ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXII, № 5, 1979 Серия технических наук

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. ВАРДАНЯН

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время для измерения давлений ударных волн в газах и жидкостях преимущественно применяются пьезоэлектрические датчики. Они, обеспечивая высокое быстродействие, имеют ряд недостатков [1].

Тороидальные резонаторные датчики по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями выгодно отличаются тем, что имея простую конструкцию, высокую чувствительность и жесткость, легко изготавляются и градуируются в статическом режиме на обычных гидропрессах [2, 3].

Регистрация давлений быстропротекающих процессов связана с применением датчиков, имеющих чувствительные элементы с высокой собственной частотой. Это всегда связано с некоторым уменьшением относительной деформации, т. е. потерей чувствительности датчика. Так как тороидальные резонаторы позволяют получить большие нагруженные добротности (порядка 1000÷4000) [4], то выполнение быстродействующих датчиков при их помощи не представляет трудности.

Реализация тороидальных резонаторных датчиков давления возможно либо деформацией верхней крышки резонатора [2], либо—цилиндрической стенки корпуса [3].

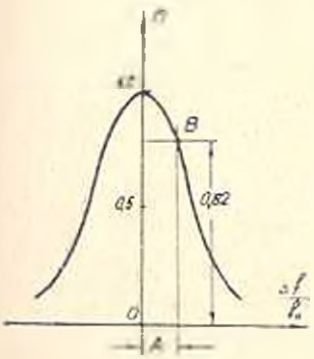


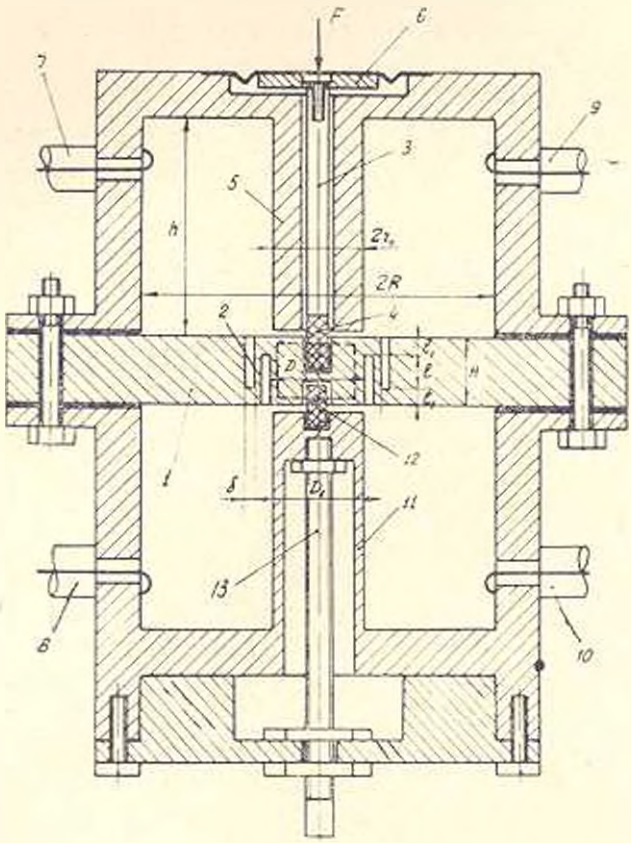
Рис. 1.

Собственная частота полого резонатора, эквивалентная резонансной частоте колебательного контура, зависит от размеров и формы резонатора и определяется по известным формулам [2, 4]. Приведенная на рис. 1 зависимость относительных изменений выходного напряжения n от частоты $\Delta f/f_0$ совпадает с резонансной кривой колебательного контура. Для регистрации давления и разрежения, например, давления воздушных ударных волн (ДВУВ) необходимо рабочую точку подобрать в левой или правой части резонансной кривой. Изменением места рабочей точки можно в широком пределе изменять чувствительность датчика.

При изменении температуры резонатора, из-за изменения его размеров, на характеристике перемещается также рабочая точка. Для по-

вышения термостабильности можно применить такие резонаторы, где подбором материалов конструкции осуществляется термокомпенсация [5].

