согласно теории автоматического управления, переходный процесс в системе мало меняет ее параметры на начальном этапе, пока длительность этого процесса не превышает его постоянной времени. Следовательно, газообмена между пневмокамерой и внешним объемом практически не будет при условии

$$T_p = (2\omega_0)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота колебаний РЭ в вакууме ( $\omega_0^2 = c_{\text{пэ}}/m_{\text{пэ}}$ ).

Подставив выражение (3) с учетом (2) в выражение (4) и проведя несложные преобразования, получим аналитическое выражение для условия появления присоединенной жесткости в пневмокамере, которое будем называть условием работоспособности ПМР:

$$\delta < [\delta] = k^* L \sqrt{\frac{\eta \omega_0}{\gamma P_0}}, \quad (5)$$

где  $[\delta]$  – допустимый зазор ПМР;  $k^* = 6^{0,5} \approx 2,45$ .

Это условие полностью совпадает с экспериментально полученным авторами [2], а значение коэффициента  $k^*$  попадает в заданный ими диапазон  $k^* = 1 \dots 3$ .

### Взаимодействие РЭ с газом

При выполнении условия (5) пневмокамера является практически изолированной вдоль краев ЭЧ, и достаточно рассмотреть лишь движение газа по ее толщине (по координате  $y$  на рис. 4, а). Потенциал скоростей  $\psi(y, t)$  [3] частичек газа в узкой пневмокамере (рис. 4, а) с одной колеблющейся (по закону  $w(t) = w_m \sin(\omega t)$ , где  $t$  – время,  $w_m$  – амплитуда колебаний) стенок (поверхность РЭ) должен удовлетворять волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{1}{c_{\text{зв}}^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0,$$

начальному  $\psi|_{t=0} = 0$  и краевым условиям (непроницаемости РЭ и ГНЭ) [3, с. 596]

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial y} \right|_{y=\delta} = 0, \quad \left. \frac{\partial \psi}{\partial y} \right|_{y=w} = -\frac{\partial w}{\partial t}.$$

Если, согласно методу Фурье (разделения переменных) [3], представим потенциал в виде произведения функций координат и времени  $\psi = Y(y)T(t)$  и подставим его в волновое уравнение, то получим

$$c_{\text{зв}} \frac{Y''}{Y} = \frac{\ddot{T}}{T} = -\omega^2,$$

где  $\omega^2$  – действительная постоянная величина, два штриха – полная производная по координате, две точки – по времени.

Решая два независимых уравнения относительно  $T$  и  $Y$  и требуя от потенциала  $\psi(y, t)$  соответствия начальному и краевым условиям, получим для него следующее выражение:

$$\psi(y, t) = \rho_{\Gamma} \frac{\cos[\lambda(\delta - y)]}{\lambda \sin[\lambda(\delta - w)]} \frac{\partial w}{\partial t}.$$

Согласно обобщенному закону вязкости Ньютона [3], нормальная к поверхности подвижной стенки составляющая тензора напряжений в газе равна

$$P_n = q^{(p)} + q^{(n)},$$

$$\text{где } q^{(p)} = \rho_{\Gamma} \left. \frac{\partial \psi}{\partial t} \right|_{y=w} = \rho_{\Gamma} \frac{\cos[\lambda(\delta - w)]}{\lambda \sin[\lambda(\delta - w)]} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

$$q^{(n)} = 2\eta \left. \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right|_{y=w} = 2\eta \frac{-\lambda \cos[\lambda(\delta - w)]}{\sin[\lambda(\delta - w)]} \frac{\partial w}{\partial t}.$$

В реальных конструкциях ДД с ПМР  $w \ll \delta$  и  $\lambda \delta \ll 1$ . Если с учетом этого разложить тригонометрические функции в степенной ряд и ограничиться для  $q^{(p)}$  третьей, а для  $q^{(n)}$  – первой степенью малости относительно  $\lambda \delta$ , то получим:

$$q^{(n)} = -\frac{2\eta}{\delta} \frac{\partial w}{\partial t};$$

$$q^{(p)} = \frac{\rho_{\Gamma}}{\lambda} \left[ \frac{1 - (\lambda \delta)^2}{2} \right] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \approx \frac{\rho_{\Gamma}}{\lambda^2 \delta} \left[ 1 - \frac{(\lambda \delta)^2}{3} \right] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q^{(c)} + q^{(m)},$$

где  $q^{(c)}$  – упругое давление на поверхность РЭ (присоединенная жесткость), которое сопротивляется изменению объема зазора;

$q^{(m)}$  – инерционное давление (присоединенная масса), которое увеличивает массу элемента поверхности РЭ.

