

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. ВАРДАНИАН

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
ЕМКОСТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ

Давление воздушных ударных волн (ДВУВ), почти мгновенно нарастая (фронт волны), спадает медленно [1]. Мгновенное нарастание давления требует применения быстродействующих преобразователей [2; 3] (собственная частота упругого элемента которых должна быть не ниже нескольких десятков килогерц [3]), а медленный спад — применения преобразователей, способных работать в статическом режиме (регистрация медленнопротекающих процессов). К тому же, при ДВУВ после фазы сжатия наступает разряжение [1]. Сложность климатических условий требует разрабатывать преобразователи, способных нормально работать в дождь и снег и при очень большом перепаде температуры.

Для регистрации ударных процессов могут быть применены емкостные, пьезоэлектрические и др. типы преобразователей [4; 5-7]. Настоящая статья посвящена рассмотрению емкостных преобразователей.

Емкостные преобразователи выгодно отличаются от других тем, что не требуют сложного оборудования, позволяют статическую градуировку, имеют большую чувствительность и хорошие частотные характеристики.

Для точной регистрации ДВУВ необходимо уменьшить площадь чувствительного элемента емкостного преобразователя; тогда ухудшаются соотношения полезной и паразитных емкостей. Для увеличения этого соотношения и чувствительности, в ряде случаев часть воздушного зазора емкостного преобразователя заполняется диэлектриком [5; 6]. Для уменьшения диэлектрических потерь требуется приклеить диэлектрик к неподвижному электроду только в нескольких точках. Такая конструкция не вибропрочна и неустойчива к ударным нагрузкам, и есть опасность отклеивания диэлектрика при регистрации ДВУВ.

Регистрация ДВУВ емкостными преобразователями выдвигает особые требования на термостойчивость. Повышение термостойчивости производится либо усложнением схемы измерения [5], либо применением специальных компенсационных емкостей [8]. В последнем случае усложняется конструкция и увеличиваются габаритные размеры преобразователя.

Дифференциальные емкостные преобразователи отличаются от обычных емкостных тем, что имеют высокую чувствительность и термостойчивость. Однако, многие из созданных преобразователей, являясь быстродействующими, имеют сложную конструкцию [9].

Учитывая условия, предъявляемые к преобразователям давления быстропротекающих процессов, нами разработана конструкция дифференциального емкостного преобразователя давления, разрез которого показан на рис. 1. В предлагаемой конструкции преобразователя масло, заполняющее межэлектродное пространство, являясь средой передачи давления от одной подвижной обкладки к другой, во-первых, увеличивает начальную емкость преобразователя и, во-вторых, созданием внутреннего предварительного давления, когда электроды-мембраны находятся в напряженном состоянии, позволяет повысить частотные свойства преобразователя. Для передачи действия силы от одной подвижной обкладки к другой можно было осуществлять жесткое соединение центров мембран, как это выполнено в [10]. Однако при малых диаметрах мембран возникают большие трудности в закреплении подвижных электродов.

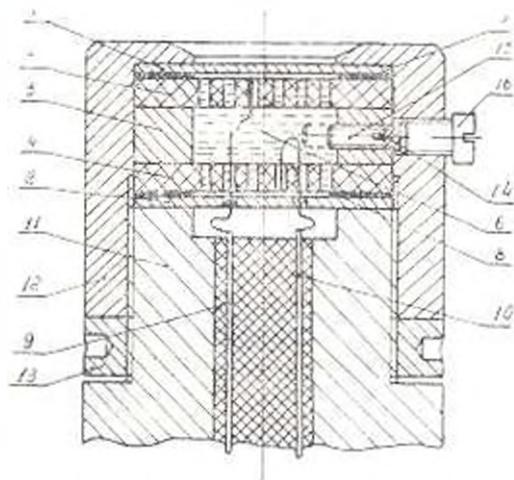


Рис. 1.

