

К. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, А. Н. БОНДАРЕНКО,  
С. И. ПЕТРОВСКИЙ

Дата поступления в редакцию  
21.03 2002 г.

Украина, г. Киев, Межотраслевой НИИ "Ритм" при НТУУ «КПИ»  
E-mail: sashbond@cisavd.ntu-kpi.kiev.ua

Опоненты  
д. т. н. А. В. ЗБРУЦКИЙ (НТУУ "КПИ", г. Киев),  
к. т. н. В. С. ГОЛУБ (НПФ "VD MAIS", г. Киев)

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕЦИЗИОННОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*Рассмотрена методика проектирования первичного и вторичного преобразовательных элементов датчика, получены формулы для вычисления их параметров.*

Датчики давления (ДД) с пневмомеханическим резонатором (ПМР) обладают высокой чувствительностью к измеряемой величине, стабильностью метрологических характеристик, технологичностью изготовления, что обуславливает их широкое производство в странах с развитым приборостроением (США, Великобритания, Россия, Япония). Наиболее перспективными являются ДД с ПМР, наделенные первичным преобразовательным элементом в виде разделяющей мембраны и вторичным преобразовательным элементом на резонирующем элементе с сосредоточенными параметрами [1].

Но наряду с такими положительными качествами, как независимость условия работоспособности ПМР от верхнего предела измерения ( $P_{вп}$ ), возможность измерения давления не только газов, но и жидкостей, датчик давления описанной конструкции имеет и существенные недостатки. Это температурная и временная нестабильность подмембранного давления ( $P_0$ ), ведущая к нестабильности выходной характеристики ДД. Температурная нестабильность вызвана изохорным термодинамическим процессом в герметичной подмембранной полости. Временная нестабильность связана с некоторым, очень малым, но все же ощутимым во времени, натеканием газа в герметичную подмембранную полость сквозь ее стенки и соединения между ограничивающими ее корпусными деталями.

Эффективным способом устранения указанных недостатков является построение ПМР на резонирующем элементе (РЭ) специальной формы, которая позволяет поочередно или одновременно возбуждать несколько видов колебаний РЭ. Собственные частоты этих колебаний несут алгоритмически или структурно разделяемую информацию о влияющих факторах, включающих измеряемое давление ( $P_{из}$ ), давление ( $P_0$ ) и изменение температуры газа ( $\Delta T$ ) в подмембранной полости.

Целью данной статьи являются:

– получение зависимостей, по которым можно выбрать основные параметры первичного и вторичного преобразовательных элементов датчика давления с ПМР;

– оценка возможностей построения ПМР с несколькими собственными частотами колебаний РЭ специальной формы.

При рассмотрении элементов ДД с ПМР воспользуемся следующими исходными положениями.

1. Прогиб мембраны и упругих элементов меньше их толщины, поэтому их жесткость не зависит от величины прогиба и напряжения в материале. Прогиб линейно зависит от приложенных внешних усилий. Равномерные растягивающие напряжения в срединной поверхности очень малы.

2. Диапазон рабочих температур небольшой:  $-55...+55^\circ\text{C}$ . Температурные изменения модуля Юнга и линейных размеров элементов ДД в таком диапазоне считаются линейными, зависимости динамической вязкости ( $\eta$ ) и коэффициента Пуассона ( $\gamma$ ) газа от температуры не учитываются ( $\gamma=1,4$ ;  $\eta=1,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ).

3. Натекание газа в подмембранную полость происходит очень медленно (в пределах 5—30% от ее объема за все время гарантийного срока работы ДД) и не сказывается на работоспособности ПМР.

### Проектирование первичного преобразовательного элемента (ППЭ)

Зазор между газонепроницаемым экраном (ГНЭ) и эффективной частью РЭ ( $\delta_0$ ) и максимальное значение допустимого прогиба мембраны ( $z_0$ ) при предельном измеряемом давлении ( $P_{вп}$ ) выбираются из условий:

$$\delta_0 = \delta_{\min} + z_0 ; \quad (1)$$

$$z_0 \leq ([\delta] - \delta_{\min}) \frac{P_{вп} - P_0}{P_{вп}} , \quad (2)$$

где  $\delta_{\min}$  — минимальный зазор между РЭ и подвижным ГНЭ, сравнимый с амплитудой колебаний РЭ и погрешностями сборки ДД;

$[\delta]$  — допустимая толщина пневмокамеры.