С учетом известного [3, с. 9] выражения  $c_{\text{зв}}^2 = \gamma P_0 / \rho_{\Gamma}$ , приведенного выше выражения для  $\lambda$  и того, что  $\partial^2 w(t) / \partial t^2 = -\omega^2 w(t)$ , выражения для составляющих  $q^{(c)}$  и  $q^{(m)}$  приобретут такой вид:

$$q^{(c)} \approx -\frac{\gamma P_0}{\delta} w(t), \quad q^{(m)} \approx -\frac{\rho_{\Gamma} \delta}{3} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}.$$

Для величин конструктивных и физических параметров, которые встречаются на практике ( $\gamma P_0 \gg 2\eta \omega$ ,  $\rho_{\Gamma} \omega \delta^2 / 6 \gg \eta$ , реально же  $\gamma P_0 > 10^{-4} \eta \omega$ ,  $\rho_{\Gamma} \omega \delta^2 > 0,1 \pm 0,01 \eta$ ), влияние вязкого демпфирования вдоль поперечной координаты (по толщине пневмокамеры) на частоты колебаний ПМР будет пренебрежимо мало. А так как при выполнении условия (5) газ практически не покидает пневмокамеру, то и вязкое демпфирование в плоскости пневмокамеры также будет пренебрежимо мало.

### Частота собственных колебаний ПМР

Представим выражение (1) в виде

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \eta_m}} \sqrt{1 + \frac{c_{\text{нр}}}{(2\pi f_0) m_{\text{пэ}}}},$$

где  $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$  – частота колебаний РЭ в вакууме;

$\eta_m = m_{\text{нр}} / m_{\text{пэ}}$  – коэффициент учета присоединенной массы.

Жесткость упругой среды – это коэффициент возле прогиба  $w$  в выражении для упругой силы  $F_c$ , действующей со стороны газа в пневмокамере на поверхность РЭ:

$$F_c = q^{(c)} S_{\text{эф}} = c_{\text{пр}} w,$$

$$\text{откуда } c_{\text{пр}} = \frac{q^{(c)} S_{\text{эф}}}{w} = \frac{\gamma P_0}{\delta} S_{\text{эф}}.$$

Присоединенная масса – это коэффициент при второй производной от прогиба  $w$  по времени в выражении для инерционной силы  $F_m$ , действующей со стороны газа в пневмокамере на поверхность РЭ:

$$F_m = q^{(m)} S_{\text{эф}} = m_{\text{пр}} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

$$\text{откуда } m_{\text{пр}} = q^{(c)} S_{\text{эф}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right)^{-1} = \frac{\rho_r \delta}{3} S_{\text{эф}}.$$

При получении последнего выражения масса упругих элементов не учитывалась, т. к. практически она более чем на порядок меньше массы ЭЧ. Для плоского РЭ  $m_{\text{рз}} = \rho h S_{\text{эф}}$  ( $\rho$  – плотность материала РЭ), и с учетом выражений для присоединенных жесткости и массы получим следующие выражения для  $f$  и  $\eta_m$ :

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \eta_m}} \sqrt{1 + \frac{\gamma P_0}{(2\pi f_0)^2 \rho h \delta}}; \quad \eta_m = \frac{\rho_r (\delta + \delta^*)}{3\rho h}, \quad (6)$$

где  $\delta^* = V_{\text{ззз}} / S_{\text{эф}}$  – величина приведенного зазора между РЭ и кожухом 10 ДД (рис. 3, а);  
 $V_{\text{ззз}}$  – объем этого зазора.

