

В. Л. Карлаш

**ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ
С РАЗДЕЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: karlashvd.ukr.net*

Abstract: The experimental study of piezoelectric rods with separated electrodes is described. It is shown that the harmonic character of distribution of the internal mechanical stresses is saved after separation of electrodes. The constant level of output voltage between resonances is explained by the capacity division.

Keywords: piezoelectric rod, separated electrodes, resonant vibrations, stress state, amplitude-frequency characteristics.

Введение.

Пьезоэлектрические пластины и стержни из кварца, турмалина и сегнетовой соли со сплошными и разделенными электродами исследованы еще в 20-х годах 20-го века. Подробный обзор публикаций на эту тему приведен в монографии [7]. Показано, в частности, что для эффективного возбуждения основной продольной моды необходимо оставлять вблизи торцов пластины безэлектродные участки так, чтобы длина электродного покрытия составляла 0,75 от длины пластины. При дальнейшем уменьшении площади электродов эффективность возбуждения колебаний на основной продольной моде снижается, а на обертонах увеличивается. Для возбуждения обертонов продольных колебаний необходимо разделять электродное покрытие пластины на отдельные участки.

Толщинные колебания кварцевых пластинок с учетом взаимодействия с окружающей акустической средой впервые рассмотрены в [1]. Нестационарным толщинным колебаниям пьезокерамического слоя посвящена работа [15]. Саморазогрев цилиндрических оболочек с пьезоэлектрическим актуатором изучен в [19].

Задача о продольных колебаниях тонкого пьезокерамического стержня с разделенными на четыре одинаковых участка электродами рассмотрена в [24]. Влияние демпфирующих факторов, таких как внутреннее трение, потери на излучение и в элементах крепления учтены путем введения внешней фиктивной акустической среды на торцах стержня. Автор вплотную подошел к выводу основных соотношений для поперечно-поперечного пьезотрансформатора. Напряженное состояние стержня не рассмотрено.

В [12] построена эквивалентная схема многоэлектродного пьезоэлектрического стержня вариационным методом с применением аппарата функций Грина в местах разрыва электродного покрытия. Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на образцах из пьезокерамики PZT – 65/35 с размерами 7,67x1,42x0,19 мм. Электродное покрытие состояло из двух участков длиной 5,64 и 1,6 мм, разделенных безэлектродной полоской 0,43 мм. Автор пришел к выводу, что пьезоэлектрическое возбуждение можно представить распределением плотности силы, которая пропорциональна производной от электрического поля, а не самому полю. Напряженное состояние стержня не изучалось.

Публикации [11, 20 – 23] посвящены экспериментальному исследованию многоэлектродных пьезоэлектрических стержней. На двух противоположных главных поверхностях стержня электродное покрытие разделялось на несколько (до шести) оди-

наковых по площади электродов. На боковых и торцевых поверхностях в ряде случаев наносились дополнительные электроды. Возбуждающее электрическое поле подводилось к двум специально выбранным входным электродам, выходной сигнал снимался с двух других. Построены графики зависимости выходной разности электрических потенциалов от частоты в диапазоне от 200 Гц до 20 – 60 кГц. Эти графики имеют вид горизонтальных линий с выбросами в районе продольных резонансов. Амплитуда резонансных выбросов превышает среднюю величину выходного сигнала (примерно 12 мВ) в несколько раз [11]. При помощи отрицательной обратной связи авторам удалось практически полностью подавить резонансные выбросы и получить, по их мнению, сверхширокополосный пьезоэлектрический преобразователь. Для объяснения независимости амплитуды выходного сигнала от частоты за пределами резонансных выбросов авторы используют понятие так называемой доменной диссипации, которая возникает в тех случаях, когда направление возбуждающего электрического поля составляет с направлением поляризации некоторый угол. Напряженное состояние стержня и в этих работах не рассматривалось.

Цель настоящей статьи – экспериментальное исследование электромеханических процессов в многоэлектродных пьезокерамических стержнях и новая интерпретация результатов. Показано, в частности, что независимость коэффициента передачи многоэлектродного пьезотрансформатора от частоты за пределами резонансных выбросов объясняется тем обстоятельством, что многоэлектродная схема образует систему электрических межэлектродных емкостей. В результате этого между входной и выходной цепями возникают емкостные делители потенциала, коэффициент передачи которых зависит только от соотношения величин емкостей и никак не зависит от электромеханических процессов в пластине. Исследовано также напряженное состояние пьезоэлектрического стержня с разделенными электродами на продольных модах при нескольких вариантах соединения электродов. Установлено, что амплитуда внутренних продольных механических напряжений зависит от схемы соединения электродных областей. Она прямо пропорциональна напряженности возбуждающего электрического поля, механической добротности и пьезомодулю и обратно пропорциональна резонансной частоте.

1. Постановка задачи. Основные соотношения для напряжений.