Величина допустимого зазора ПМР определяется подмембранным давлением  $P_0$ , не зависящим от измеряемого [1]. Верхний предел измерения ДД обеспечивается требуемым прогибом, зависящим от фи-

зических и геометрических параметров мембраны (ППЭ) [2, с. 71]:

$$z_0 = \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu_n^2) R_n^4}{E_n h_n^3} (1 - \xi^2) (1 - \xi)^3 (P_{\text{вп}} - P_0), \quad (3)$$

где  $E_n$  и  $\nu_n$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала мембраны, соответственно;  
 $h_n$  — толщина мембраны;  
 $\xi = r_n/R_n$ ;  
 $r_n$  и  $R_n$  — радиусы жесткого центра и заземления мембраны ППЭ, соответственно.

Выбор параметров мембраны дополнительно ограничивается выполнением условия прочности [2, с. 72] при максимальном перепаде давления на ней:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{4} (1 - \xi^2) \left( \frac{R_n}{h_n} \right)^2 \sqrt{1 - \nu_n + \nu_n^2} (P_{\text{вп}} - P_0) < [\sigma], \quad (4)$$

где  $[\sigma]$  — предельно допустимое напряжение,  $[\sigma] = \sigma_T/n$ ;  
 $\sigma_T$  и  $n$  — предел текучести и запас прочности материала мембраны, соответственно;

$\sigma_{\text{max}}$  — максимальное эквивалентное напряжение в мембране по критерию удельной потенциальной энергии формоизменения [3, с. 198].

Выбор материала мембраны ограничен соображениями необходимой прочности, безгистерезисности, упругости, коррозионной стойкости, температурной стабильности. К таким материалам относятся сплавы 36НХТЮ и 12Х18Н10Т, бронза БрБ-2.

Радиус жесткого центра  $r_n$  выбирается как можно меньшим, чтобы снизить его влияние на характеристики мембранного чувствительного элемента, но достаточным с точки зрения технологичности изготовления. Этим требованиям удовлетворяет величина  $r_n = 5 \dots 10$  мм.

Толщину и радиус заземления мембраны можно найти, решив систему уравнений (2) и (3). В результате получим:

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{3}{16} \frac{(1 - \nu_n^2) R_n^4}{E_n} \frac{z_0}{(1 - \xi^2)(1 - \xi)^3} (P_{\text{вп}} - P_0)}; \quad (5)$$

$$R_n \geq 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{1 + \xi}{(1 - \xi)^5}} \frac{(1 - \nu_n + \nu_n^2)^{0,75}}{1 - \nu_n^2} E_n \frac{z_0}{(\sigma_{\text{max}})^{1,5}} \sqrt{P_{\text{вп}} - P_0}. \quad (6)$$

Таким образом, для проектирования ППЭ имеем зависимости (1), (2), (5) и (6).

### Проектирование вторичного преобразовательного элемента (ВПЭ)

Рассмотрим ВПЭ с четырехкруговым РЭ, схема которого изображена на рис. 1. (Круги, лежащие на разных осях симметрии, выполняются разными, а на одной оси симметрии — одинаковыми.) В конструкцию вводится дополнительный неподвижный ГНЭ (рис. 2).

Рассматриваемая пневмомеханическая автоколебательная система возбуждает и поддерживает следующие колебания РЭ: поступательное вдоль оси  $x$ , перпендикулярной к серединной поверхности РЭ (рис. 2, а), и угловые вокруг осей симметрии РЭ  $y$  и  $z$ , которые делят круги пополам (рис. 2, б и в).

Система уравнений, которая описывает собственные частоты возбуждаемых видов колебаний ПМР, имеет вид (введение второго слагаемого в уравнениях обусловлено наличием дополнительного ГНЭ):

$$\begin{cases} f_x^2 = f_{0x}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[ \delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}; \\ f_y^2 = f_{0y}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[ \delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}; \\ f_z^2 = f_{0z}^2 (1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_1} + k_{2z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[ \delta_2 - \frac{z_0 (P_{\text{и}} - P_0)}{P_{\text{вп}} - P_0} \right]}; \end{cases} \quad (7)$$

где  $f_{0j}$  — собственные частоты колебаний РЭ в вакууме ( $j=x, y, z$ );

$\alpha_E$  — температурный коэффициент модуля упругости материала РЭ;

$k_{ij}$  — числовые коэффициенты, зависящие от коэффициентов жесткостных и массовых характеристик ПМР ( $i=1, 2$ );

$\rho$  — плотность материала РЭ;

$\delta_1$  и  $\delta_2$  — воздушные зазоры под РЭ со стороны неподвижного и подвижного ГНЭ, соответственно.