Первое из выражений (6) практически совпадает с экспериментальным, полученным авторами работы [2] (в выражении (6) уточнено теоретическое значение коэффициента при давлении  $P_0$  и учтена присоединенная масса посредством коэффициента  $\eta_m$ ).

Зазор  $\delta$  между подвижной и неподвижной частями ПМР (рис. 3, а) выразим через его значение  $\delta_0$  при нейтральном положении мембраны  $\delta$  и прогиб  $z$  жесткого центра 9:  $\delta = \delta_0 - z$ . Если выбрать мембрану  $\delta$  толстой ( $R_n / h_n < 25$ , где  $h_n$  – ее толщина,  $R_n$  – радиус), то  $z = (z_0 / \Delta P_{\text{max}}) (P_{\text{и}} - P_0)$  [5, с. 69], где  $z_0$  – максимально допустимый прогиб мембраны  $\delta$ ,  $\Delta P_{\text{max}} = P_{\text{вп}} - P_0$  – максимальный перепад давлений на ней,  $P_{\text{вп}}$  – верхний предел измерения давлений. Тогда  $\delta = \delta_0 - (z_0 / \Delta P_{\text{max}}) (P_{\text{и}} - P_0)$ , и зависимость частоты собственных колебаний ПМР от измеряемого давления (без учета присоединенной массы) приобретет вид

$$f(P_{\text{и}}) = f_0 \sqrt{1 + \frac{D_f}{1 - D_{\text{и}} P_{\text{и}}}}, \quad (7)$$

где для удобства введены обозначения:

$$K_z = \frac{\gamma P_0}{\omega_0 \rho_0 h \delta_0};$$

$$D_f = \frac{K_z}{1 + \frac{z_0 P_0}{\delta_0 \Delta P_{\text{max}}}};$$

$$D_{\text{и}} = \frac{z_0}{\delta_0 \Delta P_{\text{max}}} \frac{1}{\left( 1 + \frac{z_0 P_0}{\delta_0 \Delta P_{\text{max}}} \right)}.$$

Максимальный прогиб  $z_0$  и зазор  $\delta_0$  выбираются из условий

$$[\delta] = \delta_{\text{min}} + z_0 \left( 1 + \frac{P_0}{\Delta P_{\text{max}}} \right), \quad \delta_0 = \delta_{\text{min}} + z_0, \quad (8)$$

где  $\delta_{\text{min}}$  – минимальный зазор между РЭ и подвижным ГНЭ.

Зазор  $\delta_{\text{min}}$  должен превышать амплитуду колебаний РЭ и быть технически реализуемым (практически  $\delta_{\text{min}} \geq 20$  мкм). Требуемый максимальный прогиб  $z_0$  при предельном измеряемом давлении ( $P_{\text{вп}}$ ) обеспечивается подбором толщины и диаметра мембраны ППЭ.

### Проектирование ДД с ПМР

Рассмотрим особенности проектирования ДД с ПМР, представленного на рис. 3. РЭ выбранной формы (рис. 3, б) определит такие характеристики:

$$c_{\text{рз}} \approx \frac{6Eh^3 \Delta_y}{(6^{-1} \pi (L + \Delta_y + 2\Delta_n))^3}; \quad m_{\text{рз}} = \rho h \frac{\pi L^2}{4};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{\text{рз}}}{m_{\text{рз}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6^4 E h^2 \Delta_y}{\pi^4 \rho L^5 (1 + (\Delta_y + 2\Delta_n)/L)^3}};$$

$$\delta < [\delta] \approx \frac{12\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\eta h}{\gamma P_0}} \sqrt{\frac{E \Delta_y}{\rho L}} \left( 1 - \frac{3}{4} \frac{(\Delta_y + 2\Delta_n)}{L} \right).$$

Получается, что допустимый зазор ПМР ДД слабо зависит практически от всех параметров РЭ (свойств материала  $\rho$  и  $E$ , его геометрии, в том числе и от характерного размера  $L$ ). Его ориентировочное числовое значение будет  $[\delta] \approx 100$  мкм для  $P_0 = 10^4$  Па,  $\gamma = 1,402$ ,  $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с) (воздух при температуре 0°С);  $E = 1,26 \cdot 10^{11}$  Па,  $\rho = 8,23 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (бронза БрБ-2);  $h = 3 \cdot 10^{-4}$  м,  $L = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $\Delta_y = 10^{-3}$  м,  $\Delta_n = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м. Для формирования такого зазора и заданного подмембранного давления используются базовые технологии приборостроения и несложная оснастка.

