

УДК 534.6.08

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЬЕЗОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИЛЬНЫХ ВОЗБУЖДАЮЩИХ ПОЛЯХ И ПРИ БОЛЬШИХ ДАВЛЕНИЯХ

*П. Л. Закс, А. М. Эльгард*

Рассматривается метод исследования электромеханических свойств пьезоактивных материалов при одновременном действии сильных возбуждающих полей и больших давлений.

Широкое применение пьезокерамических и магнитострикционных преобразователей в ультразвуке и измерительной технике во многих случаях предусматривает их работу при воздействии сильных возбуждающих полей и больших давлений. При этом поведение активного материала преобразователей характеризуется значительной нелинейностью [1—4], что приводит к необходимости измерения параметров, в частности пьезомодулей, в условиях, приближающихся к реальным условиям работы преобразователей.

Определение пьезомодулей керамики ( $d_{31}$  и  $d_{33}$ ) в сильных электрических полях и при больших давлениях может быть произведено путем измерения амплитуды деформации образца при его возбуждении электрическим полем на частоте, лежащей значительно ниже резонансных частот образца [5]:

$$\begin{aligned}(u_{33})_m &= d_{33}(E_3)_m, \\ (u_{11})_m &= d_{31}(E_3)_m,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $(E_3)_m$  — амплитуда напряженности электрического поля в направлении поляризации образца;  $(u_{33})_m$  и  $(u_{11})_m$  — амплитуда деформации соответственно параллельно и перпендикулярно направлению поляризации.

У практически важных составов пьезокерамики на основе титаната бария пьезомодуль  $d_{33} = 1 \div 4 \cdot 10^{-6}$  CGSE, а у составов на основе цирконата-титаната свинца (система ЦТС)  $d_{33} = 7 \div 12 \cdot 10^{-6}$  CGSE.

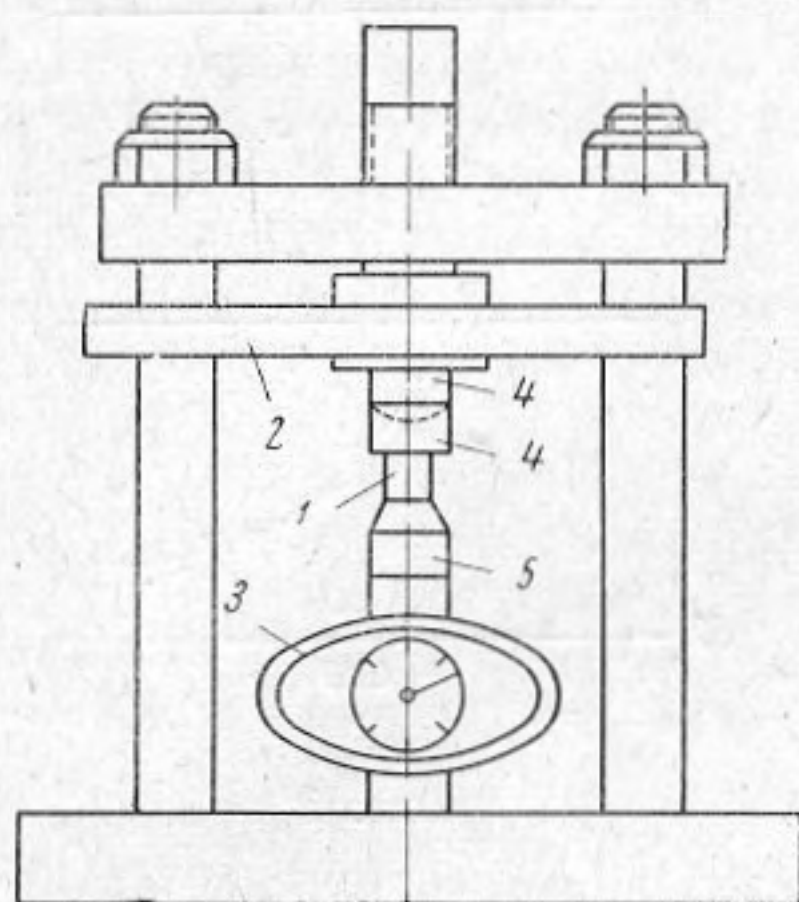
В соответствии с формулой (1) при  $d_{33} = 1 \div 12 \cdot 10^{-6}$  CGSE и при  $E_{эфф} = 0,1 \div 7$  кВ/см величина  $(u_{33})_m$  лежит в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$ .

