

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.398.694 : 531.7

П. И. ОСТРОМЕНСКИЙ, В. Ф. ХОН

(Новосибирск)

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕОФОНОМ

В настоящее время применяют два принципа измерения параметров вибрации: а) измерения относительно инерциальной системы отсчета (кинематический принцип); б) измерения с помощью инерционного элемента, соединенного с вибрирующим телом упругой связью (динамический принцип). На этих принципах работают все известные измерители вибрации [1, 2].

Цель настоящей работы — показать возможность измерения вибрации с использованием нового принципа: определение параметров вибрации в исследуемом месте объекта по измерению в этом месте параметров упругих волн, распространяющихся в объекте при его колебаниях. Ниже показано, что в измерителях вибрации, основанных на этом принципе, не нужна связь с инерциальной системой, не нужен и инерционный элемент на упругом подвесе.

В общем случае упругие волны в твердых телах имеют продольные и поперечные составляющие; поперечные волны в стержнях и пластинах обладают дисперсией, которая приводит к искажению формы сигнала, распространяющегося в упругой среде. Продольные составляющие упругих волн дисперсии не имеют; характер распространения их в стержнях, пластинах и неограниченной упругой среде одинаков [3], и поэтому эти волны наиболее приемлемы для измерительных целей.

В качестве чувствительного элемента датчика, реагирующего только на продольные составляющие упругих волн, возьмем сферическую оболочку из пьезокерамики тетрагональной системы с радиальной поляризацией с электродами, покрывающими полностью внутреннюю и внешнюю поверхности оболочки. Покажем, что такая оболочка чувствительна к воздействию только продольных упругих волн, причем тех, которые вызывают сферически симметричные деформации ее.

Примем, что наибольшая частота вибрации f_v и низшая частота оболочки f_0 удовлетворяют неравенству

$$f_v \ll f_0. \quad (1)$$

В этом случае влиянием собственных колебаний оболочки можно пренебречь [4] и нашу задачу свести к электростатической задаче определения разности потенциалов между электродами пьезокерамической оболочки при заданных нагрузках на ее поверхностях.

При деформациях оболочки из пьезокерамики тетрагональной системы электрическое поле в любой точке ее можно охарактеризовать тремя компонентами вектора напряженности электрического поля [5]:

$$E_R = \frac{d_{33}}{\varepsilon} \sigma_R - \frac{d_{31}}{\varepsilon} (\sigma_\theta + \sigma_\varphi); E_\theta = \frac{d_{15}}{\varepsilon} \tau_{R\theta}; E_\varphi = \frac{d_{15}}{\varepsilon} \tau_{\varphi R}. \quad (2)$$

Здесь d_{33} , d_{31} , d_{15} и ε — пьезомодули и диэлектрическая проницаемость этого материала; σ_R , σ_θ , σ_φ , $\tau_{R\theta}$, $\tau_{\varphi R}$ — нормальные и касательные напряжения в оболочке (R , θ — полярные координаты в плоскости меридиана).

Разность потенциалов U между точкой $A(R_0, \theta_0, \varphi_0)$ на внутренней и точкой $B(R_1, \theta_1, \varphi_1)$ на внешней поверхностях оболочки равна

$$U = \int_A^B \vec{E} d\vec{e}. \quad (3)$$

Электроды оболочки — эквипотенциальные поверхности; E_θ , E_φ на этих поверхностях равны 0. На электродах оболочки электрические заряды алгебраически суммируются, поэтому U необходимо усреднить по поверхности оболочки. На основании этого U можно представить в виде

$$U = \int_{R_0}^{R_1} \left[\frac{d_{33}}{\varepsilon} \sigma_R^{(0)} - \frac{d_{31}}{\varepsilon} (\sigma_\theta^{(0)} + \sigma_\varphi^{(0)}) \right] dR. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_R^{(0)}$, $\sigma_\theta^{(0)}$, $\sigma_\varphi^{(0)}$ — сферически симметричные члены в разложении механических напряжений по сферическим функциям. Все другие слагаемые в разложении дают при усреднении нуль [6]. R_1 и R_0 — соответственно внешний и внутренний радиусы оболочки.