Если взять  $\delta_{\text{min}} = 40$  мкм (что тоже нетрудно реализовать), в диапазоне измеряемых давлений прибор будет иметь следующие характеристики:  $f_0 = 1$  кГц, минимальная частота колебаний ПМР (при нижнем пределе измеряемого давления  $P_{\text{ни}}$ , когда  $\delta = [\delta]$ )  $f(P_{\text{ни}}) = 1,6$  кГц, максимальная частота колебаний ПМР (при верхнем пределе измеряемого давления  $P_{\text{вп}}$ , когда  $\delta \approx \delta_{\text{min}}$ )  $f(P_{\text{вп}}) = 2,2$  кГц, максимальная девиация частоты при верхнем пределе измерения  $\Delta f = f(P_{\text{вп}}) - f(P_{\text{ни}}) = 600$  Гц. Это позволит прибору при измерении выходных частот ПМАС по периоду (с точностью до 0,1 Гц) иметь основную приведенную к верхнему пределу измерения погрешность менее 0,02%.

При заданном подмембранном давлении  $P_0$  и температуре 0°С плотность воздуха  $\rho_r = 0,129$  кг/м<sup>3</sup>. Максимальное влияние на частоту колебаний ПМР изменения присоединенной массы газа с такой плотностью вследствие перемещения ГНЭ следует из формул (6):

$$\Delta f_m \approx \frac{f(P_{\text{вп}}) \rho_r (\delta) - \delta_{\text{min}}}{2} \frac{1}{3\rho h} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гц.}$$

Такое влияние внесет в измерения ДД несущественную погрешность (около 0,0002%).

Максимальный прогиб мембраны ППЭ как круглой жестко закрепленной по внешнему краю пластинки с жестким центром [6, с. 71] равен

$$z_0 = \frac{3}{16} \frac{(1-\nu^2) R_n^4}{E_n h_n^3} (1-\xi^2)(1-\xi)^3 \Delta P_{\text{max}}, \quad (9)$$

где  $\nu$ ,  $E_n$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала мембраны, соответственно;

$$\xi = r_n/R_n;$$

$r_n$  – радиус жесткого центра  $\rho$  мембраны  $\delta$  (рис. 3, а).

В качестве материала для мембраны ППЭ выберем эливарный сплав 36НХТЮ ( $E_n = 1,9 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0,3$ ). Он прочный, коррозионноустойчивый, немагнитный, широко используется в приборостроении и имеет схожий с материалом РЭ температурный коэффициент расширения  $\alpha_l$  (для 36НХТЮ  $\alpha_l = -2,5 \cdot 10^{-4}$  1/К, для бронзы  $\alpha_l = -3,1 \cdot 10^{-4}$  1/К).

В диапазоне измерения статического атмосферного давления от 0 до  $P_{\text{вп}} = 1000$  мм рт.ст.  $\approx 1,3 \cdot 10^5$  Па ( $\Delta P_{\text{max}} = 1,2 \cdot 10^5$  Па) требуемый прогиб  $z_0 = 54$  мкм (следует из выражений (8)). Если внешний радиус крепления мембраны ППЭ с целью упрощения сборки ДД и уменьшения его габаритов выбрать равным внешнему радиусу крепления упругих элементов ( $R_n = 0,5(L+b) + \Delta_n = 8,25 \cdot 10^{-3}$  м),  $\xi = 0,2$ , то такой прогиб будет иметь мембрана толщиной  $h_n = 0,2$  мм (следует из выражения (9)).

