

4. Campbell J. J., Jones W. R. A method for estimating optimal crystal cuts and propagation directions for excitation of piezoelectric surface waves. IEEE Transaction on Sonic and Ultrasonic, 1968, SU-15, 4, 209-217.

Минский радиотехнический институт

Поступила
27 апреля 1979 г.
После переработки
12 сентября 1979 г.

УДК 534.232

ОБ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ В ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ

Б. С. Аронов

Известно, что существует качественное различие в электромеханическом преобразовании энергии при колебаниях пьезоэлектрических стержней, возбуждаемых на основе поперечного или продольного пьезоэффекта. Это различие приводит, в частности, к появлению в эквивалентной электромеханической схеме стержневого преобразователя для случая продольного пьезоэффекта отрицательной емкости на электрической стороне или дополнительной податливости на механической [1, 2].

Если рассматривать электромеханическое преобразование с позиций энергетического метода [3], это различие приобретает ясный физический смысл, и удается легко установить условия, при которых оно практически исчезает. Покажем это на примере преобразования энергии при продольных колебаниях тонких пьезокерамических стержней с различным расположением электродов (фиг. 1) в случае, когда энергия подводится к стержню только с электрической стороны.

Будем считать, как и в работе [2], что размеры поперечного сечения стержня малы по сравнению с его длиной, так что в случае, представленном на фиг. 1, а, отличны от нуля только механические напряжения σ_1 , а в случае фиг. 1, б — σ_3 (индекс 3 при символах механического напряжения, деформации, электрического поля и индукции соответствует направлению, совпадающему с направлением поляризации пьезоэлемента; на фиг. 1, а это направление оси z , а на фиг. 1, б — направление оси x ; направление оси x на фиг. 1, а обозначается индексом 1).

Приведенное в статье [3] общее выражение для «способной к обращению» энергии $W_{\text{эл. мех}}$, характеризующей электромеханическое преобразование, в рассматриваемых нами вариантах конструкций может быть представлено в виде

$$(1) \quad W_{\text{эл. мех}} = \frac{bd_{31}}{s_{11}^E} u \int_0^l \varepsilon_1(x) dx = \frac{bt}{2s_{11}^E} \int_0^l \varepsilon_1^2(x) dx -$$

для случая, соответствующего фиг. 1, а, и

$$(2) \quad W_{\text{эл. мех}} = \frac{bt}{l} \frac{d_{33}}{s_{33}^E} u \int_0^l \varepsilon_3(x) dx = \frac{bt}{2s_{33}^E} \int_0^l \varepsilon_3^2(x) dx +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2 bt}{\varepsilon_{33} \varepsilon_3 (s_{33}^E)^2} \left\{ \int_0^l \varepsilon_3^2(x) dx - \frac{1}{l} \left[\int_0^l \varepsilon_3(x) dx \right]^2 \right\} -$$

для случая, соответствующего фиг. 1, б.

В выражениях (1) и (2) l , b и t — соответственно длина, ширина и толщина стержней, $\varepsilon_1(x)$ и $\varepsilon_3(x)$ — деформации стержней, возникающие при подаче на электроды напряжения u ; d_{31} и d_{33} — пьезоэлектрические модули; s_{11}^E , s_{33}^E — постоянные упругой податливости при неизменном электрическом поле; $\varepsilon_{33} \varepsilon_3 = \varepsilon_{33}^\sigma (1 - k_{33}^2)$, ε_{33}^σ — диэлектрическая проницаемость при постоянном механическом напряжении, $k_{33} = d_{33} / (\varepsilon_{33}^\sigma s_{33}^E)^{1/2}$ — коэффициент электромеханической связи пьезокерамики. Соответ-

ственно $d_{33}^2 / \varepsilon_{33} \varepsilon_3 (s_{33}^E)^2 = k_{33}^2 / (1 - k_{33}^2)$. Члены вида $\frac{bt}{2s_{ii}^E} \int_0^l \varepsilon_i^2(x) dx = W_{\text{мех}}^E$ в пра-

