

УДК 534, 539.376

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНОГО СТЕРЖНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

С. М. ДЯЧЕНКО*, И. К. СЕНЧЕНКОВ**

*Институт проблем физики и биофизики НАН Украины, Киев

**Институт механики НАН Украины им. С. П. Тимошенко, Киев.

Получено 25.11.1999 ◊ Пересмотрено 18.02.2000

Исследована зависимость электрических и механических характеристик составных стержневых пьезоэлектрических преобразователей от положения пьезоактивного элемента, имеющего постоянную толщину. Задача формулируется в рамках стержневой теории и решается численно методом ортогональной прогонки. Рассматриваются четыре варианта преобразователя, различающихся материалами накладок. Проведен их сравнительный анализ относительно различных критериев. Даны практические рекомендации по использованию таких преобразователей в различных технологических применениях.

Досліджено залежність електричних і механічних характеристик складеного стержньового п'єзоелектричного перетворювача від розташування п'єзоактивного елемента, який має постійну товщину. Задача формулюється в межах стержневої теорії і розв'язується чисельним методом ортогональної прогонки. Розглядаються чотири варіанти перетворювача, які відрізняються матеріалами накладок. Проведено їх порівняльний аналіз відносно різних критеріїв. Надані практичні рекомендації стосовно використання таких перетворювачів у різних технологічних застосуваннях.

A dependence of electrical and mechanical characteristics of rod-like composite piezoelectrical transducer on position of piezoactive element of constant thickness is investigated. The problem is formulated in the frame of rod theory and is solved numerically by the method of discrete orthogonolization. Four versions of transducer are considered, which are distinguished by materials of the back and output sections. Comparative analysis of mentioned transducers with respect to various criterions is carried out and practical recommendations on application are outlined.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые колебания находят широкое применение в технике, технологии, медицине и т. п. При этом во многих технологических приложениях соответствующие акустические системы функционируют на частотах $18 \div 60$ кГц, а их мощность достигает 6 кВт. Источником колебаний, а, следовательно, обязательным элементом ультразвуковых колебательных систем являются электро-механические преобразователи. Исключение составляют лишь весьма специфические и ограниченные по своим возможностям ультразвуковые излучающие системы, содержащие гидро- и аэродинамические преобразователи. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили стержневые пьезокерамические преобразователи типа Ланжевена [1].

На рис. 1 показана базовая конструкция стержневого пьезокерамического преобразователя, состоящего из пьезоактивного элемента 1, находящегося между отражающей 2 и излучающей 3 накладками, которые, в общем случае, могут иметь переменное сечение. Накладки выполняют следующие основные функции: уменьшение резонанс-

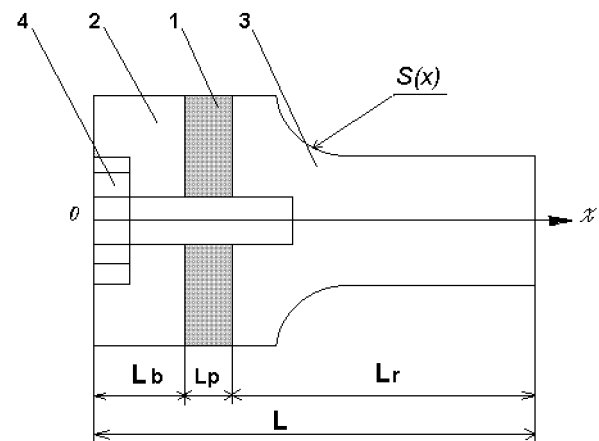


Рис. 1. Схема полуволнового электромеханического преобразователя

ной частоты и электрического сопротивления, согласование акустических импедансов преобразователя и нагрузки, обеспечение прочности преобразователя. Целостность пакета, акустический контакт на поверхностях сопряжения элементов,

а также усталостная прочность пьезокерамики обеспечивается стягивающим болтом 4.

Расчету и проектированию этих устройств посвящены многочисленные исследования [2–6]. Вместе с тем, несмотря на простоту конструкции, отсутствует единый подход к их расчету. Разнообразие требований, предъявляемых к колебательным системам, обуславливает разнообразие режимов работы преобразователей и порождает широкий ассортимент устройств с разными критериями оценки их эффективности [6, 7].

До недавних пор основным математическим аппаратом, используемым для расчета преобразователей, были метод эквивалентных электрических схем и метод электрических шестиполусников [8–10]. Такой подход обеспечивал быструю и эффективную оценку электрических и энергетических характеристик как самого преобразователя, так и акустической системы с учетом нагрузки. Однако использование метода эквивалентных электрических схем ограничивает возможности получения и анализа информации о распределениях механических параметров: перемещений, напряжений и деформаций. Он оказывается недостаточным и при анализе термического состояния преобразователя.

