

Академия Наук СССР
Акустический журнал
Том III. 1957. Вып. 4

Е. В. Романенко

МИНИАТЮРНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ
УЛЬТРАЗВУКА

МИНИАТЮРНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ
УЛЬТРАЗВУКА

Е. В. Романенко

Описана конструкция, технология изготовления и способ калибровки пьезоэлектрических миниатюрных приемников ультразвука с чувствительным элементом из керамического титаната бария. Максимальный размер чувствительного элемента приемника около 0,2 мм. Неравномерность частотной характеристики около 30% при полосе от 1 до 10 мГц. Чувствительность около 0,004—0,007 мкв/бар. Диаграмма направленности круговая в плоскости, перпендикулярной к оси держателя приемника.

При решении некоторых акустических задач бывает необходимо измерять в жидкости звуковое давление, являющееся сложной функцией координат и времени. Так, например, давление в фокальной области ультразвуковых линз и фокусирующих излучателей весьма быстро меняется от точки к точке, а при повышении интенсивности форма волны начинает изменяться вследствие нелинейности уравнения состояния среды и уравнения движения. Поэтому для акустических измерений бывают необходимы широкополосные ненаправленные приемники ультразвука с размерами приемной части, вводимой в исследуемое поле, меньшими длины волны. При создании таких приемников возникает трудность.

Обычно применяются приемники с пьезоэлектрическим или магнито-стрикционным чувствительным элементом. Эти приемники бывают двух видов, а именно, в исследуемое поле вводится либо непосредственно чувствительный элемент, либо конец волновода, на другом конце которого расположен чувствительный элемент. Волноводы выполняются обычно в виде металлического стержня [1]. Приемники с волноводом имеют тот недостаток, что на высоких частотах, когда длина волны в материале стержня становится сравнимой с его диаметром, сигнал, проходя по волноводу, искажается; по-видимому, здесь сказывается дисперсия. Поэтому, практически весьма трудно осуществить приемник ультразвука с волноводом, пригодный для анализа формы сигнала со спектром частот, простирающимся, например, до 10 мГц. Приемники с чувствительным элементом, непосредственно вводимым в исследуемое поле, могут иметь существенную направленность даже в том случае, когда размеры элемента много меньше длины волны. Например, приемник с пьезоэлементом в виде куба со стороной 1 см имел на частоте 10 кГц диаграмму направленности с провалом до нуля [2]. Чтобы устранить этот недостаток, пьезоэлементам придают форму сферических и цилиндрических оболочек с радиальной поляризацией. Наиболее широкополосный приемник этого типа имел пьезоэлемент в виде полого цилиндра из керамического титаната бария с диаметром и длиной около 1,5 мм [3, 4]. Этот приемник имел практически независимую от частоты чувствительность до 1 мГц и круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной к оси цилиндра. Дальнейшее расширение частотной полосы наталкивается на трудности, связанные с изготовлением и монтажом пьезоэлементов малых размеров.

В настоящей работе изложен способ, позволяющий преодолеть эти трудности и дается описание конструкции, технологии изготовления и методики калибровки пьезоэлектрических приемников с пьезоэлементом из керамического титаната бария с максимальным размером около 0,2 мм.

Приемник имеет частотную характеристику с полосой до 10 мГц с понижением чувствительности к 10 мГц на 30%, круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной к оси держателя пьезоэлемента, и чувствительность около 0,004—0,007 мкв/бар.

Конструкция описываемого приемника схематически изображена на фиг. 1. Чувствительный элемент 1 выполнен в виде сферического слоя из керамического титаната бария толщиной около 0,05 мм, нанесенного на платиновый шарик 2, оплавленный на конце проволоки 3 диаметром 0,05 мм. Шарик является внутренним электродом, а проволока — подводкой к нему. Проволока проходит внутри стеклянного капилляра 4, к торцу которого присоединен шарик. Капилляр является продолжением стеклянной трубки 5, которая служит держателем и коаксиальным выводом. На внешнюю поверхность трубки, капилляра и керамического слоя путем вжигания нанесено серебряное покрытие 6. Трубка заканчивается переходным патроном 7, предназначенным для соединения приемника с предварительным усилителем.

Отличительной чертой конструкции этого приемника является то, что пьезоэлемент изготавливается не отдельно, а спекается непосредственно на внутреннем электроде. В качестве материала для внутреннего электрода выбрана платина потому, что она, во-первых, способна выдержать температуру спекания титаната бария (1380°), во-вторых, не окисляется при этой температуре и почти не реагирует с титанатом бария и, в-третьих, обладает малым удельным сопротивлением, что важно при малой толщине проволоки.