Задачи о продольных колебаниях тонкого узкого пьезоэлектрического стержня с поперечной поляризацией при сплошных электродах на верхнем и нижнем основаниях исследованы в [6 – 8, 11, 13, 14, 16 – 18, 24 и др.]. В данном случае они являются тестовыми и дают возможность получить простые соотношения, легко проверяемые в эксперименте. Совместим начало координат с центром пластины и предположим, что она простирается влево до $y = -l_1$ и вправо до $y = l_2$. Все последующие обозначения совпадают с [13, 14].

Предполагаем, что на торцах пластины механические напряжения отсутствуют

$$\sigma_y |_{y=-l_1} = \sigma_y |_{y=l_2} = 0. \quad (1)$$

Уравнения состояния согласно [13] имеют вид

$$\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} = s_{11}^E \sigma_y + d_{31} E_x; \quad D_x = \varepsilon_{33}^T E_x + d_{31} \sigma_y. \quad (2)$$

Решая уравнение движения

$$\frac{d^2 U_y}{dy^2} + \rho \omega^2 s_{11}^E U_y = 0, \quad (3)$$

для компонент механических напряжений получаем выражение ($l_1 = l_2 = l$)

$$\sigma_y = \frac{d_{31} E_x (\cos k y - \cos k l)}{s_{11}^E \cos k l} \quad (k^2 = \rho \omega^2 s_{11}^E). \quad (4)$$

На резонансных частотах знаменатель этого выражения обращается в нуль, так что напряжения устремляются к бесконечности. Избежать этого можно введением в анализ механических потерь энергии через безразмерную комплексную частоту ($\kappa = kl$, $k_y = \lambda \kappa$) [8, 12]

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' = \kappa'(1 - j/2Q_m). \quad (5)$$

Влияние диэлектрических и пьезоэлектрических потерь на резонансных частотах можно не учитывать [6, 14, 17]. После преобразования тригонометрических функций мнимого аргумента через гиперболические функции (при условии, что $sh\kappa'' \approx \kappa''$, $ch\kappa'' \approx 1$) $\cos kl = \cos \kappa = \cos(\kappa' - j\kappa'') = \cos \kappa' + j\kappa'' \sin \kappa'$, $\sin kl = \sin(\kappa' - j\kappa'') = \sin \kappa' - j\kappa'' \cos \kappa'$, получаем формулу

$$\sigma_y = \frac{d_{31}E_x}{s_{11}^E} \frac{\cos \lambda \kappa' - j\lambda \kappa'' \sin \lambda \kappa' - \cos \kappa' - j\kappa'' \sin \kappa'}{\cos \kappa' + j\kappa'' \sin \kappa'}, \quad (6)$$

которая на резонансах ($\cos \kappa' = 0$) принимает вид

$$\sigma_{yres} = \frac{d_{31}E_x}{s_{11}^E} \frac{\cos \lambda \kappa'}{j\kappa'' \sin \kappa'} = -j \frac{d_{31}E_x}{s_{11}^E} \frac{2Q_m}{\kappa'} \cos \lambda \kappa'. \quad (7)$$

Резонансные частоты продольных колебаний пьезокерамического стержня определяются выражением [8, 14]

$$\kappa' = \frac{(2t+1)\pi}{2} \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (8)$$

следовательно

$$|\sigma_{yres}| = \frac{4Q_m}{\pi} \frac{|d_{31}|V}{2hs_{11}^E} \frac{|\cos[\lambda(2t+1)\pi/2]|}{(2t+1)}. \quad (9)$$

Здесь V – подведенная для возбуждения разность потенциалов; $2h$ – толщина; Q_m – механическая добротность.

Формула (9) показывает, что внутренние механические напряжения при продольных колебаниях пьезокерамических стержней определяются подведенной разностью электрических потенциалов, механической добротностью и отношением пьезомодуля к податливости. Они обратно пропорциональны резонансной частоте и распределяются вдоль продольной координаты по гармоническому закону, убывая от центра к краям пропорционально косинусу. Поскольку $|\cos[\lambda(2t+1)\pi/2]|$ не превышает единицы, а $(2t+1)$ принимает последовательно значения 1, 3, 5, ..., то амплитуда механических напряжений на обертонах меньше, чем на основной продольной моде в 3, 5, ... раз. Этот вывод является новым и, как показано далее, полностью подтверждается экспериментальными данными.

На рис. 1 представлены зависимости $(\cos[\lambda(2t+1)\pi/2])/(2t+1)$ для трех первых продольных мод, обозначенные как функции $f1$, $f2$, $f3$.