Специальным образом подобранные размеры  $L_1$  и  $L_2$  и величины зазоров  $\delta_1$  и  $\delta_2$  позволяют создать необходимое отличие в собственных частотах  $f_{0j}$  и значениях коэффициентов  $k_{ij}$ , дающее линейную независимость системе уравнений (7).

Искомые величинами в системе являются измеряемое давление  $P_{\text{и}}$ , подмембранное давление  $P_0$  и отклонение температуры  $\Delta T$  от нормального значения.

Решение системы уравнений выполняется вычислительным устройством, на вход которого подаются выходные частоты пневмомеханической автоколебательной системы  $f_x, f_y$  и  $f_z$ , а с выхода снимаются сигналы, пропорциональные величинам  $P_{\text{и}}, P_0$  и  $\Delta T$ .

Критерием подбора числовых коэффициентов  $k_{ij}$  является следующее. Возьмем попарно отношения коэффициентов при одинаковых слагаемых любых двух уравнений системы и попарные отношения частот  $f_{0j}$ . Одно из соотношений должно отличаться от двух других. Если это отличие в два раза, точность

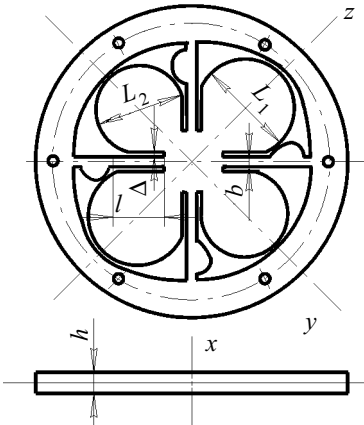


Рис. 1. Четырехкруговой резонирующий элемент:

$h$  — толщина РЭ;  $L_1, L_2$  — характерные размеры кругов РЭ;  $\Delta$  — ширина прорезей;  $l, b$  — длина и ширина упругого элемента

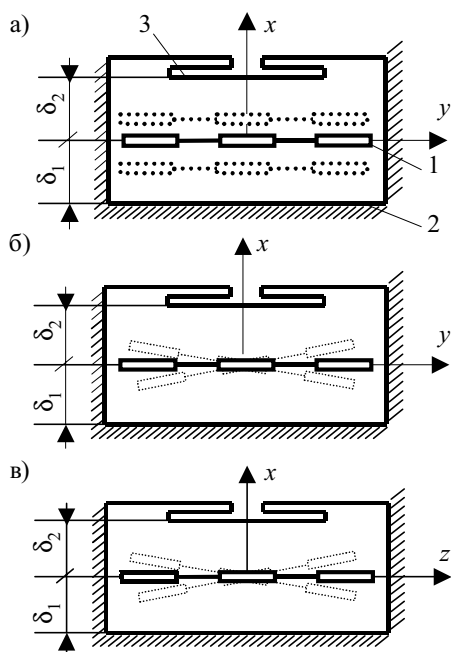


Рис. 2. Виды колебаний РЭ:  
 а — поступательное; б, в — угловые;  
 1 — резонирующий элемент; 2 — неподвижный ГНЭ; 3 — подвижный ГНЭ

вычисления величин  $P_{из}$ ,  $P_0$  и  $\Delta T$  по известным  $f_x, f_y$  и  $f_z$  будет максимальной.

Чтобы правильно подобрать коэффициенты системы (7), необходимо провести численное моделирование конкретной конструкции ВПЭ.