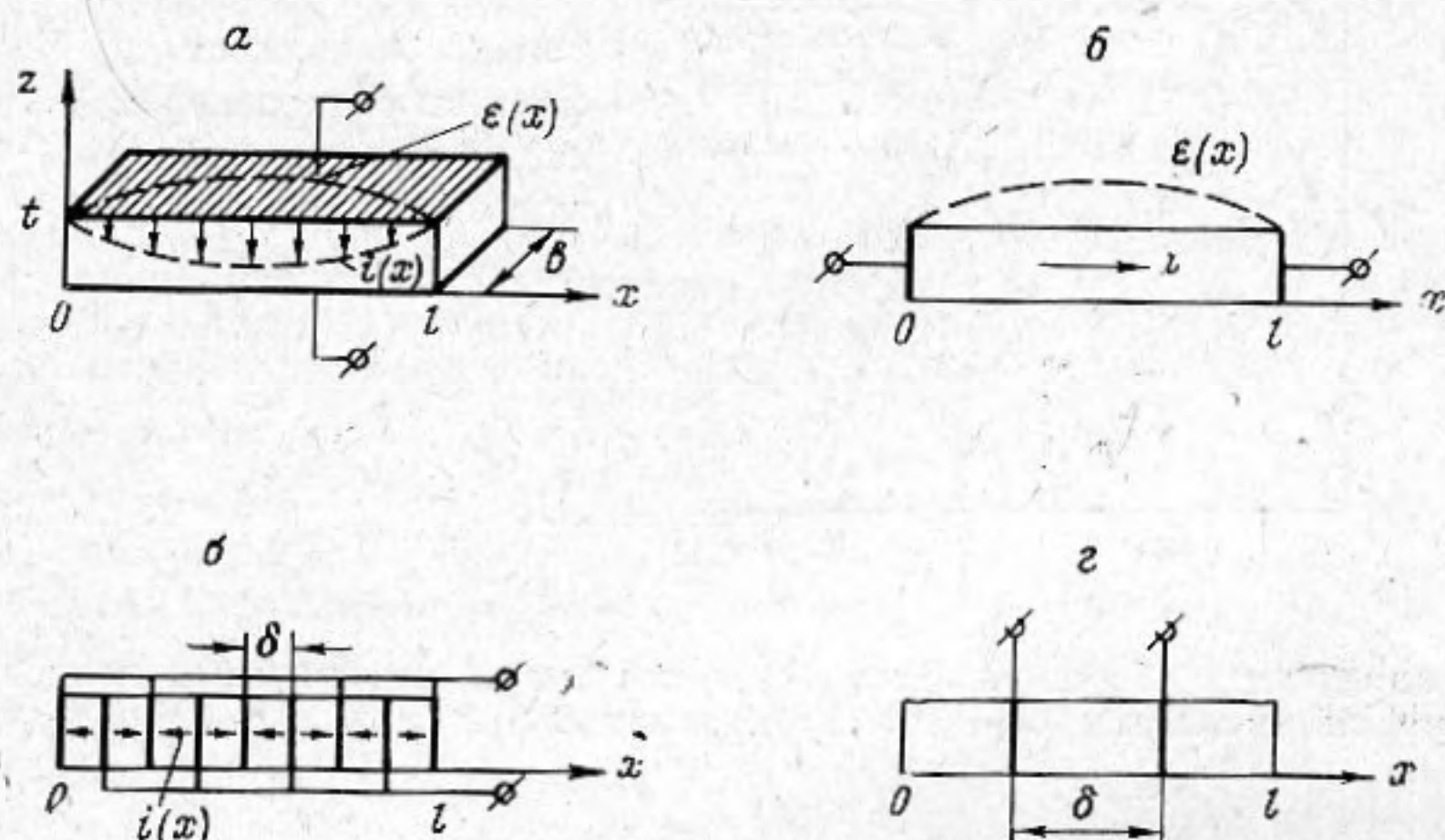
вой части выражений (1) и (2) можно трактовать как механическую энергию, которую в результате электромеханического преобразования приобрел стержень, если его постоянная упругой податливости равна s_{ii}^E .