Увеличение термостабильности и значительное уменьшение погрешностей с расширением возможных пределов изменения частот достигается при применении дифференциальных тороидальных резонаторных датчиков давлений и ускорений [6], конструкции которых показаны на рис. 2, а, б.



а

Рис. 2, а.

Дифференциальный тороидальный датчик (рис. 2, а) по сравнению с обычным резонаторным датчиком [2, 3], имея высокую термостабильность, позволяет получить в два раза большую чувствительность. Выбранная конструкция силопередающей системы позволяет значительно уменьшить площадь контактируемой поверхности с объектом и более точно измерить ДВУВ, соответствующее данной точке пространства.

Устранением силопередающей системы на рис. 2, а и используя ускоренное движение инерционной массы, сосредоточенной в центре перегородки, можно получить дифференциальный датчик ускорений.

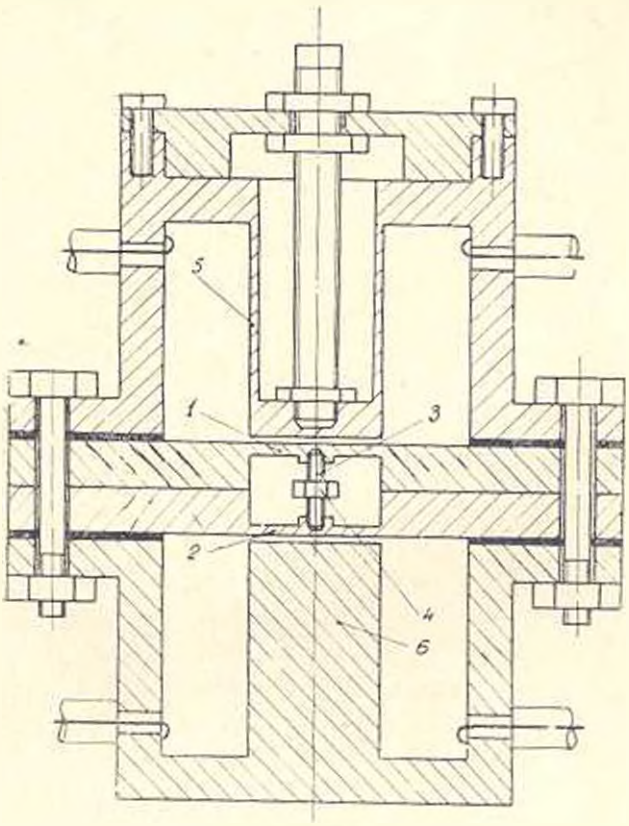


Рис. 2, б

Значительное упрощение конструкции датчика ускорений, с более высокими частотными свойствами и большой чувствительностью, получаются при выполнении дискообразной перегородки из двух частей (рис. 2, б).

Выходы дифференциальных датчиков (рис. 2, а, б), необходимо подключить к балансному усилителю постоянного тока. Проведенные измерения показали, что очень большая чувствительность способствует созданию быстродействующих датчиков, без применения усилителей. Для устранения дрейфа можно питание резонаторных датчиков произвести модулированными СВЧ сигналами.

В дифференциальных резонаторных датчиках значительно увеличивается линейность, уменьшается погрешность измерения и расширяются допустимые пределы относительного изменения частоты. В этом легко убедиться, проанализировав выражение относительного значения выходного напряжения [2]. Максимальное приращение выходного напряжения получается, когда рабочая точка B на резонансной кривой (рис. 1) будет находится на уровне $\eta = 0{,}82$. Для одного резонатора выражение относительного значения выходного напряжения рабочей точки B можно представить в виде:

$$n=\frac{U_{вых}}{U_{р.м.}}=\frac{1}{\sqrt{1+(2Q_н)^2\left(A+\frac{\Delta f}{f_0}\right)^2}}=$$

$$=\frac{1}{\sqrt{1+(2Q_н A)^2\left(1+\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^2}}, \qquad (1)$$

где $Q_н$ — нагруженная добротность резонатора; $U_{р.м.}$ — максимальное напряжение при резонансе; f_0, Δf — резонансная частота резонатора и ее приращение; A — абсцисса рабочей точки B.