За мембраной 1 (рис. 1) на определенном расстоянии размещен диск из фольгированного стеклотекстолита 3 с соответствующими отверстиями. После металлического кольца 5 расположен второй диск 4 из фольгированного стеклотекстолита с отверстиями. Между мембранами 1; 2 и текстолитовыми дисками 3; 4 установлены латунные шайбы 7 и 8, предусмотренные для получения соответствующих емкостных впадов. Участки фольгированного стеклотекстолита, попадающие под латунные шайбы, очищены от фольги. Емкости образуются между мембранами 1 и 2 и верхними и нижними поверхностями дисков 3 и 4. Герметично изолированные выводы осуществлены через концы 9 и 10. Третьим выводом является корпус. Для получения прочной и герметичной конструкции, до сборки (после припайки соответствующих концов) мембраны 1; 2, диски 3; 4 и шайбы 5; 7; 8 приклеиваются между собой

по краям. Внутри металлического колпачка 12 положение приклеенных элементов фиксируется при помощи специальной шпунки (на рис. 1 не видна). Фиксация положения обусловлена не только устойчивостью получаемых характеристик, но и наполнением внутренней полости преобразователя маслом. Конструкция, собранная из элементов 1; 2; 3; 4; 5; 7 и 8, закрепленных с колпачком 12, навинчивается на корпус 11 преобразователя. Положение металлического колпачка фиксируется контргайкой 13.

В качестве материала мембраны могут быть использованы дисперсионно твердеющие сплавы, например, бронза бериллиевая марки Бр. Б2, сплав ЭИ702 (НЗбХТЮ), сплавы титана марки ВТ-14 и др. Для получения большой чувствительности в изготовленном преобразователе в качестве материала мембраны использован дюралюминий марки Д16т, хотя и он имеет низкие частотные свойства.

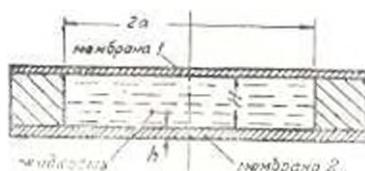


Рис. 2.

При помощи кольца 5 между двумя емкостными зазорами образуется полость, которая при вакууме наполняется жидким диэлектриком. Жидкий диэлектрик наполняет как полость б, так и отверстия дисков и емкостные зазоры. Для создания предварительного давления используется винт 15, ввинчиванием которого изменяется внутреннее давление преобразователя. Для поддержания этого давления применяются уплотнение 14 и винт 16. Вместо этих винтов и уплотнений, для создания внутреннего давления в полости можно было использовать штуцер, присоединенный к соответствующему источнику давления.

Действующее на верхнюю поверхность мембраны 1 давление через жидкий диэлектрик передается ко второй мембране. Если при приложении силы или давления верхний емкостной зазор уменьшается, то в это время увеличивается нижний емкостной зазор. Таким образом, образованные две емкости изменяются в разных направлениях.

Упрощенный разрез дифференциального емкостного преобразователя давления показан на рис. 2.

В рассматриваемой задаче определения частот поперечных колебаний при совместной работе двух пластинок-мембран жидкость можно принять несжимаемой; т. е. обе пластинки работают совместно и синхронно.

В силу принятых допущений, при незначительном внутреннем давлении жидкость между мембранами играет роль дополнительной массы, а частоту собственных колебаний можно определить по формуле [11, 12]:

$$\omega = \frac{\eta K^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (1)$$

где $\nu = \left(1 + \frac{2\eta H}{\rho h}\right)^{-\frac{1}{2}}$; K^2 — коэффициент, зависящий от условий работы мембраны; ρ — плотность жидкости; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость; ρ — плотность материала мембраны; a — радиус мембраны; ν — коэффициент Пуассона; h — толщина пластинки; E — модуль упругости мембраны; H — толщина слоя жидкости.

Имея общеизвестную форму в выражении (1) добавлен коэффициент η , который меньше единицы. Из-за жидкости собственная частота колебаний упругой системы будет меньше, чем при колебании только одной пластинки.

Когда давление жидкости достаточно большое, но не превышает норму, следует учесть влияние добавочного радиального растяжения.