При действии сравнительно сильных возбуждающих полей, при которых величина  $(u_{ik})_m > 10^{-5}$ , она может быть непосредственно измерена с помощью проволочных или полупроводниковых тензодатчиков [4].

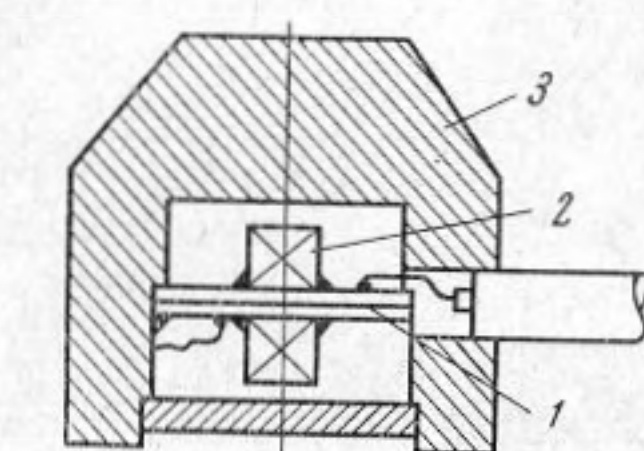
Для исследования зависимости  $d_{ik}$  от напряженности электрического поля определение величины  $(u_{ik})_m$  производится путем измерения амплитуды колебательного смещения поверхности образца с помощью емкостного датчика [6—8] или микрофона [1, 9]. Однако при одновременном действии на образец электрического поля, давления и температуры использование указанных методов измерения амплитуды деформации представляется затруднительным. Для измерений в таких условиях нами была разработана методика, основанная на применении вибродатчика [1]. При использовании специально сконструированного высокочувствительного пьезокерамического вибродатчика и рациональном его размещении

в измерительном устройстве, оказалось возможным произвести измерение зависимости пьезомодулей от напряженности электрического поля при разных значениях сжимающего напряжения, или зависимость пьезомодулей от сжимающего напряжения при разных напряженностях электрического поля, начиная, примерно с  $E_{эфф} = 100$  в/см, в том числе зависимость полных, обратимых и необратимых изменений пьезомодулей, с учетом фактора времени и температуры.

Конструкция измерительного устройства и вибродатчика показаны на фиг. 1 и 2. Контролируемое сжатие образцов 1, имеющих форму кубиков с длиной ребра 1 см, производится с помощью винтового пресса 2 с пружинным динамометром 3 (фиг. 1). Усилие на образец передается через сопрягающиеся по сфери-