При рассмотрении конструкции ВПЭ, представленной на рис. 1, вводились некоторые упрощения. Эффективные части большого и меньшего кругов и центрального участка РЭ рассматривались как геометрические круги с диаметрами, равными их характерным размерам ( $L_1$  — большего,  $L_2$  — меньшего круга,  $L_{ц}$  — центра,  $L_1 > L_2 > L_{ц}$ ). Из конструктивных соображений размеры частей РЭ связывались между собой следующим образом:

$$l=0,5L_2; b=0,2l; L_{ц} = L_1 \left( \sqrt{2 \left( 1 + \frac{2\Delta + b}{L_1} \right)} - 1 \right);$$

$$Z_C = \frac{L_1 + 2\Delta + b}{\sqrt{2}}; Y_C = \frac{L_2 + 2\Delta + b}{\sqrt{2}}; \frac{L_2}{L_1} = \lambda; \lambda < 1;$$

$$k_{1j} \approx k_{2j}(1 + \Delta_j),$$

где  $Z_C, Y_C$  — центры масс больших и малых кругов относительно осей  $y$  и  $z$ , соответственно;

$\lambda$  — числовой коэффициент, который вводится для удобства и наглядности моделирования;

$\Delta_j$  — относительные добавки из-за влияния жесткости газа [1] под малыми элементами РЭ, которые вносят различие в числовые коэффициенты последних двух слагаемых любого из уравнений системы (7), а физически изменяют характер зависимости жесткости газа в меньшем зазоре по сравнению с характером зависимости в большем зазоре на какую-то постоянную добавку.

Упругие элементы ВПЭ лежат на взаимортогональных осях. Оси симметрии РЭ тоже взаиморто-

гональны. Зазор  $\delta_1$  между РЭ и неподвижным ГНЭ формируется большим, чем допустимый зазор  $[\delta_2]$  между РЭ и подвижным ГНЭ (рис. 2).

Величины зазоров  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , характерных размеров  $L_1$  и  $L_2$  и подмембранного давления  $P_0$  подбирались так, чтобы при любых перемещениях подвижного ГНЭ выполнялись следующие условия:

— для поступательного колебания РЭ (рис. 2, а) допустимые величины зазоров [1] между РЭ и ГНЭ 2 и 3 должны быть больше соответствующих величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$ ;

— для углового колебания РЭ вокруг оси  $z$ , которая делит большие круги пополам (рис. 2, б), допустимые величины зазоров между РЭ и подвижным ГНЭ под всеми кругами должны быть больше величины  $\delta_2$ , а допустимые величины зазоров между РЭ и неподвижным ГНЭ под большими кругами (реально — половинками кругов) должны быть меньше  $\delta_1$ .

Только таким образом мы сможем удовлетворить условию подбора коэффициентов системы (7).

Желательно также, чтобы для углового колебания РЭ вокруг оси  $y$  (рис. 2, в) допустимые величины соответствующих зазоров под большими кругами были больше величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , а под малыми кругами — меньше. Большую роль в том, что под меньшими кругами допустимые зазоры малы, играет то, что ось этих колебаний  $y$  делит их пополам, тем самым уменьшая существенно (в два раза) их характерный размер.

Назовем эти условия необходимыми условиями проектирования ВПЭ.

Расчет параметров ВПЭ проводился в несколько этапов с использованием прикладного пакета MathCad. Сначала определялись собственные частоты колебаний РЭ в вакууме и по ним выбирался зазор  $\delta_2$  между РЭ и подвижным ГНЭ. Далее, с учетом увеличения частоты колебаний РЭ от его взаимодействия с газом в меньшей пневмокамере (между РЭ и подвижным ГНЭ), вычислялся больший допустимый зазор  $\delta_1$  (между РЭ и неподвижным ГНЭ). В конце проверялось выполнение условия работоспособности под половинками кругов с учетом еще большего увеличения частоты колебаний ПМР из-за жесткости газа в пневмокамерах уже с двух сторон РЭ. Подбор параметров проводился до тех пор, пока не были выполнены необходимые условия проектирования ВПЭ.

### Результаты численного моделирования конструкции датчика давления с ПМР

Параметры ВПЭ:

$L_1=2$  см;  $\lambda=0,8$ ;  $\Delta=0,2$  мм;  $l=5$  мм;  $b=2$  мм;  $h=0,3$  мм;  $\delta_{\min}=40$  мкм; материал РЭ — бронза БрБ-2 ( $E=1,28 \times 10^{11}$  Па;  $\nu=0,28$ ;  $\rho=8,26 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

Параметры ППЭ:

$R_n=29$  мм;  $r_n=5$  мм; сплав 36НХТЮ ( $E_n=1,9 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu_n=0,29$ ,  $\sigma_T=1500$  МПа,  $n=3$ ).