Видно, что в случае продольного пьезоэффекта, соответствующем фиг. 1, б, в отличие от случая поперечного пьезоэффекта преобразованная энергия не может быть представлена обычным выражением для механической энергии с использованием постоянной упругой податливости s_{33}^E . С учетом того что $s_{33}^E(1-k_{33}^2) = s_{33}^D$ (s_{33}^D — постоянная упругой податливости при индукции, равной нулю), выражение (2) можно преобразовать к виду

$$(3) \quad W_{\text{эл. мех}} = \frac{bt}{2s_{33}^D} \int_0^l \epsilon_3^2(x) dx - \frac{1}{2} \frac{bt}{l} \frac{k_{33}^2}{s_{33}^D} \left[\int_0^l \epsilon_3(x) dx \right]^2,$$

и в этом случае преобразованную энергию нельзя представить просто как механическую, вычисленную с использованием постоянной s_{33}^D .

Нетрудно убедиться, что второй член в правой части выражения (3) соответствует энергии, которая связана с отрицательной податливостью или отрицательной



Фиг. 1. Пьезокерамические стержни с различным расположением электродов: а — электрическое поле перпендикулярно длине стержня; б — г — электрическое поле параллельно длине стержня

емкостью, введенными в эквивалентную схему стержневого преобразователя в работах [1, 2].

В варианте конструкции секционированного стержневого преобразователя, соответствующем фиг. 1, в, для $W_{\text{эл. мех}}$ справедливо выражение (2), в котором второе слагаемое правой части (в [3] оно обозначено ΔW) заменено на

$$(4) \quad \Delta W_N = \frac{bt}{2s_{33}^E} \frac{k_{33}^2}{1-k_{33}^2} \left\{ \int_0^l \epsilon_3^2(x) dx - \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^N \left[\int_{\delta(i-1)}^{\delta i} \epsilon_3(x) dx \right]^2 \right\},$$

где N — число секций, $\delta = l/N$.

Как видно из соотношения (4), $\lim_{N \rightarrow \infty} \Delta W_N = 0$, и, следовательно, при большом количестве секций электромеханическое преобразование качественно происходит так же, как и в случае поперечного пьезоэффекта.

Чтобы физически объяснить различия в способе преобразования энергии в механическую форму для рассматриваемых случаев, мысленно разобьем стержень на малые участки Δx_i в направлении деформации и будем рассматривать эти участки как элементарные преобразователи энергии.

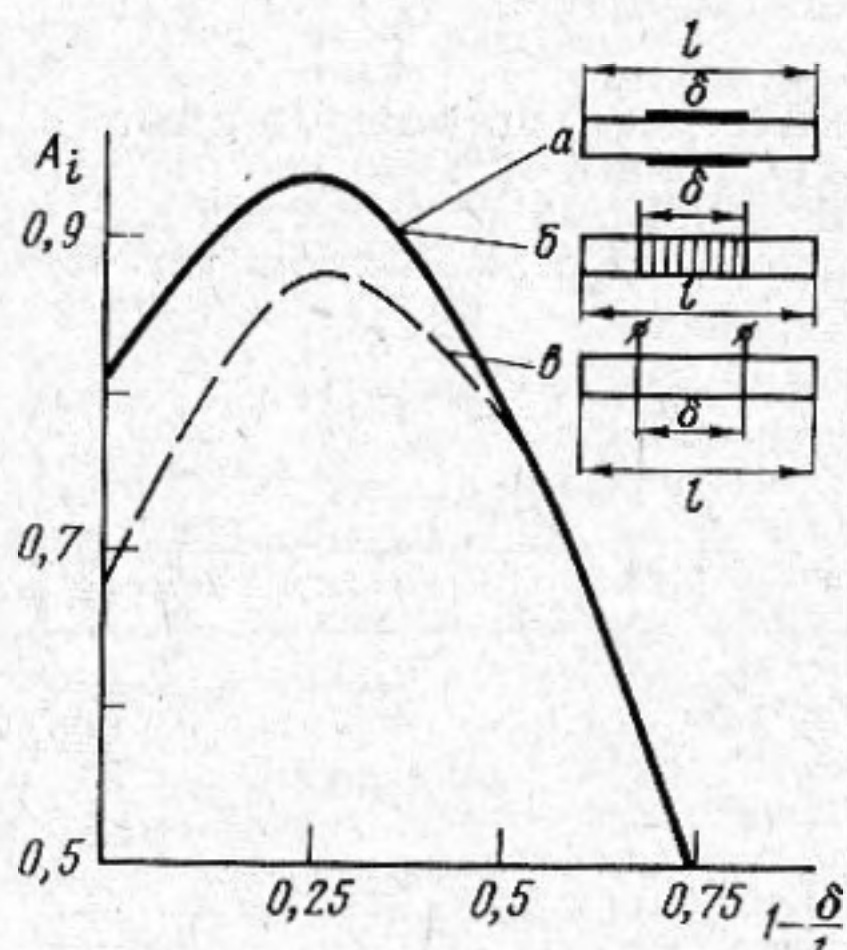
В случае поперечного пьезоэффекта (фиг. 1, а) через различные участки при одной и той же напряженности электрического поля по длине стержня протекают рабочие токи, которые в точности соответствуют величинам деформации участков: $i_p(\Delta x_i) \sim d_{31} \epsilon_1(x_i) / s_{11}^E$ (ток i_p назван рабочим в отличие от полного тока, который включает в себя и несвязанную с электромеханическим преобразованием составляющую, пропорциональную $\epsilon_{33}^E E_3$). В результате потребление элементарными участками преобразуемой электрической энергии соответствует их вкладу в электромеханическое преобразование, поскольку и $W_{\text{эл. мех}}(\Delta x_i) \sim \epsilon_1(x_i)$.

