

К. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, к. т. н. А. Н. БОНДАРЕНКО,  
Г. А. СКРИПКОВСКИЙ, к. т. н. В. К. ЛОПУШЕНКО

Украина, НТУУ "Киевский политехнический институт"  
E-mail: sashbond@cisavd.ntu-kpi.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
02.02 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. С. ГОЛУБ  
(НПФ VD MAIS, г. Киев)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*Испытан макет датчика давления с пневмомеханическим резонатором. Показана возможность построения датчиков для бортового оборудования с погрешностью менее 0,1%.*

Современные измерения требуют все более высоких точностей. В связи с этим постоянно растет спрос на прецизионные и повышенной точности датчики давления для бортового оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

Датчики давления традиционных типов, к примеру, наиболее точные и практичные для бортового оборудования — с резонирующим цилиндром (разработка МПКБ «Восход», Россия или Solartron, Великобритания), достаточно сложны в реализации. Необходимой высокой стабильности собственной частоты резонаторов добиваются годами их старения, постоянным совершенствованием технологии изготовления и средств контроля технологических параметров резонатора, специальной термообработкой, подбором материала и другими сложными операциями.

Вместе с тем все большее внимание привлекают датчики на новых физических принципах действия. Такие датчики могут иметь более простую технологию изготовления, более низкую себестоимость при относительно высоких технических характеристиках. Одним из таких датчиков давления является датчик с пневмомеханическим резонатором.

Датчики давления с пневмомеханическим резонатором обладают высокой стабильностью метрологических характеристик, чувствительностью к измеряемой величине, технологичностью изготовления. Они используются как широкодиапазонные датчики в аэродинамических трубах (NASA-Ames, США [1]), барометрические высотомеры (МПКБ «Восход» [2—4] и Solartron [5]), в лабораторных исследованиях («Fuji Elec. J.» [6]).

Авторами статьи были разработаны физико-технические основы построения датчиков давления с пневмомеханическим резонатором [7]. Полученные результаты подтверждаются зарубежными экспериментальными исследованиями. Однако экспериментальных данных для проверки результатов моделирования датчиков такого типа с нелинейным сопротивлением газообмену в пневмокамерах в научно-технической литературе недостаточно [1, 2]. Фактически

имеются некоторые результаты только для серийно изготавливаемого датчика с нелинейным пневмосопротивлением, созданного фирмой NASA-Ames. Такие датчики наиболее просты в изготовлении, имеют более высокий верхний предел измерения, чем другие датчики давления с пневмомеханическим резонатором.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям датчиков с нелинейным пневмосопротивлением. Для исследований был разработан и изготовлен макет, прототипом которого был упомянутый ранее датчик фирмы NASA-Ames.

Пневмомеханический резонатор (ПМР) макета (рис. 1) состоит из резонирующего элемента (РЭ) 1 и пневмокамеры 3 между РЭ и газонепроницаемым экраном 5. Пневмокамера отделена от внешней среды нелинейным сопротивлением в виде узких щелей 7 типа отверстия в стенке, а именно двумя параллельными прямыми прорезями шириной  $\Delta$  в РЭ. Во время колебаний резонатора газ в пневмокамере 3 попеременно расширяется и сжимается, стараясь соответственно натечь или вытечь из пневмокамеры.

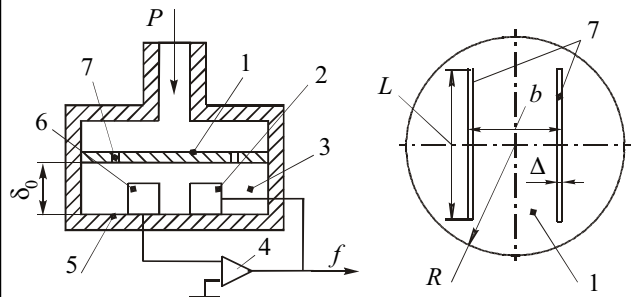


Рис. 1. Функциональная схема макета датчика давления

ПМР макета является частотоподающим элементом автоколебательной системы. Он включается в контур положительной обратной связи широкополосного усилителя 4 с помощью емкостной системы съема 6 и электромагнитной системы 2 возбуждения колебаний РЭ. Выходным параметром, который определяется измеряемым давлением  $P$ , является собственная частота колебаний резонатора  $f$  [7].

Электрод С1 (рис. 2) системы съема (6 на рис. 1) питается генератором, который состоит из компаратора на операционном усилителе (ОУ) DA1 и интегратора на ОУ DA3. Емкость С1 зависит от прогиба резонирующего элемента (1 на рис. 1) и определяет коэффициент преобразования усилителя на ОУ DA2.