Для случая $n=0{,}82$ множитель $(2Q_н A)^2=K^2=0{,}19$. Выражение (1) разлагая в ряд Маклорена, можно получить:

$$n=1-\frac{1}{2}K^2\left(1+\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^2+\frac{3}{4}K^4\left(\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^4-\frac{15}{48}K^6\left(1+\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^6+\cdots \qquad (2)$$

Решение уравнения (2) дает:

$$U_{вых.}=U_{р.м.}\left[0{,}82-0{,}35\frac{\Delta f}{Af_0}-0{,}256\left(\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^2+\cdots\right]. \qquad (3)$$

Первый член этого ряда соответствует начальному значению выходного напряжения при $\Delta f=0$, а второй член—касательной в точке разложения и характеризует отклонение реальной характеристики от прямой, т. е. погрешность линейности. Основную долю этой погрешности составляет третий член. Относительную погрешность линейности можно получить разделением третьего члена на второй

$$\gamma_л=\frac{U_{р.м.}\cdot 0{,}256\left(\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^2}{U_{р.м.}\cdot 0{,}35\frac{\Delta f}{Af_0}}=0{,}73\frac{\Delta f}{Af_0}, \qquad (4)$$

откуда максимально допускаемое относительное изменение $\Delta f/Af_0$ от возникающей при этом максимальной погрешности линейности $\gamma_{л.м.}$ выражается:

$$\frac{\Delta f}{Af_0}=\frac{\gamma_{л.м.}}{0{,}73}. \qquad (5)$$

Принимая $\gamma_{л.м.}=0{,}01$, максимально допустимое относительное изменение частоты будет $\Delta f/Af_0\approx 0{,}0137$. Для рассмотренных дифференциальных датчиков приращение выходного напряжения равно:

$$U_{вых}=U_{вых}-U_{вых.}=U_{р.м.}\left[2{,}14\frac{\Delta f}{Af_0}+2{,}19\left(\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^2+\right.$$

$$\left.+0{,}44\left(\frac{\Delta f}{Af_0}\right)^5+\cdots\right]. \qquad (6)$$

Относительная погрешность линейности для дифференциальных датчиков равна:

$$\gamma_л = \frac{U_{р.\,м.} \cdot 2{,}19\left(\frac{\Delta f}{A f_0}\right)^3}{U_{р.\,м.} \cdot 2{,}14\left(\frac{\Delta f}{A f_0}\right)} = 1{,}023\left(\frac{\Delta f}{A f_0}\right)^2. \qquad (7)$$

При максимальной относительной погрешности линейности $\gamma_{л.\,м.} = 0{,}01$ относительное изменение частоты получается:

$$\frac{\Delta f}{A f_0} = \sqrt{\frac{\gamma_{л.\,м.}}{1{,}023}} \approx 0{,}1,$$

т. е. возможный предел относительного изменения частоты в дифференциальном резонаторном датчике расширяется более чем в 7 раз.

Сконструированные нами дифференциальные датчики имели резонансную частоту в пределах 300—1000 *МГц* и применялись в полевых условиях для регистрации ДВУВ (рис. 2, а). Проведенные эксперименты показали, что изменение температуры в пределах ±25°С не привело к существенному изменению выходного разностного напряжения. При идентичных резонаторах дифференциального датчика изменение температуры в определенном пределе одинаково расстраивает оба резонатора и поэтому не наблюдается расхождение разностного напряжения.

Как для резонаторного, так и для любого другого датчика большое значение имеет оценка собственной частоты чувствительного элемента, по которому определяют его быстродействие.

В первом приближении, можно пренебречь влиянием толкателя и мембраны с жестким центром (рис. 2, а). В дальнейшем это можно учесть с увеличением сосредоточенной массы, закрепленной в конце деформируемого стержня. Кроме того допускается, что выбраны такие размеры чувствительного элемента (рис. 2, а), при которых деформируется только стенка, образованная двумя кольцевыми пазами. Таким образом, чувствительный элемент датчика можно рассмотреть как схему упругого стержня с сосредоточенной массой в конце, совершающего продольные колебания. Кроме продольных, возникающие в стержне поперечные колебания практически не влияют на выходные характеристики датчиков. К такому же выводу приводят исследования в [7], где показано, что учет радиальных перемещений оболочки почти не влияет на продольные перемещения.