Фиг. 1



Фиг. 2

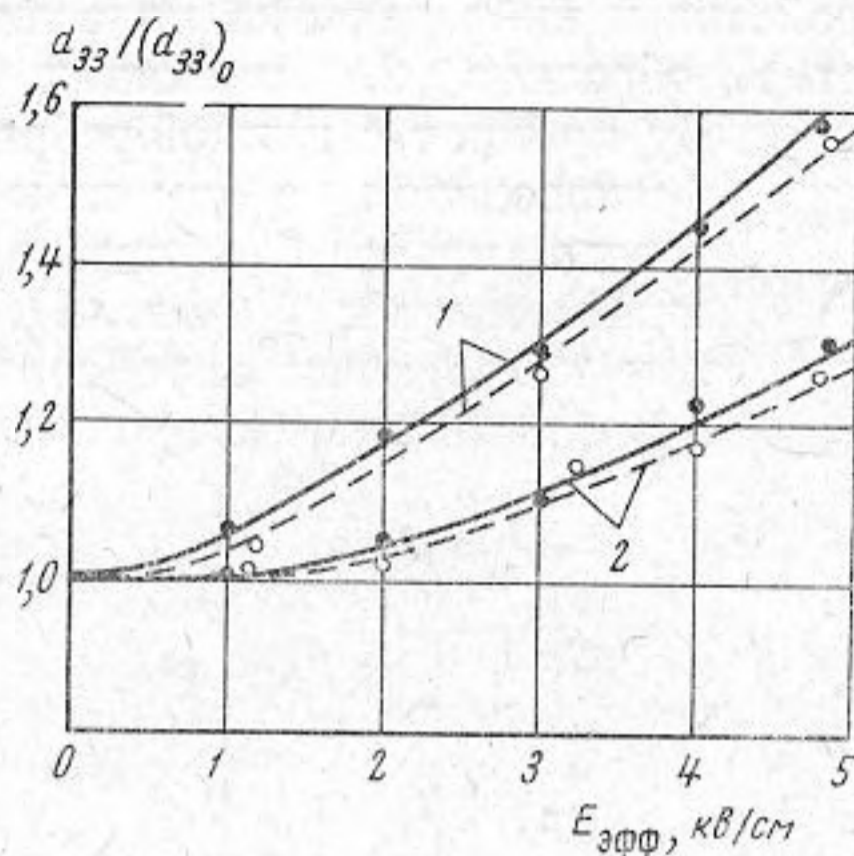
ческой поверхности стальные накладки 4, что предотвращает перекосы. Для электрической и тепловой изоляции образец помещается между ультрафарфоровыми прокладками. Вибродатчик 5 устанавливается на пружине динамометра соосно с образцом.

Пружина динамометра была выбрана достаточно гибкой, так что амплитуда колебательного смещения вибродатчика практически равнялась амплитуде смещения торца образца при его возбуждении электрическим полем. Благодаря принятому соосному расположению в прессе достаточно гибкой пружины, вибродатчика и образца достигается максимально эффективное использование вибродатчика для измерения амплитуды деформации образца, а также хорошая воспроизводимость результатов измерений. Следует отметить, что использование в устройстве для сжатия образца достаточно гибкой пружины имеет принципиальное значение, так как только в этом случае может быть обеспечено постоянство сжимающего напряжения в образце при его возбуждении электрическим полем. Действительно, при сжатии образца через пружину, гибкость которой значительно больше гибкости образца, прогиб пружины будет значительно больше изменения длины образца. При этом и пьезоэлектрическое удлинение или сжатие образца при действии электрического поля будет значительно меньше прогиба пружины, а следовательно, не изменит величины сжимающего усилия.

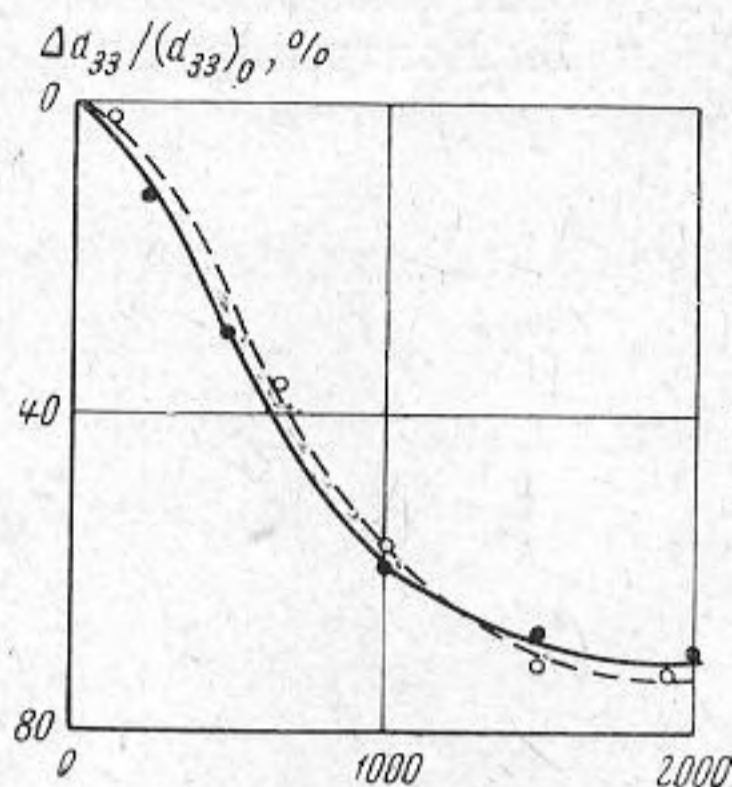
В нашем случае продольная жесткость образца  $k_{обр} = 10^{12}$  дин/см, а жесткость пружины  $k_{пр} = 2 \cdot 10^{10}$  дин/см, т. е. условие  $k_{пр} \ll k_{обр}$  выполняется.