Предположим, что электродное покрытие стержня разделено с обеих сторон узким безэлектродным участком,

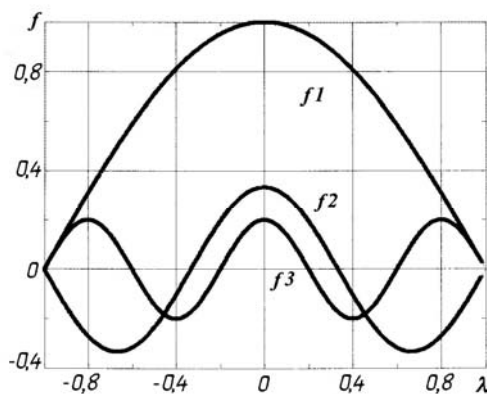


Рис. 1

параллельным торцевым поверхностям, на две области. Первая область простирается по длине от $y = -l_1$ до $y = 0$, а вторая область – от $y = 0$ до $y = l_2$. Переменные, относящиеся к первой области, снабдим индексом «1», ко второй – индексом «2». Предполагаем, что на торцах пластины механических напряжений нет, а на границе областей напряжения и перемещения непрерывны, т.е.

$$\sigma_y|_{y=-l_1} = \sigma_y|_{y=l_2} = 0; \quad \sigma_y(-0) = \sigma_y(+0); \quad u_y(-0) = u_y(+0). \quad (10)$$

Уравнения состояния и движения, а также их решения по форме записи в областях одинаковы, поэтому можно записать выражения для составляющих напряжений в следующем виде:

$$\sigma_{y1} = \frac{d_{31}E_{x1}\Delta \cos ky - Ak \sin kl_1 \cos ky}{\Delta s_{11}^E \cos kl_1} - \frac{Ak \sin ky + d_{31}E_{x1}\Delta}{s_{11}^E \Delta}; \quad (11)$$

$$\sigma_{y2} = \frac{d_{31}E_{x2}\Delta \cos ky + Ak \sin kl_2 \cos ky}{s_{11}^E \Delta \cos kl_2} - \frac{Ak \sin ky + d_{31}E_{x2}\Delta}{s_{11}^E \Delta}$$

$$(B_1 = B_2 = B = A / \Delta;$$

$$A_1 = \frac{d_{31}E_{x1}}{k \cos kl_1} - B \tan kl_1, \quad A_2 = \frac{d_{31}E_{x2}}{k \cos kl_2} + B \tan kl_2; \quad (12)$$

$$A = s_{11}^E d_{31} [E_{x1} \cos kl_2 (1 - \cos kl_1) - E_{x2} \cos kl_1 (1 - \cos kl_2)];$$

$$\Delta = s_{11}^E k [\cos kl_1 \sin kl_2 + \sin kl_1 \cos kl_2] = s_{11}^E k \sin k(l_1 + l_2).$$

Интегрируя уравнение для поперечной индукции из (2) с учетом (11) и (12), определим полный пьезозаряд, наводимый электромеханическими колебаниями в первой или второй областях

$$dQ = D_x ds = 2b D_x dy; \quad Q_1 = 2b \int_{-l_1}^0 D_{x1} dy; \quad Q_2 = 2b \int_{9_1}^{l_2} D_{x2} dy; \quad (13)$$

$$Q_1 = 2b \varepsilon_{33}^T \int_{-l_1}^0 \left(E_{x1} + \frac{d_{31} \sigma_{y1}}{\varepsilon_{33}^T} \right) dy; \quad Q_2 = 2b \varepsilon_{33}^T \int_{9_1}^{l_2} \left(E_{x2} + \frac{d_{31} \sigma_{y2}}{\varepsilon_{33}^T} \right) dy.$$

Введем следующие обозначения, связывающие напряженности электрического поля с потенциалами, поперечный коэффициент связи с пьезомодулем, а также свободные емкости областей с их геометрическими размерами

$$E_{x1} = -\frac{V_1}{2h}; \quad E_{x2} = -\frac{V_2}{2h}; \quad \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} = k_{31}^2; \quad \frac{2bl_1 \varepsilon_{33}^T}{2h} = C_{01}^T; \quad \frac{2bl_2 \varepsilon_{33}^T}{2h} = C_{02}^T. \quad (14)$$

Тогда для вычисления пьезозаряда имеем формулы

$$Q_1 = C_{01}^T (1 - k_{31}^2) V_1 + \frac{2bd_{31}}{s_{11}^E} [A_1 \sin kl_1 + B(1 - \cos kl_1)]; \quad (15)$$

$$Q_2 = -C_{02}^T (1 - k_{31}^2) V_2 + \frac{2bd_{31}}{s_{11}^E} [A_2 \sin kl_2 + B(1 - \cos kl_2)].$$

Никаких предположений относительно схемы соединения электродных областей до сих пор не производилось, поэтому соотношения (11), (13) и (15) справедливы для любых вариантов. Отделенные электроды могут соединяться между собой различными способами. Случаи пьезотрансформаторного включения приведены на рис. 2.