Дифференциальное уравнение продольных колебаний стержня имеет вид [8]:

$$\frac{ES}{1-\nu^2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta\frac{\partial^3 u}{\partial^2 x \partial t} - m_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F(x, t), \qquad (8)$$

где $U = U(x, t)$, $F(x, t)$ — перемещение сечения и внешняя сила, действующая на этом сечении с координатой x в момент времени t; E — модуль упругости; S — площадь сечения; ν — коэффициент Пуассона; β — коэффициент, характеризующий внутреннее затухание; m_0 — погонная масса деформируемого стержня.

Отметим, что в записи формулы (8), в первое слагаемое введен множитель $\frac{1}{1-\nu^2}$, учитывающий то обстоятельство, что фактически колеблется не стержень, а оболочка, т. е. учитывается пространственная работа системы [9].

Согласно методу Фурье, решение уравнения (8) имеет вид:

$$U = \sum_{k=1}^{\infty} X_k(x) \cdot T_k(t), \tag{9}$$

т. е. как сумма произведения функции X_k и T_k, из которых X_k является функцией только координаты x, а T_k — времени t.

Из решения однородного дифференциального уравнения (8) при $F(x, t)$ можно получить собственные частоты колебаний. Из (9) получим два отдельных обыкновенных уравнения, один из которых имеет вид:

$$\ddot{X}_k + \frac{\omega_k^2}{a^2} X_k = 0, \tag{10}$$

где ω_k —представляет собой частоты собственных колебаний различных гармоник; a —параметр, определяющий скорость распространения продольных волн в стержне и равный

$$a = \sqrt{\frac{ES}{m_0(1-\nu^2)}}. \tag{11}$$

Решение дифференциального уравнения (10) имеет вид:

$$X_k = A_k \sin\frac{\omega_k x}{a} + B_k \cos\frac{\omega_k x}{a}, \tag{12}$$

где A_k и B_k —коэффициенты, определяемые из граничных условий на концах стержня.

Граничные условия имеют вид:

$$X_k\Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{ES}{1-\nu^2} X_k'\Big|_{x=l} = m^* \omega_k^2 X_k\Big|_{x=l}. \tag{13}$$

где m^*—дополнительная масса в конце стержня.

Подставляя (12) в (13), получим $B_k = 0$ и так называемое частотное уравнение, откуда определяется ω_k:

$$\frac{\omega_k l}{a} \cdot \operatorname{tg}\frac{\omega_k l}{a} = \frac{m_0 l}{m^*}. \tag{14}$$

Уравнение (14) можно записать в виде $z_k \operatorname{tg} z_k = b$. В [10] приводятся значения первого корня z_1 этого трансцендентного уравнения для различных значений параметра b. При известных b легко графически получить корни z_k.

Анализ выражения (14) показывает, что при большем $m_0 l$ по сравнению с сосредоточенной массой m^*, собственная частота колебаний ω_k чувствительного элемента получается больше.

При $B_k = 0$, из (12) видно, что колебание деформируемого стержня в виде цилиндрической стенки, в основном, происходит по синусоидальному закону (при рассмотрении частоты только основной гармоники).

Для чувствительного элемента в виде цилиндрической оболочки (рис. 2, а) имеем:

$$S = \pi (D_1 + \delta)\delta;\ m_0 = \rho S;\ m^* = \rho \frac{\pi}{4}(DH - D^2 l_1 + D_1^2 l_1). \qquad (15)$$