Чувствительный элемент вибродатчика (фиг. 2) — пьезокерамический биморфный диск 1 с приклеенными по центру с двух сторон грузиками 2 жестко крепится по контуру с помощью эпоксидного клея внутри толсто-стенного стального корпуса 3 таким образом, что при осевом сжатии датчика статические усилия на биморфный элемент не передаются. Биморфный элемент был изготовлен из двух дисков керамики ЦТС-19 толщиной

0,3 и диаметром 20 мм. Масса грузиков была равна 3 г. Собственная частота изгибных колебаний биморфного элемента была около 1000 гц. Чувствительность датчика в режиме холостого хода при частоте 600 гц равна 16 мв/мк при пороговом сигнале  $10^{-3}$  мк в полосе  $1/3$  окт (при пороговом сигнале напряжение вибродатчика равняется шумовому напряжению на входе усилителя; измерения производились с помощью усилителя Ф-510). Частота возбуждения образца, равная 600 гц, была значительно ниже час-



Фиг. 3



Фиг. 4

тот собственных колебаний пружины динамометра и отдельных деталей пресса, так что резонансными эффектами можно было пренебречь.

Возбуждающее электрическое напряжение подавалось на образец от усилителя мощности лишь на короткое время, что предотвращало нагрев образцов. Сигнал с вибродатчика, пропорциональный амплитуде колебательного смещения, подавался через узкополосный усилитель на ламповый вольтметр или осциллограф, сравнивался с калибровочным сигналом поступающим от отдельного генератора.

Описываемая установка позволяла определить зависимость относительного изменения пьезомодулей  $d_{33}$  и  $d_{31}$  от напряженности электрического поля при разных значениях сжимающего статического напряжения в интервале, примерно от  $100 \text{ кг/см}^2$  до разрушающих ( $4 \div 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ ). Как показали измерения, при статическом напряжении в образце  $\sigma < 100 \text{ кг/см}^2$  механический контакт между сжимаемыми прессом элементами оказывается недостаточно надежным, в результате чего может быть допущена значительная ошибка в области больших амплитуд деформации образца.

Определение относительного изменения пьезомодулей при увеличении напряженности возбуждающего поля производится по формуле

$$\frac{\Delta d_{ik}}{(d_{ik})_0} = \frac{(E_m)_0}{(E_m)_1} \cdot \frac{V_1}{V_0} - 1, \quad (2)$$

вытекающей из уравнения (1). Здесь  $V_1$  и  $V_0$  — соответственно напряжение, генерируемое вибродатчиком при напряженности возбуждающего поля  $(E_m)_0$  и  $(E_m)_1$  ( $(E_m)_0 \approx 100 \text{ в/см}$ ).

Обратимые и необратимые изменения пьезомодулей при действии сжимающего напряжения при некотором значении  $E_m \geq 100 \text{ в/см}$  рассчитываются по формуле:

$$\frac{\Delta d_{ik}}{(d_{ik})_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_0},$$

где  $\frac{V_1 - V_0}{V_1}$  — относительное изменение напряжения вибродатчика при

увеличении сжимающего напряжения от  $\sigma_0$  до  $\sigma_1$  и при увеличении времени выдержки от  $t_0$  до  $t_1$ .