В случае продольного пьезоэффекта (фиг. 1, б) при постоянной по длине стержня напряженности внешнего электрического поля через все участки проте-

кает общий рабочий ток. В результате участки потребляют одинаковую энергию независимо от величины их вклада в электромеханическое преобразование и для получения той же деформации, что и в предыдущем случае, здесь требуется большее количество электрической энергии.

При секционировании (фиг. 1, в) электроды внутри преобразователя осуществляют принудительное распределение токов в соответствии со средними для каждой секции значениями деформаций. В пределе, соответствующем бесконечному числу секций, преобразование энергии происходит качественно так же, как и при поперечном пьезоэффекте.

Для выяснения природы различия в балансе энергий при электромеханическом преобразовании на основе продольного пьезоэффекта в несекционированном и секционированном стержнях может быть полезна следующая аналогия.



Фиг. 2. Зависимость эффективности электромеханического преобразования от расположения электродов

Если определить общую энергию W_1 в системе N независимых конденсаторов с одинаковыми емкостями $C = \epsilon_{33} \epsilon_3 bt / \Delta x$ и различными зарядами $q_i = d_{33} \epsilon_3 (x_i) bt / s_{33}^E$

$$W_1 = \frac{1}{2C} \sum_{i=1}^N q_i^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33} \epsilon_3 (s_{33}^E)^2} bt \sum_{i=1}^N \epsilon_3^2(x_i) \Delta x$$

(в секционированном преобразователе через элементарные участки $\Delta x = l/N$ с одинаковой емкостью протекают разные рабочие токи, не зависящие друг от друга), а потом определить энергию W_2 в системе тех же конденсаторов, соединенных последовательно

$$W_2 = \frac{1}{2C} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \right)^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33} \epsilon_3 (s_{33}^E)^2} bt \frac{1}{l} \left[\sum_{i=1}^N \epsilon_3(x_i) \Delta x \right]^2$$

(в несекционированном преобразователе элементарные участки соединены последовательно и через них протекает усредненный рабочий ток), то $\lim_{N \rightarrow \infty} (W_1 - W_2) = \Delta W$

как раз представляет величину, на которую отличается преобразованная энергия в случае секционированного и несекционированного преобразователей.

Отметим, что для наиболее часто встречающихся на практике распределений деформаций определяемая выражением (4) величина ΔW_N становится пренебрежимо малой уже при не слишком больших значениях N . Так, если $\epsilon_3(x) \sim \sin i\pi x/l$, из формулы (4) легко получить соотношение

$$(5) \quad \Delta W_N = \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} W_{\text{мех}}^E \left[1 - \alpha \frac{\sin^2 i\pi/2N}{(i\pi/2N)^2} \right],$$

где $\alpha=1$, при $N > i$; $\alpha=2$, когда i/N — нечетное число. Из формулы (5) найдем, что $\Delta W_N / W^E < 0,02$ при $i=1$ и $k_{33} \leq 0,7$ уже при $N \geq 6$. Эта оценка дает основание полагать, что в тех случаях, когда пьезокерамическое тело секционировано в направлении силовых линий рабочего электрического поля и секции соединены параллельно, величиной ΔW_N можно пренебречь, если количество секций на отрезке, равном половине деформации, превышает 6.