При максимальном перепаде давлений  $\Delta P_{\text{max}}$  на мембране ППЭ должно выполняться условие прочности [6, с. 70]

$$\sigma_{\text{max}} < [\sigma], \quad \sigma_{\text{max}} = \frac{3}{4} (1-\xi^2) \left( \frac{R_n}{h_n} \right)^2 \sqrt{1-\nu + \nu^2} \Delta P_{\text{max}}, \quad (10)$$

где  $[\sigma] = \sigma_T/N$  – предельно допустимое напряжение;

$\sigma_T$  – предел текучести материала мембраны;

$N$  – запас прочности.

Для мембраны из сплава 36НХТЮ ( $\sigma_T = 1224$  МПа,  $N = 3$ ) при  $\Delta P_{\text{max}} = 1,2 \cdot 10^5$  Па оно заведомо выполняется:  $\sigma_{\text{max}} = 300$  МПа  $< [\sigma] = 408$  МПа. И такое наблюдается вплоть до  $P_{\text{вп max}} \approx 12$  атм, когда значение толщины ППЭ, получаемое из условия (9), подтверждается условием (10).

Поведение газа в герметизированной подмембранной полости описывается изобарным термодинамическим законом

$$P_0 = \frac{P_0^H}{T_0^H} T_0,$$

где  $P_0^H$  – давление газа при нормальной температуре  $T_0^H = 0^\circ\text{C}$ .

Бортовое оборудование чаще всего работает при температурах  $-55 \dots +55^\circ\text{C}$ . В таком температурном диапазоне давление в подмембранной полости изменяется от  $P_0^{-55^\circ\text{C}} = 0,8 \cdot 10^5$  Па до  $P_0^{+55^\circ\text{C}} = 1,2 \cdot 10^5$  Па, что даст максимальную девиацию частоты при верх-

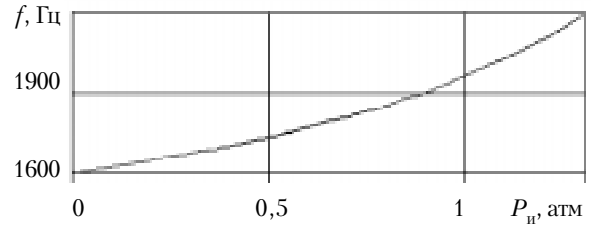


Рис. 5. Зависимость собственной частоты  $f$  колебаний ПМР от измеряемого давления  $P_{\text{и}}$  ДД с ППЭ (разделяющей мембраной)

нем пределе измеряемого давления  $\Delta f_{\text{вп}}^{55^\circ\text{C}} = 180$  Гц, т. е. около 0,3 максимальной полезной девиации частоты от измеряемого давления. Поэтому термодатчик, по показаниям которого следует производить термокомпенсацию, должен иметь основную приведенную к верхнему пределу измерения погрешность почти в 3,5 раза большую, чем ДД ( $0,02/0,3 \approx 0,07\%$ ).

Соответствующая измерению в диапазоне статического атмосферного давления 0...1000 мм рт.ст. ( $\approx 1,3 \cdot 10^5$  Па) выходная характеристика ДД  $f(P_{\text{и}})$  приведена на графике рис. 5.

#### Анализ результатов

Выходная характеристика датчика давления существенно нелинейна (рис. 5). Современная электроника успешно справляется с обработкой нелинейных зависимостей. А вот наибольшая крутизна преобразования давления  $P_{\text{и}}$  в частоту  $f$  (см. рис. 5) возле верхнего предела измерения ДД потребуются в самых ответственных режимах полета ЛА, в которых нужна наибольшая точность измерений, – возле поверхности Земли (на уровне моря) и с максимальными индикаторными скоростями.

Существующие пневмомеханические ДД, несмотря на высокую стабильность выходной характеристики, обладают двумя существенными недостатками: они чувствительны к изменению температуры и имеют невысокий верхний предел измерения (до 1,3 атм [1]).

В предлагаемом ДД с первичным преобразовательным элементом (рис. 3, а) разделяющая мембрана 7 замедляет теплопередачу из контролируемой среды в подмембранную полость 6, а значит, и скорость изменения температуры в ней. Вследствие этого присущая точному термодатчику, по показаниям которого будет проводиться термокомпенсация, тепловая инерционность не будет вносить существенной динамической погрешности в показания ДД. Для мгновенного учета изменения температуры в подмембранной полости целесообразно строить измерения по известной в приборостроении квазидифференциальной схеме, помещая в одной подмембранной полости две независимые пневмомеханические автоколебательные системы, выходная частота одной из которых (с подвижным ГНЭ) зависит от измеряемого давления и температуры, а второй (с неподвижным ГНЭ) – только от температуры.