Приведем пример расчета собственной частоты чувствительного элемента датчика (рис. 2, а): $D = 3{,}0$ *см*; $D_1 = 4{,}0$ *см*; $\delta = 0{,}1$ *см*; $l = 1{,}2$ *см*; $l_1 = 0{,}9$ *см*; $H = 3{,}0$ *см*; материал дюралиминий ($E = 0{,}7 \cdot 10^6$ *кг/см²*, $\nu \approx 0{,}3$, $\rho = 2{,}7$ *г/см³*). По (15) получаем: $S = 1{,}22$ *см²*; $m_0 = 3{,}5$ *г*; $m^* \approx 70$ *г*. Отношение $m_0 l/m^* = 0{,}06$. Первый корень уравнения $z\,\mathrm{tg}\,z = 0{,}06$, из [10] получаем $z_1 = 0{,}24$. Параметр a равен $a \approx 0{,}54 \cdot 10^6$ *см/сек*, а значение $\omega_1 = az_1/l = 0{,}108$ *сек*$^{-1}$. Для первой гармоники имеем частоту $f_1 = \omega_1/2\pi = 17$ *кГц*.

Для повышения собственной частоты колебания центральный участок дискообразной перегородки можно выполнить пустотелым (рис. 2, а—обозначен пунктиром).

При сосредоточенной массе ≈ 9 *г* параметр $b = m_0 l/m^* \approx 0{,}46$ и тогда $z_1 \approx 0{,}63$. Угловая скорость для первой гармоники равняется $\omega_1 = 0{,}283 \cdot 10^6$ *сек*$^{-1}$, а частота первой гармоники $f_1 = 45$ *кГц*.

Нами были изготовлены датчики давления (рис. 2, а) с резонансной частотой резонатора ~ 320 *МГц*. Собственная частота колебаний чувствительного элемента была в пределах $26 \div 28$ *кГц*. Датчики были испытаны для регистрации ДВУВ. Фронт регистрированного импульса был 40 *мксек*.

Для датчика ускорений (рис. 2, б) собственная частота колебаний была в пределах $37 \div 39$ *кГц*. В этом случае резонансная частота резонатора равнялась ~ 640 *МГц*.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 14 VI 1978.

Վ. Թ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՃՆՇՄԱՆ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ԹՈՐՈԻԴԱԼ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐԱՅԻՆ ՀԱՅՏՆԻՉՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Բերված են դիֆերենցիալ թորոիդական ռեզոնատորային ճնշման և արագացման հայտնիչների կառուցվածքները, որոնք ընդունակ են գրանցելու ինչպես դանդաղ, այնպես էլ արագընթաց պրոցեսները: Հայտնիչի զգայուն էլե-

մենտ ունի մի քանի տասնյակ կՀզ սեփական տատանումների հաճախականություն, որը դեռ կարելի է դպրի կերպով մեծացնել։

Զգայունության, ջերմակայունության մեծացում, սիալի բավականին փորրացում, պահպանելով համեմատաբար բարձր արագագործություն, առաջում է դիֆերենցիալ ճնշման և արագացման չափանիշներ կիրառելիս։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Плотников Н. В. и др.* Квазистатический метод градуировки пьезоэлектрических преобразователей давления. Тр. метролог инст. СССР Вып. 156/(216). М., изд. Стандартов, 1974.
2. *Вардапян В. Р.* Тороидальный резонаторный датчик давления воздушных ударных волн. «Приборы и системы управления», 1973, № 11
3. *Вардапян В. Р. и др.* Датчик давления. Авт. свид. № 324532. «Бюллетень изобретения», 1972, № 2.
4. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. т. 1 М. ГЭИ. 1961
5. *Cogdell J. R., Dean A. P., Stratton A. W.* Temperature Compensation of Coaxial Cavities, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, March, 1960. p.p. 151—155.
6. *Вардапян В. Р.* Датчик давления. Авт. свид. № 626376. «Бюллетень изобретения», 1978, № 36.
7. *Выгода Ю. А.* Динамика работы цилиндрического упругого элемента датчика усилий. «Известия ВУЗ-ов. Приборостроение», 1974, № 1.
8. *Филиппов А. П.* Колебания деформируемых систем. М., «Машиностроение», 1970.
9. *Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. М., «Машиностроение», 1970
10. Прочность, устойчивость, колебания. Спр. т. 1. М., «Машиностроение», 1970