Значительными потенциальными возможностями для более полного учета совокупности термо- и электромеханических факторов обладают методы механики сплошных сред [2, 3, 11]. Анализ поведения преобразователя в рамках математических моделей механики сплошных сред в значительной мере основывается на использовании численных методов. Среди них для расчета конкретных устройств широкое распространение получил метод конечных элементов [10, 12–14]. Главной целью этих расчетов является определение конструкции преобразователя, обеспечивающей реализацию ряда технических требований, таких как заданные резонансная частота, КПД, и т. п. Возможным является также учет ограничений по механическим и термическим предельным параметрам.

Характеристики преобразователя зависят от размеров, компоновки и материалов конструктивных элементов. В работах [1, 11, 15] изучалось влияние материала накладок. Использование материалов с разными собственными акустическими импедансами позволяет повысить амплитуду перемещения на поверхности излучающей по сравнению с амплитудой на поверхности отражающей накладки. Показаны возможности уменьшения размеров и веса низкочастотных преобразователей за счет применения активных отражающих накладок [16].

В работах [17, 18] рассматривалось влияние состава пьезокерамики, а также объема и местоположения пьезоэлемента относительно серединной плоскости преобразователя на КПД и чувствительность по полю в режиме излучения при нагружении на воду. По результатам исследований был сделан вывод о том, что лучшим вариантом (в рамках упомянутых критериев) есть устройство с постоянным сечением и центрально-симметричным расположением керамики, занимающей 50–60 % длины преобразователя. Однако в работе [19] сделан несколько иной вывод – о нецелесообразности размещения керамики в центральной части преобразователя. Вместо этого предложено размещение ее приблизительно в середине отрезков, соединяющих узлы и пучности стоячих волн в преобразователе. Такая компоновка уменьшает сопротивление потерь, увеличивает КПД и повышает надежность работы устройства при нагружении на воду. Результаты указанных исследований обобщены в работе [20].

На КПД, прочность, входное сопротивление и стабильность работы преобразователя влияют такие конструктивные факторы как толщина и расположение пьезокерамического элемента, тип керамики. Наиболее тяжелые условия по прочности создаются при расположении пьезоэлемента в узле колебаний – плоскости максимальных механических напряжений. Оптимальным является вариант конструкции, в которой пьезокерамика размещена между узловой плоскостью и отражающим торцом. При этом достигаются сбалансированные условия по прочности, КПД и стабильности работы преобразователя. Еще одним фактором, определяющим положение керамики, является необходимость крепления преобразователя в технологической установке. При центральном положении керамики узловая плоскость, в которой осуществляется крепление, проходит через керамику, что не всегда удобно с точки зрения механической и электрической развязки.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных расчету преобразователей, ряд вопросов в области их конструирования изучен недостаточно. В частности, отсутствие количественных оценок зависимости кинематических, динамических и энергетических характеристик от конструктивных факторов зачастую оставляет разработчику только экспериментальный путь создания каждого конкретного образца преобразователя. Кроме того, отметим, что в упомянутых работах рассматривалось ограниченное количество параметров, таких как коэффициент электромеханической связи, чувствительность излучения по

полю в жидкости, КПД. Это объясняется тем, что их авторами рассматривалась рабочая среда с мало меняющимися в стационарных процессах эксплуатации параметрами (обычно, вода). Поэтому исследуемых характеристик было достаточно для описания работы преобразователя. Однако для технологических процессов, в которых нагрузка меняет свои параметры во времени (ультразвуковая сварка полимеров и металлов, механическая обработка материалов), число исследуемых характеристик необходимо увеличить. В частности, при ультразвуковой сварке возникает необходимость в прямой оценке перемещения на выходном (излучающем) торце преобразователя. По-прежнему актуальная в силовом преобразователе проблема усталостной прочности керамики обуславливает необходимость оценки напряженного состояния пьезоэлемента. Электрическое сопротивление через механизм диссипативного разогрева также может существенно влиять на свойства керамики и частотные характеристики преобразователя, существенно ограничивая его электрическую мощность [11].