Подмембранное давление  $P_0=0,1$  атм.

Параметры ДД:

$f_{0x}=507$  Гц;  $f_{0y}=298$  Гц;  $f_{0z}=420$  Гц;  $k_{y1}=0,875$ ;  $k_{z1}=0,751$ ;  $\Delta_1=0,166$ ;  $\Delta_2=0,029$ ; угловая и линейная жесткость РЭ  $1,56$  Н·м и  $2,76 \cdot 10^4$  Н/м, соответственно; масса РЭ  $2,7$  г; сила возбуждения колебаний вдоль оси  $x$

$F_x=0,08$  Н; начальная амплитуда колебаний 3 мкм;  $\delta_2 \approx 70$  мкм;  $[\delta_1] \approx 130$  мкм;  $L_{II} = 9$  мм; минимальные частоты колебаний ПМР ( $P_{II}=0$  атм)  $f_x^{min}=1,83$  кГц,  $f_y^{min}=1,7$  кГц,  $f_z^{min}=1,66$  кГц; максимальные девиации частоты при верхнем пределе измерения  $\Delta f_x=452$  Гц,  $\Delta f_y=444$  Гц,  $\Delta f_z=436$  Гц;  $z_0=30$  мкм при  $P_{вп}=2,8$  атм;  $h_n=1,6$  мм;  $\sigma_{max}=2 \cdot 10^7$  Па  $\ll [\sigma]=5 \cdot 10^8$  Па.

**Выводы и рекомендации**

Результаты моделирования доказывают возможность практической реализации прецизионного датчика давления с пневмомеханическим резонатором.

Фрезерование мембраны толщиной в 1,6 мм не будет сложным, тогда как собственная частота колебаний жесткой мембраны будет существенно превышать частоты колебаний ПМР.

Зазоры  $\delta_2=70$  мкм и  $\delta_1=120$  мкм при диаметрах кругов  $L_2=2$  см и  $L_1=1,6$  см можно реализовать с помощью калибровочных шайб при довольно невысоких допусках на сборку (порядка  $\pm 0,01$  мкм).

При измерении выходной частоты датчика давления по периоду с погрешностью  $\delta_f=0,1$  Гц, распространенной для бортовых измерителей частоты, и девиации частоты порядка 400 Гц получаем чувствительность прибора к измеряемому давлению на уровне 0,025% от верхнего предела измерения. Одновременное измерение подмембранного давления и температуры РЭ, даже при полученном различии относительных добавок  $\Delta_z$  и  $\Delta_y$  в 13%, позволяет компенсировать температурную погрешность до уровня порога чувствительности ДД и допускает (без ущерба для точности прибора) увеличение давления в подмембранной полости на 10% из-за долговременного просачивания газа в нее.

Для достижения максимальной разности значений  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$ , а также между частотами колебаний РЭ в вакууме, вопрос проектирования ДД с ПМР требует дальнейшей проработки, в том числе с применением известных методов оптимального проектирования [4].

\*\*\*

Таким образом, разработана методика проектирования и расчета первичного и качественно нового вторичного преобразовательного элемента, получена система основных формул для вычисления их параметров. Результаты расчетов показали возможность технической реализации предложенной конструкции датчика давления с тремя выходными частотами.

Прибор имеет высокую технологичность и относительно небольшую себестоимость изготовления. Это придает ему ряд преимуществ перед существующими прецизионными датчиками давления авиационного использования, а значит, и конкурентоспособность на рынке датчиковой аппаратуры.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Черняк Н. Г., Бондаренко А. Н. Прецизионный датчик давления с пневмомеханическим резонатором для бортового оборудования ЛА // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 38—43.
2. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки.— М.: Физматгиз, 1963.
3. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.— К.: Наук. думка, 1988.
4. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование.— М.: Мир, 1983.



**Каждому  
подписчику  
ЭКиС —**

все выпуски каталогов  
электронных компонентов,  
поставляемых VD MAIS!

Бесплатная рассылка производится по заявке, направленной в VD MAIS по почте или факсу (044) 227-3668 с указанием адреса, ФИО получателя и копией абонемента о подписке на 2002 год.