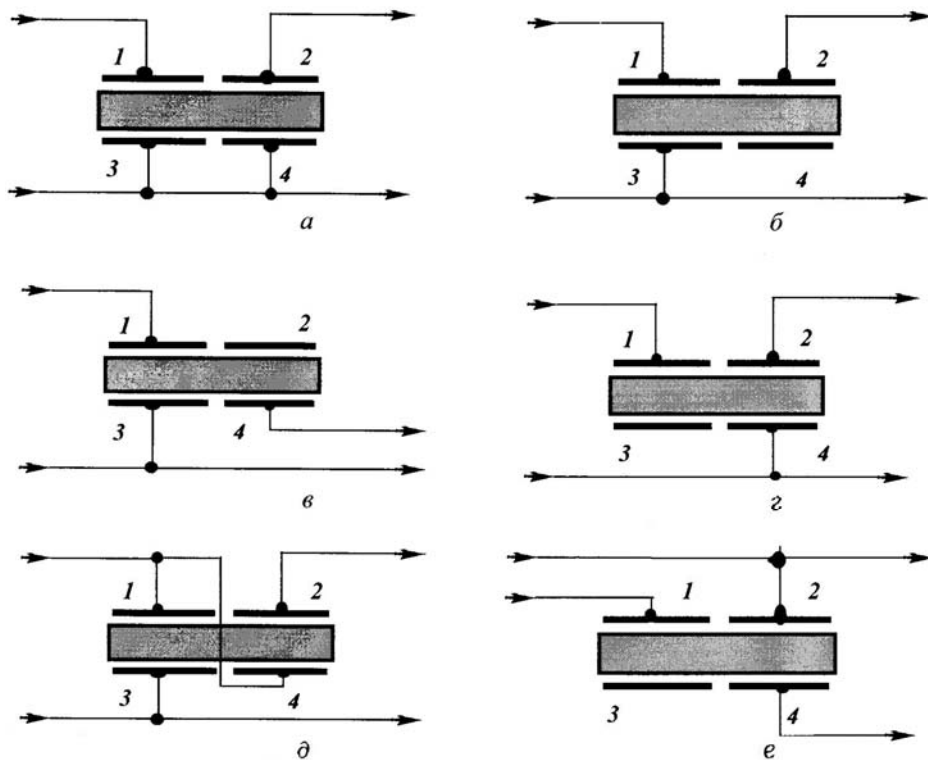


Рис. 2

Если в схеме рис. 2, *a* соединить вместе электроды 1 и 2, то такое нагружение соответствует случаю сплошных электродов. Подставляя в формулы (11) и (12) $E_{x1} = E_{x2} = E_x$, $l_1 = l_2 = l$, получаем

$$\sigma_{y1} = \frac{d_{31} E_x (\cos ky - \cos kl)}{s_{11}^E \cos kl}; \quad \sigma_{y2} = \frac{d_{31} E_x (\cos ky - \cos kl)}{s_{11}^E \cos kl}. \quad (16)$$

Эти выражения совпадают по форме записи с (4) для случая сплошных электродов, что и следовало ожидать.

Если продифференцировать во времени выражения (15), получим формулы для электрического тока в областях. Режим работы плоского поперечно-поперечного пьезотрансформатора можно проанализировать, если положить $j\omega Q_2 = 0$, тогда как для случая рис. 2, *d* следует приравнять токи в областях $j\omega Q_2 = j\omega Q_1$. Другие схемы соединения электродов требуют отдельного исследования.

2. Методика эксперимента.

Продольные колебания нескольких пьезокерамических стержней с поляризацией по толщине исследованы при сплошных и разделенных на отдельные участки электродах. Обоснование применяемой экспериментальной методики и оценка точности полученных результатов проведены в [6, 14]. Размеры опытных образцов: $70 \times 8 \times 7$ мм, $90 \times 12 \times 8$ мм и $100 \times 14 \times 10,5$ мм. Большинство измерений выполнено на стержнях первого размера. Резонансные частоты и полные проводимости определены в схеме Мэсона [2 – 4, 6, 14]. По измеренным частотам максимальной f_m и минимальной f_n проводимостей вычислены квадраты динамических коэффициентов электромеханической связи (КДКЭМС) по известным формулам [8 – 10]

$$k_a^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \cong \frac{f_n^2 - f_m^2}{f_n^2} \cong \frac{2(f_n - f_m)}{f_n}, \quad (17)$$

а по амплитудам потенциала U_2 на нагрузочном резисторе R и U_1 на входе последовательно соединенных пьезоэлемента и резисторе определены соответствующие проводимости

$$Y = \frac{U_2}{R(U_1 - U_2)}. \quad (18)$$

Для изучения напряженного состояния стержней и идентификации их мод колебаний применен метод пьезотрансформаторного датчика (МПТрД) [5, 6, 14, 18]. Вдоль половины длины стержня со сплошными электродами посреди поверхности 70×8 мм в электродном покрытии одного из оснований призмы отделены 11 датчиков. Их положения по отношению к центру поверхности и измеренные емкости приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Y , мм	0	3,2	6,5	9,5	12,5	15,5	18,7	21,5	25	28,2	32,2
C , пФ	125,2	123,8	150,1	122,8	120,0	138,1	147,1	142,4	146,1	141,1	131,0

Средняя величина емкости пьезотрансформаторного датчика равна 135,2 пФ, наибольшие отклонения от среднего имеют место для 3-го и 5-го датчиков, где достигают 11 %. Основной причиной отклонения от среднего является неодинаковая ширина зазора при отделении датчиков. После измерений в стержнях при сплошных электродах электродное покрытие было разделено узким разрезом, параллельным торцевой поверхности, с одной или обеих сторон на две и более области.

3. Результаты эксперимента.