Смысл проблемы верхнего предела измерения понятен из выражения (5). Допустимый зазор ПМР

тем меньше, чем больше давление газа  $P_0$ , подаваемого в пневмокамеру. При давлениях, превышающих 1,3 атм, величина допустимого зазора ПМР с элементами реальных размеров оказывается технологически нереализуемой (менее 20 мкм). Разделяющая мембрана ППЭ (рис. 3, а) развязывает давление  $P_0$ , которое определяет допустимый зазор ПМР, с измеряемым давлением  $P_{из}$ . Тем самым снимаются любые ограничения на верхний предел измерения ДД с ППЭ. Кроме того, в рассчитанном в первом приближении варианте конструкции ДД с ПМР практически все верхние пределы возможных измеряемых давлений обеспечиваются варьированием лишь толщины мембраны ППЭ, т. к. эти пределы ниже расчетного предельного  $P_{вп\ max}$  (при полете ЛА у поверхности Земли с максимально достижимой современной ЛА скоростью, втрое большей скорости звука, полное давление набегающего потока не превысит 12 атм).

Разделяющая мембрана также предохранит малые щелевые зазоры ПМР (порядка 40...100 мкм) от существенного для них воздействия пыли, влаги и других атмосферных явлений, позволит ДД измерять давление жидких и агрессивных сред.

\*\*\*

Таким образом, предложена новая базовая функциональная схема построения прецизионного датчика давления с пневмомеханическим резонатором для бортового оборудования летательных аппаратов и контрольно-проверочной аппаратуры, а также рас-

смотрены физико-технические основы его работы и проектирования. Предложенная схема обладает рядом преимуществ перед традиционными для данного класса ДД, основными из которых являются практически неограниченный диапазон измеряемого давления и состава контролируемой среды, а также существенное снижение динамической погрешности при учете изменения температуры контролируемой среды.

Расчеты в первом приближении варианта конструкции ДД с ПМР подтвердили его возможности по прецизионному измерению давлений жидкости и газов (с погрешностью на уровне 0,02%).

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 3628083 США, МКИ G 01 L 9/12. Wide range dynamic pressure sensor / John Dimeff, San Jose and James W. Lane. — Оpubл. 16.11.71.
2. А. с. 798523 СССР, МКИ G 01 L11/00. Частотный датчик давления / И. А. Горенштейн, В. Г. Кравцов. — Оpubл. 23.01.81, Бюл. № 3.
3. Ламб Г. Гидродинамика. — Г. — Л.: ОГИЗ — Гостехиздат, 1947.
4. Черняк М. Г., Бондаренко О. М. Фізико-математичні основи побудови датчиків тиску з пневмомеханічним резонатором // Наук. вісті НТУУ "Київський політехнічний інститут". — 1999. — № 3. — С. 88–101.
5. Левшина Э. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластики и оболочки. — М.: Физматгиз, 1963.



### СОЕДИНИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Число контактов до 180  
 Рабочее напряжение (амплитудное значение) до 250 В  
 Рабочий ток на контакт до 1,5 А, 1,8 А, 2 А  
 Шаг контактов 2,5 мм, 5 мм

### СОЕДИНИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного тока (частотой до 3 МГц) и импульсного при напряжении до 100 В, 355 В, 500 В (амплитудное значение) и различной силе тока на контакт (от 0,3 до 100 А).

Количество контактов от 3 до 50.

### СОЕДИНИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДЛЯ АВИАЦИИ

Предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного тока (частотой до 3 МГц) и импульсного при напряжении до 250 В, 1000 В (амплитудное значение) и в радиочастотных электрических цепях частотой до 6000 МГц, 10000 МГц при напряжении до 1000 В, 100 В (амплитудное значение).