Выражение наибольшего прогиба заземленной по контуру круглой мембраны радиуса a , несущей нагрузку интенсивностью P_0 , можно написать в виде [11]:

$$W_{\text{макс}} = \frac{P_0 a^4}{64D} \quad (2)$$

Максимальное радиальное напряжение получается на контуре пластинки, где оно равно [11]

$$(\sigma_r)_{\text{макс}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{P_0 a^2}{h^2} \quad (3)$$

Используя (2), формула (3) запишется так:

$$(\sigma_r)_{\text{макс}} = \frac{4E}{1-\nu^2} \cdot \frac{h}{a} \cdot \frac{W_{\text{макс}}}{a} \quad (4)$$

Из формулы (4) можно вычислить растягивающую силу F , приходящуюся на единицу длины [11]:

$$F = (\sigma_r)_{\text{макс}} \cdot h = \frac{4E}{1-\nu^2} \cdot \frac{h^2}{a} \cdot \frac{W_{\text{макс}}}{a} \quad (5)$$

Создаваемое предварительное растяжение влияет на величину собственной частоты колебания пластинки. В рассматриваемом случае предварительное растяжение в пластинке создается внутренним давлением жидкого диэлектрика в преобразователе, о степени которого можно судить по максимальному прогибу пластинок $W_{\text{макс}}$. По значению $W_{\text{макс}}$ можно вычислить параметры [12]:

$$\alpha^2 = \frac{F}{D} = \frac{4E}{a^2} \cdot \frac{W_{\text{макс}}}{h}; \quad \alpha = -2\alpha = -2 \left[\frac{3}{4} \sqrt{\frac{W_{\text{макс}}}{h}} \right] \quad (6)$$

определяющие собственные частоты колебаний пластинки. Имея значение параметра m ($m < 1$ в случае растяжения), можно из графика [12] определить значение K^2 , входящее в формулу (1).

Напряжение $(\sigma_r)_{\max}$ должно удовлетворять условию:

$$(\sigma_r)_{\max} < [\sigma] = \frac{\sigma_r}{n}, \quad (7)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение; σ_r — предел текучести материала пластинки; n — коэффициент запаса.

Из формул (4) и (7) находим, что

$$W_{\max} < \frac{1 - \nu^2}{4} \frac{a^2}{Eh} \frac{\sigma_r}{n}. \quad (8)$$

По величине W_{\max}/h можно определить значение частотного коэффициента m , а по нему — коэффициента K^2 [12].

Коэффициент запаса n необходимо взять не менее 2,5. Это обусловлено тем, что под действием внешнего давления мембрана 1 стремится возвратиться в исходное ненапряженное состояние, а мембрана 2 подвергается дополнительной деформации.

Рассмотрим несколько численных примеров.

1. Мембраны из дюралюминия. Имеем следующие параметры

$$\rho_2 = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_1 = 2,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad h = 0,001 \text{ м}; \quad H = 0,006 \text{ м};$$

$$E = 7 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,31; \quad a = 0,015 \text{ м}; \quad \sigma_r = 340 \text{ МПа}; \quad n = 2,5.$$

При этих параметрах $\gamma_2 = 0,5$, т. е. из-за жидкого диэлектрика частота колебаний падает на 40% по сравнению с частотой одной лишь мембраны без жидкости.

По формуле (8) $W_{\max} = 0,098 \cdot 10^{-3}$ м, а по формуле (7) $m = -2,17$. Вследствие растяжения частота собственных колебаний мембраны возрастает в $(K_2/K_1)^2 = 11,72:10,2 = 1,15$ раза; снижение частоты будет не на 40%, а всего лишь на 32% ($0,6 \cdot 1,15 = 0,68$) (K_1 — значение коэффициента прочности при $m = -2,17$; $K_1 = 3,196$ — коэффициент частоты без учета растяжения).

2. Мембраны из сплава титана ВТ-14. Имеем следующие параметры:

$$\rho = 4,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \sigma_r = 1000 \text{ МПа}; \quad E = 12 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,32.$$

Значения остальных параметров те же, что и в п. 1. Получаем:

$$\gamma_2 = 0,7; \quad W_{\max} \approx 0,169 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad m = -2,84.$$

Вследствие растяжения частота собственных колебаний мембраны возрастает в $(K_2/K_1)^2 = 12,66:10,21 = 1,24$ раза, т. е. из-за масла снижение частоты будет не на 30%, а на 13% ($0,7 \cdot 1,24 = 0,87$).

3. Мембраны из бериллиевой бронзы. Имеем:

$$\rho = 8,23 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \varepsilon_1 = 1230 \text{ МПа}; \quad E = 13,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,32.$$

Остальные параметры прежние. Получаем:

$$W_{\text{мас}} \approx 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \chi = 0,78; \quad m = -3,95; \quad K_2^2 = 12,9.$$

Тогда $(K_2/K_1)^2 = 12,9 : 10,2 = 1,27$; из-за масла снижение частоты составляет всего лишь 12% ($0,78 \cdot 1,27 = 0,99$).