Ниже приведены графики распределения внутренних механических напряжений в стержне до разделения электродного покрытия (рис. 3). Построены зависимости коэффициентов трансформации пьезотрансформаторных датчиков от координаты, полученные на частотах 10 001, 25 735, 76 035 и 124 665 Гц (кривые 1 – 4) для варианта, когда заземлен противостоящий датчикам основной электрод (рис. 3, а). Первая линия соответствует электростатической наводке от окружающего основного электрода, на который подается возбуждающее поле. Уровень наводки достигает при таком включении (66 – 71) % от входной разности потенциалов. Остальные три кривые получены на тех частотах, на которых достигается максимум выходного потенциала датчика № 1. На рис. 3, б приведены экспериментальные данные, полученные на частотах 10 048, 25 748, 76 112 и 124 530 Гц для случая, когда заземлен окружающий датчики основной электрод. Уровень электростатической наводки снизился в 4,2 – 4,7 раза и составляет (14 – 17) %.

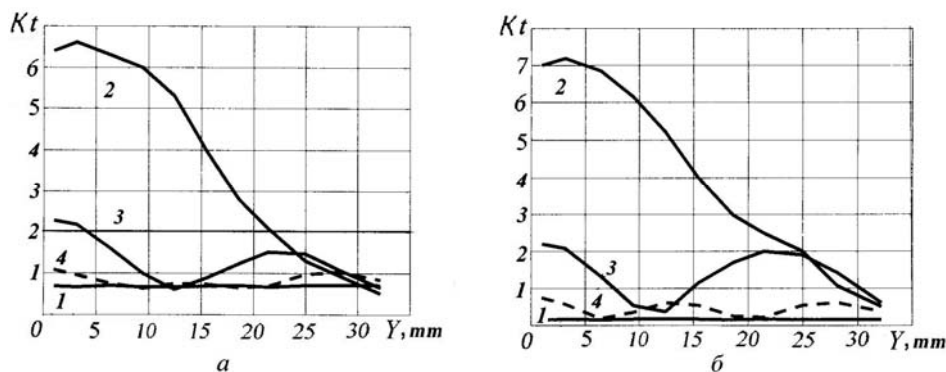


Рис. 3

Сопоставляя экспериментальные данные рис. 3 с расчетными графиками рис. 1, отметим следующее. Ход расчетных и экспериментальных кривых на первом продольном резонансе одинаков. На обертонах продольных колебаний места перехода через нуль теоретических линий совпадают с местами минимумов экспериментальных. Эта особенность имеет место всегда при пользовании МПТрД и обусловлена тем обстоятельством, что электронный вольтметр измеряет эффективное значение переменной разности потенциалов и на его фазу не реагирует. Соотношение амплитуд измеренных потенциалов центрального датчика на основном продольном резонансе и его первом обертоном, т.е. U_{L1} / U_{L3} для рис. 3, *а* равно 2,78, а для рис. 3, *б* – 3,18. Оба этих числа близки к предсказываемому расчетом числу 3. На втором обертоном отличие расчетных и экспериментальных данных более заметно: отношение U_{L1} / U_{L5} достигает 5,81 и 9,46. Здесь можно говорить уверенно лишь о тенденциях к снижению уровня внутренних напряжений с ростом номера обертона.

Изменение частот, на которых имеет место максимум коэффициента передачи датчика, при изменении схемы измерения весьма мало и составляет (0,05, 0,1 и 0,11) %, соответственно, на основной продольной моде и ее первых двух обертонах. Отношение частот максимумов коэффициентов передачи на обертонах к частоте основной продольной моды равно 2,95 и 4,84. Отличие от чисел 3 и 5 не превышает 2 и 4 %. Это означает, что пьезокерамический стержень с размерами $70 \times 8 \times 7$ мм при сплошных электродах хорошо описывается одномерной моделью.

После разделения электродов на четыре области выбором схемы их соединения удалось выделить обертона $L2$, не возбуждаемый при сплошных электродах (рис. 4, *а*). Для этой цели четыре электродные области были соединены противофазно, так что верхний электрод правой части стержня был соединен с нижним электродом левой части, а верхний электрод левой части стержня – с нижним электродом правой части. При таком включении направления возбуждающего электрического поля в левой и правой частях стержня противоположны. Нечетные моды колебаний $L1, L3, L5$ не наблюдаются, они подавлены, ибо наводимые слева и справа пьезозаряды взаимно вычитаются. Мода $L2$ при сплошных электродах отсутствует по этой же причине. Наводимые ею слева и справа от центра пьезозаряды равны по величине и противоположны по знаку. Они нивелируются сплошными электродами. Выделение пьезотрансформаторных датчиков в одной половине электродного покрытия нарушает симметрию наводимых зарядов и мода $L2$ становится наблюдаемой даже без разделения электродного покрытия на четыре части. При противофазных электродах максимум внутренних напряжений на этой моде имеет такую же амплитуду ($K_t = 6,5$), как на моде $L1$ при сплошных электродах. Графики рис. 4, *а* построены на частотах 20 063 (наводка), 25 706 (мода $L1$), 51 060 (мода $L2$) и 146 516 (мода $L6$) Гц. Уровень наводки в этом варианте достигает (63 – 69) % от возбуждающей разности потенциалов.