Указанные обстоятельства делают необходимым проведение углубленных исследований влияния положения керамики и материала накладок на силовые и резистивные параметры преобразователя. Настоящая статья посвящена исследованию этого вопроса.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 показан полуволновой преобразователь длины L с переменной площадью сечения $S(x)$, содержащий отражающую накладку $0 < x < L_b$, пьезокерамический слой $L_b < x < L_b + L_p$ и излучающую накладку $L_b + L_p < x < L_b + L_p + L_r$. Предполагается, что выполнено соотношение $\max_x \sqrt{S(x)} \ll L$. На поверхностях сопряжения пьезокерамического слоя и накладок имеет место идеальный механический контакт. Наличие стягивающего болта в данной работе не учитывается. Преобразователь возбуждается изменяющейся по гармоническому закону разностью электрических потенциалов $\varphi = \varphi_0 e^{i\omega t}$, которая приложена к пьезокерамическому элементу. Материалы компонент преобразователя предполагаются линейно вязкоупругими.

Задача формулируется в рамках элементарной теории стержней, в которой учитывается изменение параметров (тензоров, векторов) только вдоль одной координаты x (вдоль оси преобразователя). Постановка задачи включает уравнение движения

элементов преобразователя

$$\frac{d}{dx}(\tilde{\sigma}S(x)) + S(x)\omega^2\rho(x)\tilde{u} = 0, \quad (1)$$

определяющие уравнения для пьезоактивного материала

$$\tilde{\sigma} = \tilde{c}_p \frac{d\tilde{u}}{dx} - \tilde{e}_p \tilde{E}, \quad (2)$$

$$\tilde{D} = \tilde{\varepsilon}_p^* \tilde{E} + \tilde{e}_p \frac{d\tilde{u}}{dx}$$

и для материала накладок

$$\tilde{\sigma}_b = \tilde{c}_b \frac{d\tilde{u}}{dx}, \quad \tilde{\sigma}_r = \tilde{c}_r \frac{d\tilde{u}}{dx}, \quad (3)$$

а также уравнения электростатики

$$\frac{d\tilde{D}}{dx} = 0, \quad \tilde{E} = -\frac{d\tilde{\varphi}}{dx}. \quad (4)$$

Механические и электрические граничные условия принимаются в виде

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma} &= 0, & x &= 0, L, \\ \tilde{\varphi} &= 0, & x &= L_b, \\ \tilde{\varphi} &= \varphi_0, & x &= L_b + L_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку материалы накладок и пьезокерамики предполагаются линейно-вязкоупругими, то, в соответствии с принципом упруго-вязкоупругой аналогии, при гармонических колебаниях [2] все величины, входящие в соотношения (1)–(5), рассматриваются как комплексные. В частности, это справедливо для $\tilde{\sigma}$, \tilde{u} – амплитуд механического напряжения и перемещения ($\tilde{\sigma} = \sigma' + i\sigma''$, $\tilde{u} = u' + iu''$); \tilde{c}_p , \tilde{c}_b , \tilde{c}_r – комплексных модулей Юнга керамики, а также материалов отражающей и излучающей накладок ($\tilde{c}_p = c'_p + ic''_p$, $\tilde{c}_b = c'_b + ic''_b$, $\tilde{c}_r = c'_r + ic''_r$); \tilde{e}_p , $\tilde{\varepsilon}_p^*$ – пьезоэлектрической и диэлектрической констант ($\tilde{e}_p = e'_p + ie''_p$, $\tilde{\varepsilon}_p^* = \varepsilon'_p - i\varepsilon''_p$); \tilde{E} , \tilde{D} – электрической напряженности и индукции.

При численной реализации задачи удобнее, во-первых, иметь единообразные определяющие уравнения для составных частей преобразователя и, во-вторых, задавать граничные условия не во внутренних точках интервала, как это представлено для потенциала в выражении (5), а на его концах $x=0, L$. Для практического решения этих вопросов определяющие уравнения (3) для материала накладок формально принимались нами в виде (2)

$$\tilde{\sigma} = \tilde{c}_{b,r} \frac{d\tilde{u}}{dx} - \tilde{e}_{b,r} \tilde{E},$$

$$\tilde{D} = \tilde{\varepsilon}_{b,r}^* \tilde{E} + \tilde{e}_{b,r} \frac{d\tilde{u}}{dx}.$$

Поскольку накладки обычно изготавливаются из пьезопассивных материалов, которые к тому же являются хорошими проводниками электричества, в этих уравнениях принято, что $\tilde{\epsilon}_{b,r}=0$, $\tilde{\epsilon}_{b,r}^*=1$ Ф/м. Второе из этих условий отвечает высокой электропроводности материала накладок и позволяет переформулировать граничные условия в требуемой форме:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi} &= 0, & x &= 0, \\ \tilde{\varphi} &= \varphi_0 & x &= L. \end{aligned} \quad (6)$$