4. Мембраны из сплава Н36ХТЮ. Имеем:

$$\rho = 8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \varepsilon_1 = 1000 \text{ МПа}; \quad E = 21 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad \nu = 0,32.$$

Аналогичным образом получаем:

$$W_{\text{мас}} \approx 0,096 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \chi = 0,77; \quad m = -2,115; \quad K_2^2 = 11,65.$$

Тогда $(K_2/K_1)^2 = 11,65 : 10,2 = 1,14$; наличие масла снижает частоту колебаний на 12% ($0,77 \cdot 1,14 = 0,88$).

Приведенные примеры показывают, что если из-за жидкого диэлектрика падает частота собственных колебаний упругого элемента, создавая внутреннее давление в допустимых пределах, ее можно увеличить. Частота колебаний упругого элемента уменьшается незначительно по сравнению с частотой колебаний отдельно взятой мембраны с теми же параметрами. Наличие масла, как среды передачи давления, незначительно снижает быстродействие преобразователя (за исключением дюралюминия, необходимость применения которого обоснована выше).

Создание предварительного внутреннего давления обусловлено не только повышением собственной частоты мембраны, но и необходимостью получения преобразователя, способного реагировать как на давление, так и на разрежение.

При помощи дифференциального емкостного преобразователя можно собрать мостовую схему измерения, где емкости $C_1 = C_2 = C$ включены в плечи моста.

Значение выходного напряжения будет [13]:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \frac{\Delta Z}{Z} \dot{U}_0 \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z} + \frac{Z}{Z_1} \right) + \frac{Z + Z_1}{Z_1} - \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z_1 Z} - \frac{\Delta Z^2}{2Z^2}}, \quad (9)$$

где ΔZ — приращение сопротивления преобразователя; Z_n — нагрузка, подключаемая к диагонали моста; $Z_1 = R$ — активные плечи моста;

$Z = \frac{1}{i\omega C}$ — емкостное сопротивление преобразователя; \dot{U}_0 — напряжение питающего генератора.

Из-за малости ΔZ можно пренебречь последними двумя членами знаменателя выражения (9). Принимая величину Z_n на один порядок больше других сопротивлений, выражение (9) примет вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta C}{C} U_{\text{г}} \frac{2 j_0 C R}{1 - \omega^2 R^2 C^2 - 2 j_0 C R} \quad (10)$$

откуда

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta C}{C} U_{\text{г}} \frac{2 j_0 C R}{1 - \omega^2 C^2 R^2} \quad (11)$$

Оптимальное значение выходного напряжения получается при $\omega = \frac{1}{\sqrt{2} C R}$, т. е.

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta C}{C} U_{\text{г}} \quad (12)$$

Оптимальность получается при определенной частоте, поэтому питание измерительного моста необходимо производить от генератора стабилизированной частоты.

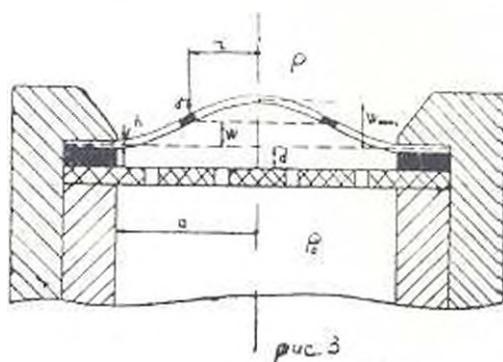


Рис. 3.