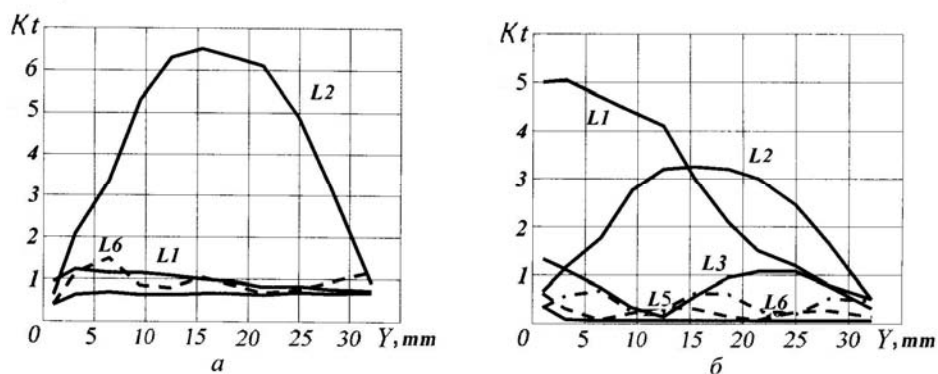


Рис. 4

Если половину стержня, в которой расположены пьезотрансформаторные датчики закоротить, т.е. соединить верхний электрод с нижним, система становится асимметричной и наблюдаются моды $L1 - L6$ (кроме $L4$) (рис. 4, *б*). Здесь приведены графики распределения коэффициентов трансформации ПТрД на частотах 20 008, 25 723,

51 075, 76 054, 124 590 и 147 028 Гц, соответственно, электростатические наводки и моды $L1$, $L2$, $L3$, $L5$, $L6$. Несмотря на заземление обоих основных электродов, наблюдается на измерительных электродах небольшой уровень потенциала, достигающий 6 % от входной разности потенциалов. В эксперименте проявляется как действие прямого пьезоэффекта, так и наведения на измерительную цепь (вход вольтметра) от различных паразитных источников. На частоте 100 646 была зарегистрирована мода $L4$, которая оказалась настолько слабой, что построить на ней распределение внутренних напряжений не удалось.

Об эффективности преобразования энергии на разных модах при сплошных (СП), закороченных (ЗК) и противофазных (ПФ) электродах можно судить по данным табл. 2, где приведены частоты f_m максимумов полной проводимости и КДКЭМС k_d^2 .

Таблица 2

Мода, схема	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	$L5$	$L6$
f_m СП	25 753	51 058	76 070	–	124 257	–
k_d^2 СП	0,0543	0,0021	0,0063	–	0,0094	–
f_m ЗК	25 715	51 084	76 046	100 460	124 127	146 438
k_d^2 ЗК	0,026	0,023	0,0037	0,0049	0,0068	0,0133
f_m ПФ	–	51 055	–	–	–	146 278
k_d^2 ПФ	–	0,041	–	–	–	0,0064

Из табл. 2 следует, что при сплошных электродах наибольшую эффективность имеет основная продольная мода, при противофазном включении – ее первый обертоном, а закорачивание электродов одной из областей сопровождается снижением КДКЭМС основной моды более, чем вдвое и увеличением этого параметра моды $L2$ до уровня моды $L1$.

4. АЧХ многоэлектродного пьезокерамического стержня.

Представим анализ результатов, полученных на пьезокерамических стержнях с разделенными электродами, часть из которых являются свободными. Такие электроды играют роль пьезотрансформаторных выходов. Их потенциалы определяются местоположением, площадью, схемой соединения, рабочей частотой и свойствами самой пьезокерамики. В простейшем случае пьезотрансформаторный выход всего один, как на рис. 2, а. Для одного из стержней с размерами $70 \times 8 \times 7,3$ мм амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выходного потенциала поблизости от первого (рис. 5, а) и второго (рис. 5, б) резонансных выбросов имеют вид остроконечных пиков (кривая 1), превышающих средний уровень в несколько раз. Прерывистая линия (кривая 2) – АЧХ выходного потенциала емкостного делителя, состоящего из специально подобранных керамических и слюдяных конденсаторов с емкостями 100,2 и 680 пФ.