При введении безразмерных характеристик в качестве нормирующих используются параметры пьезоэлектрического элемента:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_k &= \rho_k / \rho_p, \\ \tilde{c}_k &= \tilde{c}_k / c'_p, \\ \tilde{\epsilon}_k &= \tilde{\epsilon}_k / \epsilon'_p, \\ \tilde{\tilde{c}}_k &= \tilde{\tilde{c}}_k / \tilde{\tilde{c}}'_p, \\ \hat{S}_k &= S_k / S_p, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\xi = x/L_p, \quad \xi_0 = L/L_p,$$

где $k = b, p, r$.

Безразмерные полевые величины Y_j , $j = 1, \dots, 8$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\varphi}}{\varphi_0} &= Y_1 + iY_2, \\ \frac{\tilde{\sigma}\hat{S}}{e'_p} &= Y_3 + iY_4, \\ \frac{\tilde{u}}{L_p} &= Y_5 + iY_6, \\ \frac{\tilde{D}\hat{S}}{e'_p} &= Y_7 + iY_8, \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом обозначений (7) и (8) система уравнений и граничных условий (1)–(6) после разделения на вещественную и мнимую части сводится к системе восьми обыкновенных дифференциальных

уравнений с вещественными переменными

$$\begin{aligned} \frac{dY_1}{d\xi} &= q'_1 Y_3 - q''_1 Y_4 - q'_2 Y_7 + q''_2 Y_8, \\ \frac{dY_2}{d\xi} &= q''_1 Y_3 + q'_1 Y_4 - q''_2 Y_7 - q'_2 Y_8, \\ \frac{dY_3}{d\xi} &= -\lambda \rho S Y_5, \\ \frac{dY_4}{d\xi} &= -\lambda \rho S Y_6, \\ \frac{dY_5}{d\xi} &= g'_1 Y_3 - g''_1 Y_4 + g'_2 Y_7 - g''_2 Y_8, \\ \frac{dY_6}{d\xi} &= g''_1 Y_3 + g'_1 Y_4 + g''_2 Y_7 + g'_2 Y_8, \\ \frac{dY_7}{d\xi} &= 0, \\ \frac{dY_8}{d\xi} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

дополненной граничными условиями

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0, & Y_2 &= 0, & Y_3 &= 0, & Y_4 &= 0, & \xi &= 0, \\ Y_1 &= 1, & Y_2 &= 0, & Y_3 &= 0, & Y_4 &= 0, & \xi &= \xi_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь

$$\lambda = \frac{\rho_p (\omega L_p)^2}{c'_p}; \quad \beta = \frac{e'_p \varphi_0}{L_p c'_p}; \quad \gamma = \frac{\epsilon'_p \varphi_0}{L_p e'_p};$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}_1 &= \frac{\gamma \tilde{\tilde{c}}}{\hat{S}(\gamma \tilde{\tilde{c}} + \beta \tilde{\tilde{c}}^2)}; & \tilde{g}_2 &= \frac{\beta \tilde{\tilde{c}}}{\hat{S}(\gamma \tilde{\tilde{c}} + \beta \tilde{\tilde{c}}^2)}; \\ \tilde{q}_1 &= \frac{\tilde{\tilde{c}}}{\hat{S}(\gamma \tilde{\tilde{c}} + \beta \tilde{\tilde{c}}^2)}; & \tilde{q}_2 &= \frac{\tilde{\tilde{c}}}{\hat{S}(\gamma \tilde{\tilde{c}} + \beta \tilde{\tilde{c}}^2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Необходимо отметить, что последние два уравнения в системе разрешающих уравнений (9), описывающие электрическую индукцию, в каждом конкретном случае могут быть интегрированы. Однако в рамках исследуемой схемы численной реализации задачи их целесообразно сохранить в виде, представленном выше. Это позволяет рассматривать постановку задачи и формулировку граничных условий в самом общем виде.

2. АЛГОРИТМ И ЦЕЛЬ РАСЧЕТОВ

Система дифференциальных уравнений (9) с граничными условиями (10) решается численным методом ортогональной прогонки [21]. Расчеты

проводятся следующим образом. Для каждого варианта, определяемого положением пьезоактивного элемента постоянной толщины, для одной фиксированной частоты резонанса первой стержневой моды колебаний решается задача определения геометрической конфигурации преобразователя. Для этой цели используется “упругий” аналог системы (1)–(6). Затем для найденной геометрии решается задача электровязкоупругости. При расчете учитываются механические, пьезоэлектрические и диэлектрические потери во всех элементах преобразователя.