Поперечные упругие волны не создают деформаций, связанных с изменением объема, и поэтому не участвуют в создании механических напряжений $\sigma_R^{(0)}$, $\sigma_\theta^{(0)}$, $\sigma_\varphi^{(0)}$. Эти напряжения в оболочке создают продольные волны, которые вызывают объемные сжатия и расширения оболочки [3, 6]. Таким образом, сферическая оболочка из пьезокерамики тетрагональной системы будет иметь отличную от нуля чувствительность к воздействию упругих волн вибрации. Покажем, что такая оболочка может служить датчиком ускорения. В дальнейшем такой датчик для краткости назовем СДУ (сферическим датчиком ускорения).

Вычислим чувствительность СДУ в случае, когда сферическая оболочка «впаяна» в упругую изотропную среду с параметрами Ламэ λ_1 , μ_1 . Оболочку будем считать упругим изотропным сферическим слоем с параметрами Ламэ λ_2 , μ_2 . Примем, что упругая среда безгранична; размеры оболочки таковы, что

$$R_1 \ll \lambda \quad (k_1 R_1 \ll 1). \quad (5)$$

Здесь λ — длина продольной упругой волны (для металлов при $f=20$ кГц $\lambda=250$ мм); k_1 — волновое число.

При данных допущениях применительно к сферическим звукоприемникам, предназначенным для измерения давления упругих волн в твердых телах, задача рассмотрена в [6]; в этой работе получена формула для расчета чувствительности звукоприемника к давлению P упругой волны

$$\psi_1 = \frac{U}{P} = \psi_1 \left(\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2, R_1, R_0, \frac{d_{33}}{\varepsilon}, \frac{d_{31}}{\varepsilon} \right). \quad (6)$$

Формулу (6) можно использовать для наших расчетов, если подставить в нее зависимость давления упругой волны от ускорения вибрации. На основании (5) можно считать, что давление упругой волны во всех точках оболочки в каждый момент времени одинаково, давление рассеянной волны мало и им можно пренебречь. Скорость частиц в

$$P = \rho_0 a R_1 + \Omega(t), \quad (8)$$

где $a = i\omega v$ — ускорение движения частиц оболочки. При $R = R_0$ $P = 0$, поэтому из (8) следует, что давление падающей волны на внешнюю поверхность сферической оболочки (при $R = R_1$) составляет

$$P = \rho_0 a (R_1 - R_0). \quad (9)$$

Из (5), (6) и (9) находим

$$S_1 = \frac{U}{a} = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{\lambda_1 + \frac{2}{3}\mu_1} \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^3 \frac{\rho_0 (R_1 - R_0)^3}{1 - \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^3 - \frac{\mu_1}{\mu_2} - \frac{4\mu_1}{3\lambda_2 + 2\mu_2} \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^3} \times \\ \times \left[\frac{d_{33}}{\varepsilon} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{R_0}{R_1} - \frac{1}{2} \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) + \frac{d_{31}}{\varepsilon} \left(2 + \frac{1}{2} \frac{R_0}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) \right]. \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что возможен случай, когда $S_1 = 0$ (при $R_0/R_1 \approx 0,2$ для титаната бария [5]).

Очевидно, оболочка, «впаянная» в упругую неограниченную среду, будет иметь одинаковую чувствительность к воздействию ускорения любого направления [сферическая диаграмма направленности (ДН)]. Таким образом, основываясь на этом принципе, можно создать ненаправленный датчик ускорения, дающий полную информацию о модуле ускорения произвольного направления. Такие датчики необходимы в науке и технике [8, 9].