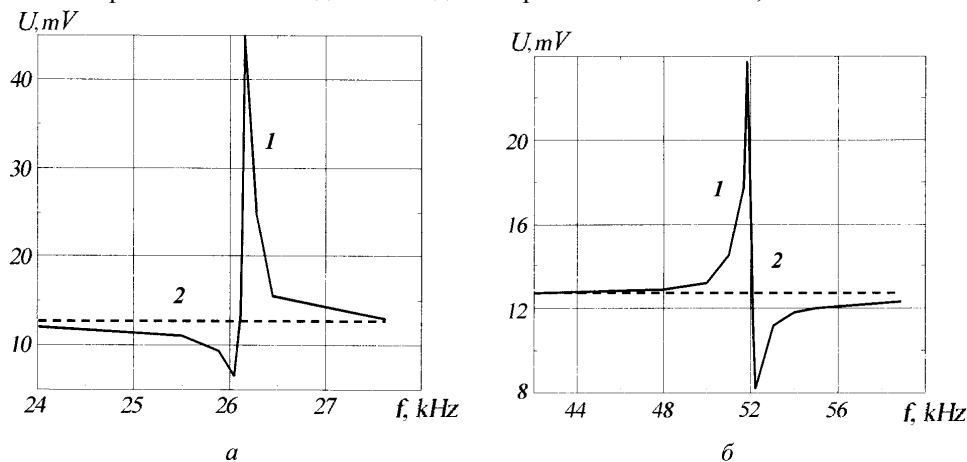


Рис. 5

В интервале от 27,5 до 48 кГц, т.е. между продольными резонансами уровень выходного потенциала остается постоянным и равным выходному потенциалу емкостного делителя. Взаимодействие зарядов, наводимых на выходном электроде пьезотрансформатора возбуждающим электрическим полем и прямым пьезоэффектом, имеет место на любой частоте. Вдали от резонансных частот пьезоэффект проявляется слабо и потенциал пьезотрансформаторного выхода почти полностью определяется коэффициентом передачи емкостного делителя, т.е. емкостной электростатической наводкой. По мере приближения к первому резонансу (рис. 5, *a*) начинает снижаться и на некоторой частоте достигает минимума, в несколько раз меньшего, чем средний уровень. Это значит, что между наводимыми (прямым пьезоэффектом и емкостным делителем) потенциалами существует сдвиг фаз, превышающий $\pi/2$. При удалении от первого резонансного максимума измеренный выходной потенциал снижается плавно до среднего уровня. Так же плавно происходит нарастание потенциала при подходе ко второму резонансу (рис. 5, *b*). Резкий минимум потенциала наблюдается после второго резонансного максимума.

АЧХ выходного потенциала пьезотрансформаторного выхода для вариантов включения электродов (согласно рис. 2, *г, е*) приведены на рис. 6. Уровень резонансных выбросов по сравнению с вариантом рис. 2, *a* в этих случаях резко снизился, а между резонансами по-прежнему преобладают емкостные наводки.

Отметим, что соотношение амплитуд потенциала, наводимого прямым пьезоэффектом и емкостным делителем, существенно зависит от величины остаточной поляризации образцов. Чем сильнее пьезоэффект, тем больше амплитуда резонансного выброса и тем дальше по частоте простирается его влияние и взаимодействие компонент потенциала. Эта проблема, однако, требует отдельного исследования.

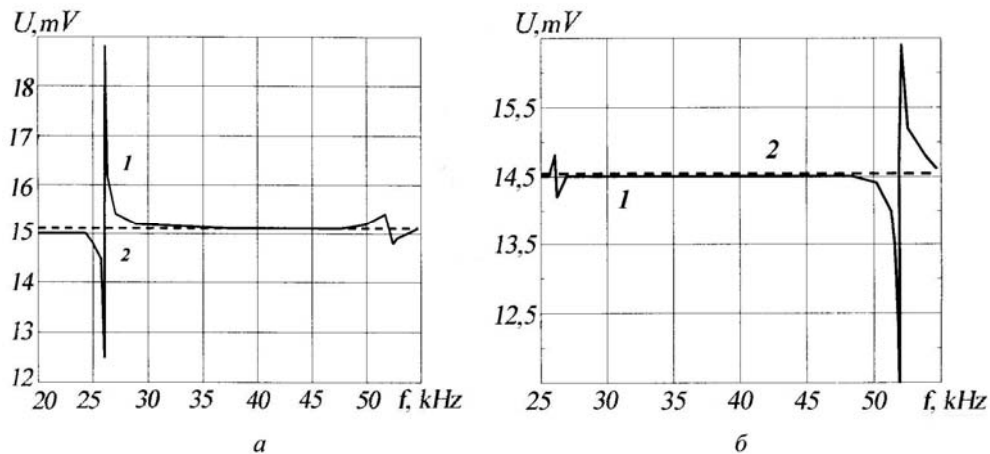


Рис. 6

Поведение выходного потенциала пьезотрансформатора по обеим сторонам от резонансных выбросов меняется на противоположное по фазе, когда изменяется полярность входного сигнала. Следует поменять местами входные электроды. При этом изменится также уровень электростатической наводки. Данные рис. 5 и 6 получены на частично деполяризованных образцах, в которых степень остаточной поляризации заметно снизилась в процессе естественного старения. Это привело к тому, что коэффициент трансформации по выходному электроду на продольных резонансах снизился. Отличается и уровень внутренних механических напряжений при одинаковой возбуждающей разности потенциалов на входе. Эта проблема также требует отдельного исследования.

Заключение.

На основе экспериментального исследования продольных колебаний пьезокерамических стержней с поперечной поляризацией и близким к квадратному поперечным сечением при разделенных на три или четыре участка электродах удалось установить следующее.