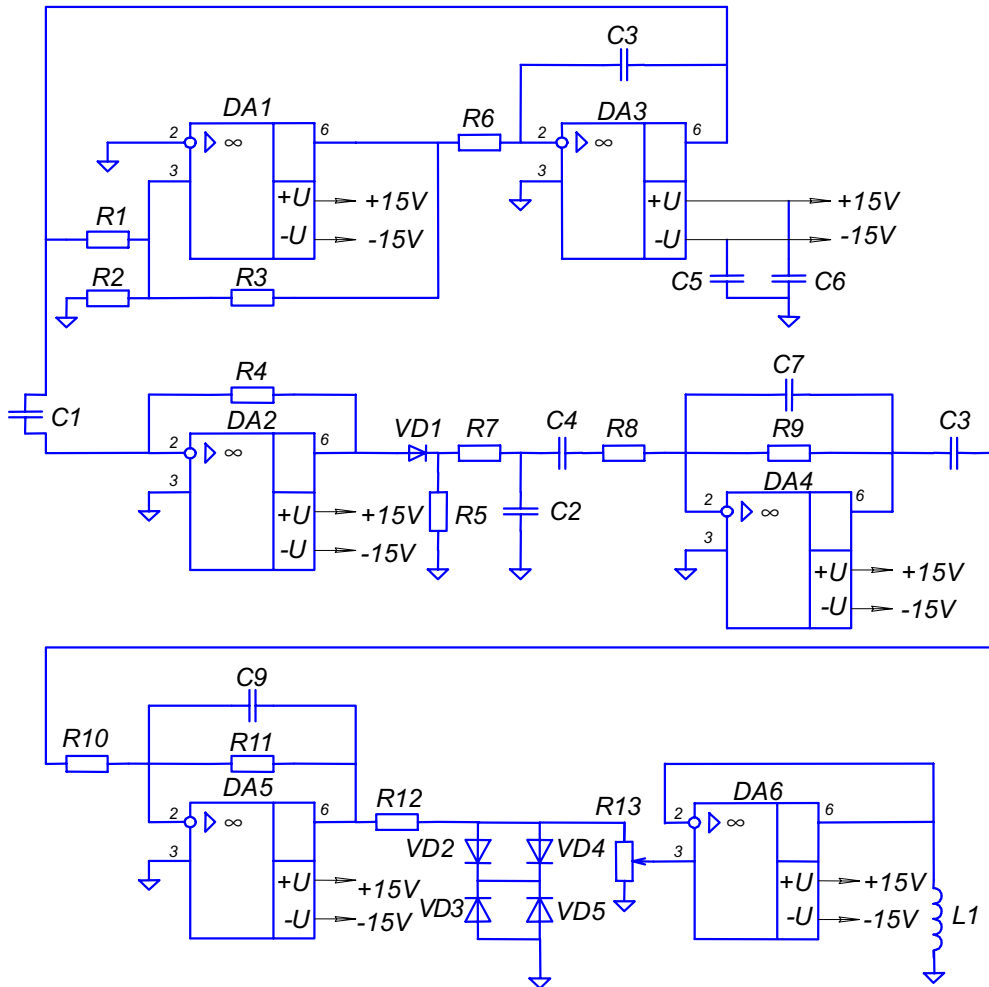


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема макета:  
 L1 — катушка индуктивности; C1—C9 — конденсаторы; R1—R13 — активные сопротивления;  
 DA1—DA6 — операционные усилители; VD1—VD5 — диоды; U — напряжение питания

Переменная (с частотой колебаний РЭ) составляющая напряжения на выходе усилителя отделяется амплитудным детектором, который состоит из диода VD1, резисторов R5, R7 и конденсатора C2. Эта переменная составляющая усиливается в двухкаскадном усилителе на ОУ DA4, DA5. Оба каскада построены по одинаковой схеме фильтра, который имеет максимальный коэффициент усиления на частоте собственных колебаний РЭ.

Сигнал из выхода усилителя попадает на вход нелинейного элемента, построенного на резисторе R12

и на параллельно включенных диодах VD2—VD5. Такой элемент имеет коэффициент передачи для малых сигналов (меньших предела насыщения усилителя) близкий к единице, что способствует возникновению постоянных колебаний после включения питания датчика давления. При увеличении амплитуды колебаний коэффициент передачи нелинейного элемента уменьшается, что приводит к стабилизации амплитуды колебаний РЭ. Величина амплитуды колебаний РЭ регулируется с помощью потенциометра R13, из выхода которого напряжение идет к усилителю мощности на ОУ DA6. Нагрузкой последнего является катушка L1 электромагнитной системы возбуждения (7 на рис. 1) колебаний резонирующего элемента. Тем самым замыкается положительная обратная связь автоколебательной системы датчика.