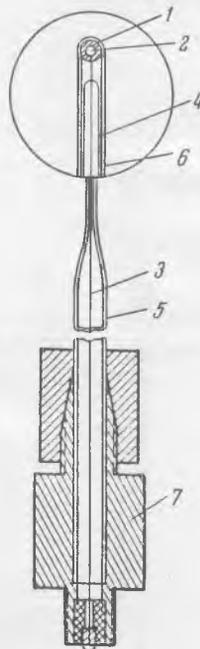
При изготовлении приемника платиновый шарик покрывается тонким слоем сметанообразной массы диспергированного в воде титаната бария и обжигается в пламени горелки. Строгий контроль температуры при этом не обязателен, следует лишь обращать внимание на то, чтобы титанат бария не плавился. Эта операция повторяется несколько раз до получения слоя нужной толщины. Присоединение шарика, покрытого слоем титаната бария к торцу капилляра, осуществляется пайкой в пламени горелки. Нельзя допускать полного оплавления шарика стеклом, так как это сильно уменьшит чувствительность приемника.

Общий вид приемника приведен на фиг. 2. На фиг. 3 изображен шарик и часть капилляра.

Поляризация керамического слоя производится при напряжении поля около 20 кв/см. При эксплуатации приемника целесообразно работать с постоянной подполяризацией, подавая на вход предварительного усилителя, к которому подключен приемник, анодное напряжение через сопротивление в несколько мгом. При наличии постоянной подполяризации чувствительность приемника несколько выше, чем при наличии только остаточной поляризации.

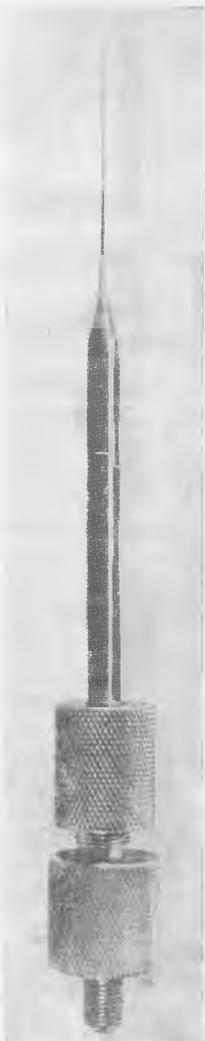
Емкость приемника, равная сумме емкостей пьезоэлемента и коаксиального вывода, составляет 20 пкф, причем емкость коаксиального вывода равна приблизительно 5 пкф.

Испытание приемников производилось в импульсном режиме. Это устранило погрешности, вносимые электрической наводкой, и позволяло работать в незагруженной ванне. На фиг. 4 изображена блок-схема установки, применявшейся при определении диаграммы направленности и при калибровке приемников. Синусоидальное напряжение от генератора 1 и импульсное напряжение от генератора импульсов 2 подводилось к уси-



Фиг. 1

лителю с балансной схемой 3. Получаемые на его выходе импульсы с высокочастотным заполнением, имеющие длительность 10 мксек и частоту повторения 3 кГц, подавались на излучатель 4. Излучатель представлял собой диск из керамического титаната бария, укрепленный на изогнутой стеклянной трубке и покрытый изолирующим лаком (фиг. 5). На излучатель через сопротивления $R_2 = R_3 = 1$ мгом подавалось для поляризации постоянное напряжение, равное 110 в. Акустический сигнал от излучателя в ванне 7 принимался приемником 8, укрепленным в координатном устройстве и соединенным с предварительным усилителем типа катодного повторителя 9. На приемник подавалось напряжение подполяризации, равное постоянному напряжению на излучателе. Сигнал от предварительного усилителя подавался на осциллограф 10.



Фиг. 2



Фиг. 3

Снятие диаграмм направленности показало, что, как и следовало ожидать, диаграммы направленности приемника в плоскости, перпендикулярной к его оси, являются круговыми, так как пьезоэлемент в этой плоскости полностью симметричен. На фиг. 6 приведены диаграммы направленности, снятые на частотах 3 и 8 мГц.

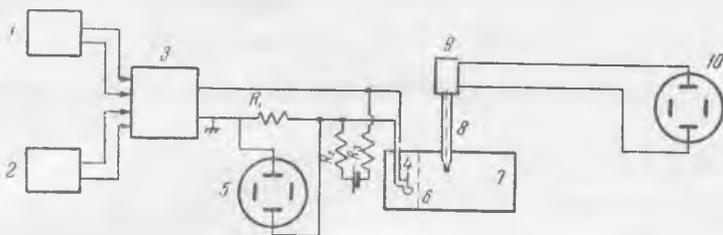
Из-за малой чувствительности приемников нам не удалось осуществить их абсолютную калибровку. Поэтому, определение чувствительности приемников производилось путем сравнения со вспомогательным приемником, калиброванным абсолютно методом взаимности по полю. Калибровка вспомогательных приемников производилась по схеме трех измерений в квазисферическом поле [5]. Вспомогательные преобразователи были аналогичны изображенному на фиг. 5. Калибровка производилась в диапазоне от 1 до 10 мГц.