Описываемый метод измерений является новым, поэтому интересно сопоставить полученные с его помощью результаты с соответствующими данными, полученными ранее с помощью других методов, позволяющих измерить пьезомодуль либо в зависимости от амплитуды электрического поля, либо от величины механических напряжений.

В частности, для сравнения можно использовать данные об амплитудной зависимости пьезомодуля для разных пьезокерамических материалов, полученные нами ранее путем измерения с помощью микрофона звукового давления, создаваемого образцом при его возбуждении электрическим полем [2]. Кроме того, можно использовать также данные об изменениях пьезомодуля керамики при одностороннем сжатии, полученные нами с помощью баллистического гальванометра [4].

На фиг. 3 приведены зависимости пьезомодуля  $d_{33}$  для образцов керамики системы ЦТС-19 (1) и керамики на основе титаната бария (2) от напряженности электрического поля, снятые с помощью вибродатчика (сплошные кривые) и с помощью микрофона звукового давления. На фиг. 4 показано изменение пьезомодуля  $d_{33}$  при продольном сжатии керамики, определенное методом вибродатчика (сплошная кривая) и баллистического гальванометра (штриховая кривая).

Как видно из этих фигур, между сравниваемыми характеристиками имеется достаточно хорошее соответствие. При этом следует иметь в виду, что погрешность измерений по звуковому давлению составляет не менее  $\pm 20\%$ , а с помощью баллистического гальванометра не менее  $\pm 10\%$ .

Аппаратурная погрешность описываемого метода, рассчитанная с учетом формул (2) и (3), а также погрешности измерительных приборов равняются в сумме при измерении амплитудной зависимости  $\pm 10\%$ , а при измерении изменений пьезомодулей от давления  $\pm 5\%$ .

Описываемый метод был применен нами для исследования электромеханических свойств магнитоэлектрических материалов, что позволило получить данные о зависимости постоянной магнитоэлектрики от давления при различных уровнях индукции возбуждения, аналогичные соответствующим данным для пьезокерамики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. Berlincourt, H. Krueger. Domain processes in lead titanate zirconate and barium titanate ceramics. J. Appl. Phys., 1959, 30, 11, 1804—1810.
2. Л. Н. Сыркин, А. М. Эльгард. Исследование электромеханических свойств керамических сегнетоэлектриков в сильных электрических полях и при больших давлениях. Физ. тв. тела, 1964, 6, 11, 3325—3329.
3. И. П. Голямина. Исследование магнитоэлектрических ферритов в качестве материала для ультразвуковых излучателей (канд. диссертация). М., Акустический институт АН СССР, 1968.
4. Л. Н. Сыркин, Н. Н. Феоктистова, А. М. Эльгард. Обратимые и необратимые изменения пьезоэлектрической текстуры в керамических сегнетоэлектриках при одностороннем сжатии. Изв. АН СССР, сер. физ., 1965, 11, 2091—2095.
5. Р. Е. Пасынков. Исследование нелинейных свойств монокристаллов и поляризованной керамики в сильных переменных полях. Физ. тв. тела, 1961, 3, 5, 2588—2596.
6. G. Schmidt. Bestimmung der Elektrostriktionskonstanten.  $Q_{11}$  von Bariumtitanat — keramik. Z. Physik, 1956, 145, 4, 534—542.
7. H. L. Allsop, D. F. Gibbs. The electromechanical properties of barium titanate. Phyl. Mag., 1959, 4, 39, 359—370.
8. H. Herold, A. Lenk. Eine kapazitive Tastsonde zur Messung sehr kleiner Ausschläge im Frequenzgebiet von 50 Hz ÷ 2,0 MHz. Hochfrequenztechn. und Elektroakust., 1959, 68, 5, 152—158.
9. Г. А. Велюханова, Р. Е. Пасынков, В. И. Позерн, А. М. Эльгард. Пьезоэлектрические свойства поляризованной керамики в сильных переменных электрических полях. Изв. АН СССР, сер. физ., 1960, 24, 11, 1362—1365.