Элементы макета приведены на рис. 3.

Макет функционирует как в режиме демпфирования колебаний газом в пневмокамере, так и в режиме, использующем упругость газа в пневмокамере. В режиме демпфирования [1] изменение собственной частоты  $f$  ПМП как колебательного звена в первом приближении пропорционально коэффициенту  $\xi \approx k_{\xi} P$  (см. таблицу) относительного демпфирования (при малых его значениях,  $\xi \ll 1$ ). Благодаря

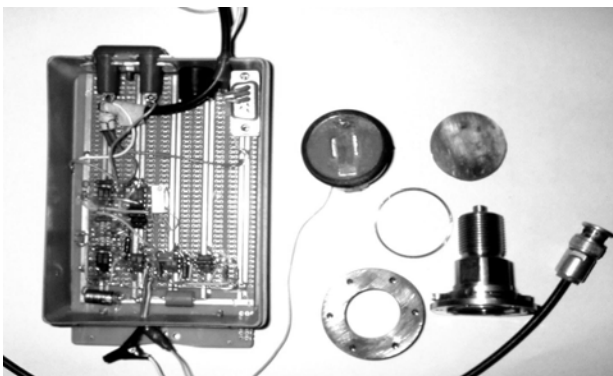


Рис. 3. Элементы макета датчика давления

Параметры	Числовое значение параметра		
	абсолютное	относительное, %	теоретическое
Коэффициент условия работоспособности $k_\delta$ $\delta_0 \geq k_\delta \frac{c_{зв}^2}{w_m (2\pi f_0)^2} \left( \frac{S_\Delta}{S_z} \right)^2, S_\Delta=L\Delta, S_z=\pi R^2$	6	—	$k_\delta = \frac{4}{0,87k_v \cdot 2,5} = 6,6,$ где $k_v=0,28$
Коэффициенты функций преобразования: $k_p$ , с использованием упругости газа, когда $f = \sqrt{f_0^2 + \frac{k_p P}{\rho h \delta_0}}$	0,19	—	$k_p = \frac{k_v^2 \gamma}{k_m} = 0,21,$ где $k_m=0,5$
$k_\xi$ , с использованием демпфирующего газа, когда $f \approx f_0(1-k_\xi P)$	$9 \cdot 10^{-7}$	—	$k_\xi \approx 0,85 \frac{\gamma}{c_{зв}^2} \left( \frac{Lb}{h\Delta} \right)^2 \frac{(k_v)^2 f_0 w_m}{\sqrt{k_m E \rho}} \approx 10^{-6}$
Выходная частота $f$ при $P=1$ атм: с использованием упругости газа с использованием демпфирующего газа	1035 Гц 843 Гц	—	917 Гц 717 Гц
Девиации частоты в диапазоне измерения давления $P=1...1,5$ атм: с использованием упругости газа с использованием демпфирующего газа	60 Гц 21 Гц	100 30	67 Гц 24 Гц
Температурная погрешность в диапазоне $-30...+60^\circ\text{C}$	6 Гц	5	6%
Нестабильность частоты: краткосрочная (до 1 мин) режимная (до 10 ч) долгосрочная (до 10 сут)	0,2 Гц 0,4 Гц 0,5 Гц	0,3 0,6 0,9	—

\* Здесь  $\delta_0$  — толщина пневмокамеры;  $c_{зв}$  — скорость звука газа в пневмокамере (332 м/с для воздуха);  $w_m$  — амплитуда колебаний РЭ;  $f_0$  — собственная частота колебаний РЭ в вакууме;  $L$  — длина РЭ;  $\Delta$  — ширина прорезей;  $R$  — радиус закрепления РЭ;  $k_v$  — коэффициент вытесненного объема РЭ;  $\rho$  — плотность материала РЭ;  $h$  — толщина РЭ;  $\gamma$  — коэффициент Пуассона;  $k_m$  — коэффициент эквивалентной массы РЭ;  $b$  — ширина РЭ;  $E$  — модуль упругости материала РЭ.