Чтобы избежать значительного ослабления сигнала, измерения производились в воде. Поскольку вспомогательные преобразователи не были экранированы, то, чтобы избежать перегрузки предварительного усилителя большой наводкой, оказалось необходимым разделить ванну перегородкой из органической пленки 6 толщиной 0,05 мм на два отсека, один из которых был заполнен трансформаторным маслом, другой — водой, и поместить излучатель в отсек с маслом в непосредственной близости от перегородки.

Ток через излучатель, как это видно из фиг. 4, определялся путем измерения напряжения на активном сопротивлении $R_1 = 11$ ом, включенном последовательно с излучателем. Напряжение холостого хода определялось как напряжение на входе предварительного усилителя, поскольку его входное сопротивление на частотах от 1 до 10 мГц было много больше внут-

ренного сопротивления всех преобразователей, в том числе и миниатюрного приемника.

На фиг. 7 приведена частотная характеристика чувствительности вспомогательного приемника с диаметром 2 мм и толщиной 0,2 мм. При помощи этого приемника определялось давление в такой области звукового поля, где звуковое давление мало изменяется в пространстве. Затем в эту об-



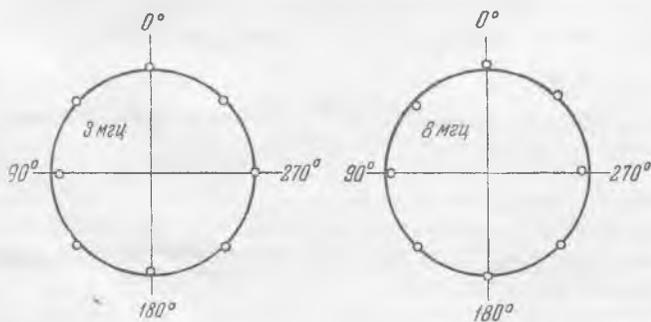
Фиг. 4

ласть помещался калибруемый миниатюрный приемник. Результаты калибровки миниатюрного приемника обозначены на фиг. 8 кружками. Эти результаты получены с точностью не хуже 20%. Частотные характеристики других приемников такого же размера, аналогичны указанной на фиг. 8.



Фиг. 5

Частотный ход чувствительности миниатюрных приемников определялся еще и другим способом. Этот способ аналогичен предложенному в [6] и состоит в следующем. Представим, что звуковое поле частоты ω модули-



Фиг. 6

ровано частотой Ω . Мгновенное значение плотности энергии в таком поле равно

$$E = \frac{P_0^2}{\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2 \cos^2 \omega t,$$

где P_0 — амплитуда звукового давления, m — глубина модуляции, c — скорость звука.

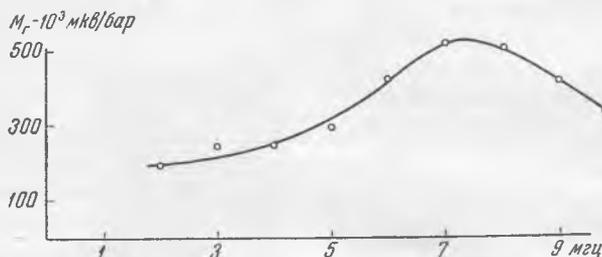
Среднее значение \bar{E} за время, малое по сравнению с периодом модуляции, но большое по сравнению с периодом высокочастотных колебаний равно

$$\bar{E} = \frac{P_0^2}{2\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2.$$

Радиационное давление пропорционально плотности энергии

$$P = k\bar{E} = k \frac{P_0^2}{2\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2.$$

Амплитуда переменной части радиационного давления, имеющей частоту Ω , равна $P_0 = k \frac{P_0^2}{\rho c^2} m$.

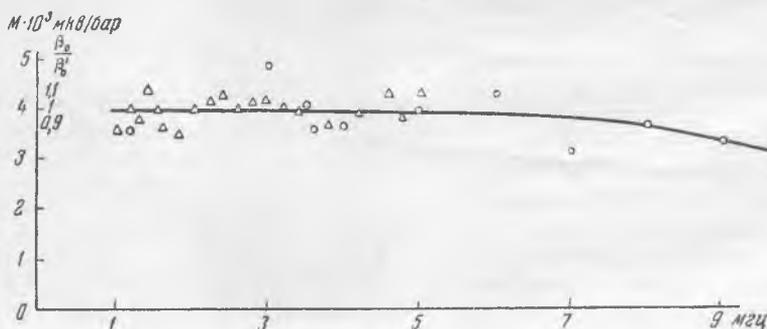


Фиг. 7

Если поместить приемник в модулированное звуковое поле, то, в случае его линейности, можно найти

$$V_0 = M_\Omega \cdot P_0, \quad v_0^2 = M \cdot p_0,$$

где V_0 и v_0 — амплитуды электрического напряжения, обусловленного соответственно радиационным и звуковым давлением. M_Ω и M — чувствительность приемника на частоте Ω и ω .