В случае ограниченной упругой среды чувствительность оболочки к воздействию ускорений различных направлений будет зависеть от закрепления ее в ограниченной среде. Очевидно, наиболее целесообразно вести поиски такого крепления оболочки, чтобы она имела сферическую ДН или такую же, что и однокомпонентный датчик. Эта задача существенно облегчается тем, что оболочка имеет отличную от нуля чувствительность лишь при сферически симметричных деформациях ее, что следует из выражения (4). В настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования ДН оболочки в ограниченной среде. Полученные в работе результаты могут быть использованы при расчете чувствительности СДУ, если его использовать в качестве геофона, для прогнозирования внезапных выбросов угольных пластов и породы. Сейчас для этих целей применяются электродинамические и пьезоэлектрические виброметры, велосиметры и акселерометры [10]. Преимущество применения СДУ в качестве геофона — сферическая ДН, простота конструкции, малый вес и габариты.

В угольных массивах и других пластичных горных породах плотный контакт обеспечивается автоматически: под влиянием горного давления стенки скважины деформируются и плотно обжимают геофон [10].

Для практики представляет интерес рассмотреть влияние на чувствительность СДУ заполнения твердым телом или жидкостью внутренней полости оболочки. Такое заполнение повысит жесткость оболочки к воздействию горного давления. Силы инерции в оболочке и динамическое давление твердого тела, заполняющего внутреннюю полость оболочки, при ее ускоренном движении — осесимметрическая нагрузка. Механические напряжения в оболочке под действием этой нагрузки не имеют сферически симметричных членов. Поэтому силы инерции в оболочке и динамическое давление в твердом теле не будут влиять на чувствительность СДУ.

Для СДУ в общем случае мы имеем три колебательные системы с наиболее низкими собственными частотами: 1) упругую пьезокерамическую оболочку; 2) систему «твердое тело — оболочка — инерционные элементы, слой клея — упругая связь»; 3) систему «оболочки с твердым телом — инерционный элемент в упругой неограниченной среде».

Оболочка имеет наиболее низкую собственную частоту f_r при радиальных колебаниях [5]. Упругая среда и твердый наполнитель внутренней полости оболочки будут затруднять радиальные колебания ее и повышать f_r . Поэтому для простоты их влиянием можно пренебречь. В этом случае собственную частоту колебаний оболочки можно рассчитать по данным работы [5] (для $R_1=10$ мм, $R_0=5,5$ мм $f_r \approx 130$ кгц). Резонансные колебания твердого наполнителя относительно оболочки и датчика в целом относительно упругой среды не будут оказывать влияния на чувствительность СДУ, так как эти колебания не создают сферически симметричных деформаций оболочки.

Таким образом, используя сферическую оболочку из пьезокерамики тетрагональной системы и радиальной поляризации, можно создать широкополосный датчик ускорений на новом принципе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иорш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
2. Л. Д. Гик. Измерение ускорений. Новосибирск, «Наука», 1966.
3. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Теория упругости. М., «Наука», 1965.
4. В. П. Макушкин, А. В. Мишуев. Сферические титанат-бариевые приемники давления воздушных ударных волн.— Акустический журнал, 1959, т. V, вып. 1.
5. А. А. Ананьева. Керамические приемники звука. М., Изд-во АН СССР, 1963.
6. И. А. Чабан. Расчет чувствительности сферического приемника из пьезоэлектрической керамики, замороженного в твердую среду.— Акустический журнал, 1965, т. XI, вып. 3.
7. Ф. Морз. Колебания и звук. М.—Л., Гостехиздат, 1949.
8. П. М. Алабужев, П. И. Остроменский, В. Ф. Хон. Измерение параметров вибрации машин виброударного действия.— Труды межвузовской научной конференции по электрическим машинам ударного действия. Новосибирск, 1967.
9. П. И. Остроменский, В. Ф. Хон. О целесообразности создания датчиков линейных ускорений объемной вибрации и ударов.— Виброметрия (материалы II научно-технической конференции). Сб. 2. М., 1965.
10. Применение сейсмоакустических методов в горном деле. М., «Наука», 1964.

Поступила в редакцию
10 мая 1968 г.