значительной величине пневмосопротивления зазора 7 (рис. 1) величина относительного демпфирования  $\xi$ , а значит, и изменения частоты ПМР, становится ощутимой. Поскольку коэффициент  $\xi$  зависит от давления  $P$ , то и собственная частота  $f$  ПМР зависит от давления  $P$ .

Для режима, использующего упругость газа, пневмосопротивления задавались еще большими, чтобы газ не успевал натекать в пневмокамеру (или вытекать из нее) за полупериод колебаний РЭ. Этот режим наступает, если выполняется условие работоспособности ПМР, представленное в таблице. Тогда газ в пневмокамере только расширяется (или сжимается), увеличивая суммарную жесткость и собственную частоту  $f$  колебаний ПМР:

$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{c_{пр}}{(2\pi f_0)^2 m_{ре}}},$$

где  $c_{пр}$  — присоединенная жесткость,  $c_{пр} = (k_s k_v)^2 \gamma P \delta_0$ ;  
 $k_s$  — коэффициент эффективной площади РЭ;  
 $m_{ре}$  — эквивалентная масса РЭ,  $m_{ре} = k_m \rho h S_{эф}$ ;  
 $S_{эф}$  — эффективная площадь РЭ.

Упругость газа и частота колебаний ПМР  $f$  зависят от измеряемого давления  $P$  (см. табл.). Переход из режима демпфирования в режим упругости газа практически осуществляется уменьшением ширины прорезей  $\Delta$  от 70 до 40 мкм (путем замены РЭ), увеличением толщины пневмокамеры  $\delta_0$  путем введения дополнительной прокладки толщиной 0,3 мм (рис. 3) и

увеличением амплитуды  $w_m$  колебаний РЭ почти вдвое. Контролировать амплитуду  $w_m$  можно по амплитуде  $U_m = 0,5...2,5$  В напряжения на электродах системы съема (6 на рис. 1).

Экспериментально определялись:

— выходные характеристики датчика (рис. 4) на задатчике воздушного давления АЗД-2,5Т16 с погрешностью 0,25% в диапазоне давлений  $P=1...1,5$  атм по прямому и обратному ходу и нормальной температуре ( $20^\circ\text{C}$ );

— температурные характеристики датчика в термокамере ТВТ-2 в диапазоне температур  $-30...+60^\circ\text{C}$  при нормальном давлении (1 атм) по прямому и обратному ходу термокамеры;

— коэффициент условия работоспособности по точке перелома характеристики зависимости выходной частоты  $f$  от амплитуды колебаний РЭ (амплитуды  $U_m$  переменного напряжения на электродах системы съема);

— нестабильность выходной частоты датчика в нормальных условиях (давление 1 атм и температура  $20^\circ\text{C}$ ) —

- кратковременная на протяжении 1 мин по 10 точкам,
- режимная на протяжении 10 ч по 10 точкам,
- долговременная на протяжении 10 сут по 10 точкам.

Обработка результатов экспериментальных исследований макета (см. табл.) показала, что они близки

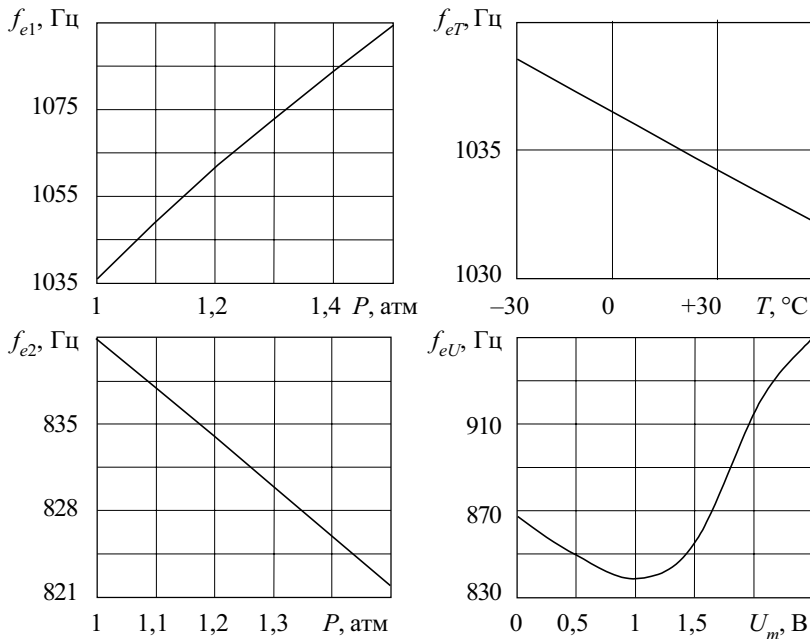


Рис. 4. Экспериментальные характеристики макета:  
 $f_{e1}$  и  $f_{e2}$  — выходные в режиме упругости и демпфирования газа;  $f_{eT}$  и  $f_{eU}$  — температурная и от амплитуды напряжения системы съема