Фиг. 8

Положим Ω и m постоянными и зафиксируем частоту ω_1 . Тогда для фиксированной частоты ω_1 и для изменяющейся частоты ω можно написать следующие соотношения:

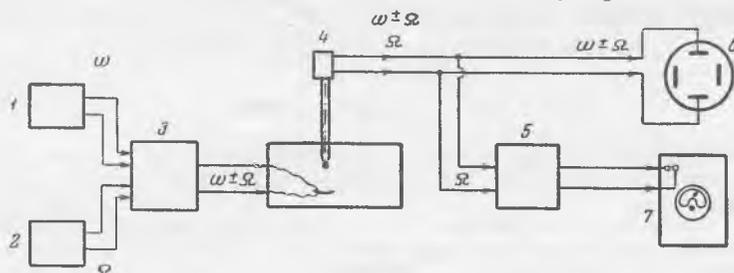
$$V'_0 = \frac{M_\Omega \cdot km}{\rho c^2} (p'_0)^2 = \frac{M_\Omega \cdot km}{\rho c^2} \left(\frac{v'_0}{M'} \right)^2, \quad V_0 = \frac{M_\Omega \cdot km}{\rho c^2} (p_0)^2 = \frac{M_\Omega \cdot km}{\rho c^2} \left(\frac{v_0}{M} \right)^2,$$

где p'_0 , v'_0 и M' — соответственно, звуковое давление, напряжение, выдаваемое приемником, и чувствительность на частоте ω_1 . Отсюда можно найти

$$\frac{M}{M'} = \left(\frac{v_0}{v'_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{V'_0}{V_0}}.$$

Это выражение дает чувствительность приемника на всех частотах, отнесенную к чувствительности на частоте ω_1 .

По этому способу была определена относительная чувствительность миниатюрных приемников. На фиг. 9 изображена блок-схема соответствующей этому способу установки. Синусоидальное напряжение частоты ω от генератора 1 и синусоидальное напряжение частоты $\Omega = 126$ кгц от генератора 2 подавалось на смеситель-усилитель 3. Модулированное напряжение



Фиг. 9

ние подводилось к излучателю. Чтобы получить достаточно большое звуковое давление, излучатели были выполнены в виде части сферического слоя из керамического титаната бария с радиусом кривизны 1 см, углом раскрытия около 60° и толщиной в 1 мм и 2 мм. Исследуемый приемник помещался в фокус излучателя. Напряжение с предварительного усилителя 4 подавалось на осциллограф 6 и избирательный усилитель 5, к выходу которого был присоединен вольтметр 7. На осциллографе наблюдалось напряжение V_0 , а на вольтметре — напряжение V .

Предварительно было установлено, что интенсивность поля рассеяния мала по сравнению с интенсивностью в фокусе и поэтому допустимо работать в незаглушенной ванне. Был найден диапазон напряжений на излучателе, при которых V_0 пропорционально V_0^2 и измерения проводились в этом диапазоне.

Результаты определения относительной чувствительности M/M' (на фиг. — β_0/β_1) в диапазоне от 1 до 5 мгц показаны на фиг. 8 треугольниками. Из фигуры видно, что частотные характеристики чувствительности, снятые разными методами, совпадают.

Выражаю благодарность Н. А. Рою, предложившему принцип конструкции описанных приемников и руководившему выполнением работы, а также лаборанту Ю. М. Московенко за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Коррелманн. Beiträge zur Ultraschallmesstechnik in Flüssigkeiten. *Acustica*, 1952, 2, 92—95.
2. А. А. Ананьева. Приемники звука из керамики титаната бария. Отчет. Акустический институт АН СССР, 1955.
3. Л. Бергман. Ультразвук. М., ИЛ, 1956.
4. R. H. Mellen. On experimental study of the collapse of a spherical cavity in water. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1956, 28, 3, 447—454.
5. А. А. Ямпольский. Абсолютная градуировка электроакустических преобразователей методом взаимности в квазисферическом поле. Тр. Комиссии по акустике, 1955, 8, 37, 21—45.
6. В. А. Зверев. О возможности абсолютной калибровки излучателей и приемников звука по давлению радиации без использования радиометра. *Акуст. журн.*, 1956, 2, 4, 378.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
29 января 1957 г.