Расчет изменения емкости дифференциального преобразователя производится по рис. 3. Верхняя мембрана, исходя под давлением P , деформируется, и отклонение W при радиусе r определяется выражением [14]:

$$W = \frac{3}{16} P_0 \frac{(1 - \nu^2)}{E h^3} (a^2 - r^2)^2 \quad (13)$$

Начальная емкость недеформированной мембраны

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_a^2}{d} \quad (14)$$

Из-за деформации мембраны значение емкости C_0 при $\frac{W}{d} \ll 1$ будет [13]:

$$C_0 = C - \Delta C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_a^2}{d} \int_0^a \left(1 - \frac{W}{d}\right) r dr \quad (15)$$

Подставляя значение W из (13) и интегрируя, получим

$$C_0 = C - \Delta C = \frac{\pi \varepsilon_0 a^2}{d} - \frac{\pi \varepsilon_0 (1 - \nu^2) a^4}{16d^3 E h^3} P_0 \quad (16)$$

где

$$\Delta C = \frac{\pi \varepsilon_0 (1 - \nu^2) a^4}{16d^3 E h^3} P_0 \quad (17)$$

Используя (2) и подставляя значение D из (1), получим значение внутреннего давления P_0 , необходимое для максимального отклонения мембраны.

$$P_0 = \frac{64 W_{\max}}{a^4} \cdot \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), получим:

$$\Delta C = \frac{\pi \varepsilon_0}{3d^3} W_{\max} \quad (19)$$

тогда (16) примет вид:

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0 a^2}{d} \left(1 - \frac{W_{\max}}{3d} \right) = C \left(1 - \frac{W_{\max}}{3d} \right) \quad (20)$$

При действии внешнего давления P значение первой межэлектродной емкости возрастает и принимает значение

$$C_0 = C - \Delta C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0 a^2}{d} - \frac{\pi \varepsilon_0 (1 - \nu^2) a^4}{16d^3 E h^3} P_0 \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \quad (21)$$

используя (18), получим:

$$C_0 = C \left[1 - \frac{W_{\max}}{3d} \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \right] \quad (22)$$

Приращение емкости C_0 будет:

$$\Delta C_0 = C_0 - C_0 = C \frac{W_{\max}}{3d} \frac{P}{P_0} \quad (23)$$

Относительное изменение емкости

$$\frac{\Delta C_0}{C_0} = \frac{W_{\max}}{3d} \cdot \frac{1}{1 - \frac{W_{\max}}{3d}} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (24)$$

Так как $\frac{W_{\max}}{3d} \ll 1$, то выражение (24) можно представить в виде

$$\frac{\Delta C_0}{C_0} = \frac{W_{\max}}{3d} \cdot \frac{P}{P_0} \left(1 + \frac{W_{\max}}{3d} \right) \quad (25)$$

Подставляя выражение (25) в (12), получим:

$$U_{\text{max}} = \frac{W_{\text{max}}}{d} U_r \frac{P}{P_0} \left(1 + \frac{W_{\text{max}}}{3d} \right), \quad (26)$$

Выражение (26) показывает, что для малых отклонений $\frac{W_{\text{max}}}{3d}$ существует линейная зависимость между выходным напряжением и приложенной силой или давлением.

Блок-схема измерения с емкостным дифференциальным преобразователем давления показана на рис. 4. Она состоит из кварцевого генератора Γ , измерительного моста M , усилителя $У$ и фильтра Φ с согласующим устройством $СУ$. Фильтр собирается по схеме двойного Т-образного моста, настроенного на собственную частоту колебания упругого чувствительного элемента.

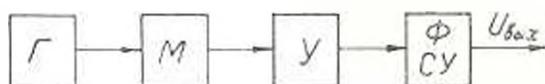


Рис. 4.

Были сняты градуировочные кривые между выходным напряжением и приложенной силой. Снятые зависимости линейны. Чувствительность была равна примерно $1,0 \cdot 10^{-2} \frac{В}{Н\cdot м} \left(1,0 \frac{В}{кг\cdot с\cdot м^2} \right)$. Чувствительность емкостного преобразователя оставалась почти неизменной при изменении температуры в пределах от -15°C до $+30^\circ\text{C}$ (чувствительность изменяется всего лишь на 2–3%). На результаты измерения большое влияние оказывает значение напряжения, и, поэтому, питание осуществлялось от стабилизированного источника с напряжением $\pm 18 В$. Регистрация силы падающего шарика показала фронт $80 \div 85$ мксек (диаметр мембраны $3,0 \cdot 10^{-2}$ м). Быстродействие можно увеличить уменьшением диаметра мембраны. Например, для получения частоты собственных колебаний дюралюминиевой мембраны более 20 кг/ц необходимо ее диаметр взять равным $12 \cdot 10^{-3}$ м, а толщину $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

В ы в о д ы

1. Разработанный дифференциальный емкостной преобразователь, внутренняя полость которого под определенным давлением заполнена жидким диэлектриком, обеспечивает высокие частотные свойства. Масло, как среда передачи давления, лишь незначительно ухудшает его частотные свойства. Из-за напряженного состояния мембраны предлагаемый преобразователь с успехом работает как при давлениях, так и при разрежениях.