Из приведенных рассуждений о природе величины ΔW следует, что эта величина должна уменьшаться при отключении участков стержня, близких к торцам, на кото-

рых имеет место наибольшее несоответствие между потреблением энергии от источника и вкладом в электромеханическое преобразование.

Действительно, если считать, что пьезоактивным является лишь участок длиной δ в середине стержня (фиг. 1, а), то выражение для второго члена в правой части формулы (2), где интегрирование теперь должно быть выполнено в пределах от $(l-\delta)/2$ до $(l+\delta)/2$, при $\epsilon_3(x) \sim \sin \pi x/l$ приобретет вид

$$(6) \quad \Delta W_{\delta} = W_{\text{мех}}^E \frac{k_{33}^2}{1-k_{33}^2} \frac{\delta}{l} \left[1 + \frac{\sin \pi \delta/l}{\pi \delta/l} - 2 \frac{\sin^2 \pi \delta/2l}{(\pi \delta/2l)^2} \right],$$

откуда следует, что $\Delta W_{\delta}/W_{\text{мех}}^E < 0,02$ при $\delta/l \leq 0,55$ и $k_{33} \leq 0,7$. Этот случай представляет интерес в связи с расчетом составных стержневых преобразователей, у которых торцевые участки изготовлены не из пьезокерамики, а из пассивного материала.

Выводы относительно характера электромеханического преобразования в рассмотренных вариантах расположения электродов в пьезокерамических стержнях иллюстрируют графики, приведенные на фиг. 2. На графиках представлена величина A_i , связанная с эффективным коэффициентом связи $k_{\text{эфф}}$ для пьезокерамического стержня соотношением

$$k_{\text{эфф}}^2 = \frac{A_i k_{3i}^2}{1 - (1 - A_i) k_{3i}^2}.$$

На фиг. 2 видно, что величины $k_{\text{эфф}}$ в вариантах конструкций, соответствующих случаям а, б и в при $\delta/l < 0,55$ ведут себя одинаково. Таким образом, можно сделать вывод, что в ряде практически важных случаев электромеханическое преобразование при продольном пьезоэффекте происходит качественно так же, как и при поперечном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гутин Л. Я. Пьезоэлектрические излучатели и приемники. Ж. техн. физ., 1946, 16, 1, 39-51.
2. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. В кн. Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, т. 1, ч. А. М., «Мир», 1966, 265-310.
3. Аронов Б. С. Об энергетическом методе расчета пьезокерамических электроакустических преобразователей. Вопросы судостроения. Сер. общетехнич., 1978, вып. 31, 48-59.

Поступила
14 августа 1978 г.
Окончательный вариант
8 августа 1979 г.

УДК 535.379

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕКТРА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ВОДЫ

С. М. Горский, В. А. Клеми, В. В. Чернов

Экспериментальные исследования спектра ультразвуковой флуоресценции жидкостей показали, что спектр непрерывен в интервале длин волн 300-800 нм [1-3]. Было установлено также наличие в спектре относительно интенсивной ультрафиолетовой компоненты излучения [4, 5]. В работах [3, 6] отмечалось, что спектр ультразвуковой флуоресценции близок по форме к спектру излучения абсолютно черного тела. Измерения [1-7] проводились, как правило, в ультразвуковых полях большой интенсивности, вызывающих в жидкости кавитацию, в результате которой, по мнению ряда исследователей, происходит нагревание растворенных в жидкости газов [8]. Заметим, что спектры флуоресценции измерялись фотографическими методами при временах экспозиции от 48 до 100 ч, т. е. в условиях, когда не представляется возможным поддерживать постоянными все параметры эксперимента. Исследования, проведенные в сильных ультразвуковых полях при использовании чувствительных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), работающих в режиме счета фотонов, показали наличие в спектре свечения участков повышенной интенсивности, за которые ответственны, по-видимому, растворенные в воде вещества [9, 10].