1. Распределение внутренних механических напряжений вдоль половины длины по гармоническому закону после разделения электродов сохраняется. Уровень напряжений на каждой отдельной моде колебаний зависит от схемы соединения разделенных электродов и обратно пропорционален резонансной частоте.

2. После противофазного включения четырех электродов мода L_2 , которая при сплошных электродах не наблюдается, достигает по КДКЭМС 41/54 от уровня моды L_1 для сплошных электродов.

3. Влияние межэлектродных емкостей в многоэлектродных пьезоэлектрических прямоугольных пластинах проявляется в фазовых сдвигах между электростатическими наводками и механическими компонентами потенциала, особенно заметных вблизи от резонансных выбросов.

4. Между резонансными выбросами уровень выходного потенциала любого пьезотрансформаторного выхода определяется исключительно коэффициентом передачи емкостного делителя, образованного междуэлектродными емкостями, и не зависит от проявлений пьезоэффекта.

РЕЗЮМЕ. Описано експериментальне дослідження п'єзокерамічних стрижнів із розділеними електродами. Показано що гармонічний характер розподілу внутрішніх механічних напружень після розділення електродів зберігається. Сталий рівень вихідної напруги між резонансами пояснюється ємнісним діленням.

1. Андреев Н.Н. О колебаниях кварцевой пластинки по толщине // Журнал технической физики. – 1932. – 2, вып. 1. – С. 119 – 124.
2. Глоzman И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия. – 1972. – 288 с.
3. ГОСТ 13927-74. Материалы пьезокерамические. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 10 с.
4. ГОСТ 12370-72. Материалы пьезокерамические, методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 28 с.
5. Карлаш В.Л., Улитко А.Ф. Метод исследования механических напряжений в колеблющихся пьезокерамических телах // Электричество. – 1976. – № 11. – С. 82 – 83.
6. Карлаш В.Л. Резонансные электромеханические колебания пьезоэлектрических пластин // Прикл. механика. – 2005. – 41, № 7. – С. 3 – 46.
7. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. – М.: Иностран. л-ра., 1949. – 718 с.
8. Катц Г.В. Магнитные и диэлектрические приборы. Ч.1. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 416 с.
9. Методы и приборы ультразвуковых исследований. – М.: Мир, 1966. – 592 с. – (Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. Т. 1, ч. А).
10. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.
11. Шарпов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю., Кисиль Т.Ю., Мусиенко М.П., Роттэ С.В., Чудаева И.Б. и др. Пьезоэлектрические преобразователи; Учеб. пособ. / Под ред. В.М.Шарпова. – Черкассы: ЧДТУ, 2004. – 435 с.
12. Холланд Р. Эквивалентная схема N -электродного пьезоэлектрического стержня // ТИИЭР. – 1966. – № 7. – С. 44 – 50.
13. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
14. Шульга М.О., Карлаш В.Л. Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин. – К.: Наук. думка, 2008. – 272 с.
15. Grigor'eva L.O. Electromechanical Nonstationary Thickness Vibrations of Piezoceramic Layer // Int. Appl. Mech. – 2010. – 46, N 3. – P. 264 – 268.
16. Karlash V.L. Evolution of the Planar Vibrations of a Rectangular Piezoceramic Plate as its Aspect Ratio is Changed // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, N 7. – P. 786 – 793.
17. Karlash V. Longitudinal and Lateral Vibrations of a Planar Piezoceramic Transformer // Japan J. Appl. Phys. – 2005. – 44, N 4 A. – P. 1852 – 1856.
18. Karlash V.L. Planar Electroelastic Vibrations of Piezoceramic Rectangular Plate and Half-disk // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, N 5. – P. 547 – 553.
19. Kirichok I.F., Karnaukhova T.V. Forced Axisymmetric Vibrations and Self-heating of Thermoviscoelastic Cylindrical Shells with Piezoelectric Actuators // Int. Appl. Mech. – 2011. – 46, N 10. – P. 1132 – 1139.
20. Sharapov V.M., Bondarenko Yu.Yu., Musiyenko M.P., Kisel T.Yu. About the methods of a linearization of a peak-frequency characteristics of piezoceramic transducers // Вісник ЧДТУ. – 2005. – № 3. С. 51 – 53.
21. Sharapov V.M., Ignatenko N.Yu., Musiyenko M.P. The methods of the piezoceramic transducers of physical quantities synthesis // Вісник ЧДТУ. – 2005. – № 3. С. 54 – 57.
22. Sharapov V.M., Musiyenko M.P., Filimonov S.A. The investigation of frequency characteristics of piezotransducers with double circuit negative feedback // Вісник ЧДТУ. Спецвипуск. – 2006. – С. 262 – 264.
23. Sharapov V. M., Tuz V.V., Musiyenko M.P. The research of piezoelectric converters with two planimetric feedback with charge amplifiers // Вісник ЧДТУ. Спецвипуск. – 2006. – С. 281 – 283.
24. Van der Veen B. The equivalent network of a piezoelectric crystal with divided electrodes // Phillips Res. Report – 1956. – 11. – P.66 – 79.

Поступила 26.12.2011

Утверждена в печать 22.11.2012