2. В дифференциальном емкостном преобразователе существует явная зависимость между относительным изменением емкости и приложенным давлением.

ԵրՄԻ մ. Կ Մարկս

Поступило 7. V. 1976.

Վ. Ի ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՃՆՇՐԱՆ ԳԻՆԻՐԵՆՑԻԱԿ ԱՐՈՒԱԳՈՐՄ ՈՒՆԱԿԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒՆԻԶ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Օղի հարվածային ալիքների ճնշումն աճում է ակնթարթորեն, իսկ այնուհետև՝ էքսպոնենցիալ օրենքով դանդաղ նվազում: Համապատասխան կերպափոխիչների պետք է լինեն մի կողմից արագացում, իսկ մյուս կողմից՝ դանդաղ փոփոխվող ճնշումները չափելու հնարավորություն ունենան: Նախագծված ունակային գիֆերենցիալ կերպափոխիչը օժտված է բարձր ջերմակայունությամբ և դժարությամբ: Նա ունի երֆա շարժական և երկու անշարժ թիթեղների: Անշարժ թիթեղների վրա բաշտված է անցքեր, և թիթեղներն իրարից հեռու են որոշ բացակով, սրբ լցված է հեղուկ դիէլեկտրիկով: Հեղուկ դիէլեկտրիկի միջոցով ճնշումը մի շարժական թիթեղից հաղորդվում է մյուսին: Կերպափոխիչի ներքին նախնական ճնշումը նպաստում է ճնշման ինչպես զրական, այնպես էլ բացասական փուլերի չափմանը: Կերպափոխիչի նեոսի նախնական ճնշումը օգնում է զգալուն տոտազական էլեմենտի սեփական տատանումների հաճախությունը մեծացնելուն: Այլաժր հիմնավորված է ինչպես տեսականորեն, այնպես էլ փորձնական եղանակով:

Л И Т Е Р Т У Р А

1. Андреев К. К., Беллев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М., «Обorongиз», 1960.
2. Недин В. В., Кривцов В. А. Измерение давлений, возникающих при взрыве металлических порошков и статических взрывных камерах. «Наукова Думка», Киев, 1971.
3. Варданян В. Р., Шаринян Н. А. Об одном случае определения собственной частоты преобразователей давления воздушных ударных волн и оценка динамической погрешности. Межвузовский сборник научных трудов, серия XVII, радиотехника и электроника, вып. 1, 1974.
4. Варданян В. Р. Торндалийный резонаторный датчик давления воздушных ударных волн. «Приборы и системы управления», № 11, 1973.
5. Турчин А. М. Электрическое измерение неэлектрических величин. Изд. «Энергия», 1966.
6. Варданян В. Р. и др. Емкостный датчик для регистрации параметров давления воздушных ударных волн. «Приборы и системы управления», № 6, 1975.
7. Варданян В. Р., Мамиян С. Э. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь давления с частотным выходом. Новые пьезо- и сегнетоматериалы и их применение. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, М., 1975.
8. Разработка измерительных преобразователей для регистрации давления ударных волн, отчет ОНИР № 779, Гос. регист. Б498013, 1976, Ереван, ЕрПИ.

9. *Roger I. Fritck*. Differential pressure transducer, патент США № 3618390 от 9.XI, 1971, кл. 73 338.
10. *Варданян В. Р.* Емкостные датчики. «Вибрационная техника», МДНТП им. Ф. Э. Держинского, М., 1975.
11. *Гимозенко С. П., Войновский—Крисер С.* Пластинки и оболочки, М., 1963.
12. *Гонимкович В. С.* Собственные колебания пластинок и оболочек. Киев, 1964.
13. *Нуберт Г. П.* Измерительные преобразователи неэлектрических величин. М. «Энергия», 1970.
14. *Анорелин А. Е.* Уругие элементы приборов. М., «Машиностроение», 1962.