тительными для измерения давления. Их выход частотный, как у большинства современных датчиков давления, удобный для дальнейшей (в том числе и цифровой) обработки сигнала; их резонатор обладает более высокой добротностью, а значит, более высокой стабильностью, сам датчик — меньшим энергопотреблением. Но рассмотренные датчики в режиме упругости могут измерять только абсолютное давление только сжимаемых сред (газов). Кроме того, для защиты элементов ПМР датчиков давления с нелинейным пневмосопротивлением обоих типов от воздействия агрессивных сред и загрязнений необходимо предусматривать специальные мероприятия, например, аналогичные предусмотренным в прототипе [1]: специальные покрытия, изоляция соединений, подбор материалов элементов конструкции и избавление от неметаллических частей, очистка подаваемого газа.

\*\*\*

к результатам предыдущих теоретических исследований, а отличие теоретических и эмпирических значений числовых коэффициентов не превышает в большинстве случаев 10%.

Экспериментальные исследования подтверждают приемлемость разработанной авторами теории построения датчиков давления с ПМР также и для датчиков с нелинейным пневмосопротивлением. Целесообразно ввести термокомпенсацию погрешностей датчика давления (по показаниям термодатчика с погрешностью 10%) и более качественно изготовить датчик выбранной конструкции. Это позволит уменьшить до уровня 0,1 Гц его нестабильность и до 0,1% — основную приведенную погрешность измерения.

Следует подробнее рассмотреть датчики, которые работают в режиме демпфирования. Полученные в пределах условий эксперимента характеристики для таких датчиков мало уступают характеристикам датчиков на упругости газа, однако в дальнейшем обязательно возникнут вопросы генерирования автоколебаний низкодобротного резонатора, повсеместно возникающие при исследованиях датчиков на поверхностных акустических волнах [8]. В датчиках с демпфированием колебаний РЭ лучше возбуждать вынужденные колебания резонатора и иметь амплитудный выход по току в цепи компенсации потерь энергии на поддержание заданной амплитуды колебаний резонатора, как это сделано в прототипе макета [1]. Результаты моделирования датчиков с ПМР в режиме демпфирования можно использовать для расчета контуров пневматического демпфирования пластинчатых чувствительных элементов измерителей разных физических величин (акселерометры, микромеханические датчики угловой скорости и др.).

Датчики с пневмомеханическим резонатором, использующие упругость газа, являются более предпоч-

Таким образом, разработанная авторами теория построения датчиков давления с пневмомеханическим резонатором нашла экспериментальное подтверждение для всех вариантов построения таких типов датчиков. Результаты исследований показывают перспективность пневмомеханических датчиков и возможность построения согласно выбранной для макетирования конструктивной схемы датчиков давления с основной погрешностью измерения менее 0,1%.

Разработанная конструкция существенно расширяет области использования датчиков давления с ПМР и в дальнейшем может обеспечить им конкурентоспособность на рынке бортового оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Dimeff J., Deboo G. J., Lane J. W., Hedlund R. C. A vibrating diaphragm pressure measuring system // *Instrum., Aerospace Ind.*— 1969.— Vol. 15.— P. 383—389.
2. А. с. 228992 СССР. Датчик давления с частотным выходом / И. А. Горенштейн.— 1968.— Бюл. № 32.
3. А. с. 757889 СССР. Частотный датчик давления / И. А. Горенштейн, В. Г. Кравцов.— 1980.— Бюл. № 31.
4. А. с. 798523 СССР. Частотный датчик давления / И. А. Горенштейн, В. Г. Кравцов.— 1981.— Бюл. № 3.
5. Пат. 1175664 Великобритании. Improvement in relating to methods of measuring the pressure of easily moving media / W. E. Abbotts.— 1969.
6. Vibrate vacuum-gauge. Fuji Elec. J. // *IEEE Transactions on Electron Devices.*— 1970.— Vol. 43.— N 8.— P. 782—787.
7. Черняк Н. Г., Бондаренко А. Н. Прецизионный датчик давления с пневмомеханическим резонатором для бортового оборудования ЛА // *Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре.*— 2001.— № 3.— С. 38—43.
8. Шитиков Г. Т. Стабильные автогенераторы метровых и дециметровых волн.— М.: Радио и связь, 1983.