Целью расчетов является определение влияния местоположения пьезокерамического элемента преобразователя, накладки которого изготовлены из материалов разных типов, на следующие параметры:

- активная (вещественная) составляющая электрического сопротивления на резонансной частоте (R),
- модуль амплитуды механического перемещения на торце излучающей накладки (u_{\max}),
- потребляемая электрическая мощность (P),
- коэффициент эффективности возбуждения преобразователя (χ),
- нормированная амплитуда механического напряжения в пьезокерамическом элементе (σ_u),
- коэффициент усиления по перемещению (K_u),
- динамический коэффициент электромеханической связи (K_f).

Эти параметры определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 R &= \operatorname{Re} [\varphi_0 (Y_8 - jY_7) / (\omega S_p \epsilon'_p (Y_7^2 + Y_8^2))], \\
 u_{\max} &= (L_p (Y_5^2 + Y_6^2)^{0.5})_{\xi=L}, \\
 P &= \varphi_0^2 / R, \\
 \chi &= u_{\max}^2 / P, \\
 \sigma_u &= c'_p S_0 (Y_3^2 + Y_4^2)^{0.5} / u_{\max}, \\
 K_u &= ((Y_5^2 + Y_6^2)^{0.5})_{\xi=L} / ((Y_5^2 + Y_6^2)^{0.5})_{\xi=0}, \\
 K_f &= ((f_p^2 - f_s^2) / f_p^2)^{0.5},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где f_s – частота динамического (последовательно) резонанса; f_p – частота параллельного резонанса – антирезонансная частота [3].

В работе рассмотрены различные варианты стержневого пьезоэлектрического преобразователя постоянного кругового сечения диаметра d , различие между которыми определяется комбинациями различных материалов пассивных накладок. Для каждого варианта преобразователя искомые параметры рассчитаны как функции безразмерной координаты центра слоя пьезокерамики $\xi_k = x_k / L$, имеющего постоянную толщину L_p , которая изменяется от значения $\xi_k = 0.01$ до $\xi_k = 0.55$.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В расчетах были приняты следующие значения параметров: частота возбуждения $f = \omega / 2\pi i = 20$ кГц, диаметр $d = 38 \cdot 10^{-3}$ м, толщина пьезокерамического диска $L_p = 8 \cdot 10^{-3}$ м. В зависимости от вида пассивных накладок рассмотрены четыре варианта преобразователей, изготовленных из следующих материалов:

- излучающая и отражающая накладки из стали марки Ст45 (ниже С–С);
- излучающая накладка из алюминиевого сплава Д16Т (дюралюминий), отражающая накладка из стали марки Ст45 (ниже С–Д);
- излучающая и отражающая накладки из алюминиевого сплава Д16Т (ниже Д–Д);
- излучающая и отражающая накладки из титанового сплава ВТ3-1 (ниже Т–Т).

Предполагалось, что во всех преобразователях пьезокерамический элемент изготовлен из материала ЦТС-24М. Ниже приведены значения физических характеристик материалов, использованные при расчетах:

Ст45 –	$\rho = 0.78 \cdot 10^4$ кг/м ³ ,
$c'_n = 0.209 \cdot 10^{12}$ Па,	$c''_n / c'_n = 0.4 \cdot 10^{-3}$;
Д16Т –	$\rho = 0.268 \cdot 10^4$ кг/м ³ ,
$c'_n = 0.724 \cdot 10^{11}$ Па,	$c''_n / c'_n = 0.3 \cdot 10^{-3}$;
ВТ3-1 –	$\rho = 0.45 \cdot 10^4$ кг/м ³ ,
$c_n = 0.121 \cdot 10^{12}$ Па,	$c''_n / c'_n = 0.15 \cdot 10^{-3}$;
ЦТС-24М –	$\rho = 0.75 \cdot 10^4$ кг/м ³ ,
$c_p = 0.109 \cdot 10^{12}$ Па,	$c''_p / c'_p = 0.162 \cdot 10^{-1}$,
$\epsilon'_p = 0.559 \cdot 10^{-8}$ Ф/м,	$\epsilon''_p / \epsilon'_p = 0.244 \cdot 10^{-1}$,
$e'_p = 15.0$ Кл/м ² ,	$e''_p / e'_p = 0.73 \cdot 10^{-2}$.

Здесь n может принимать значения b и r .

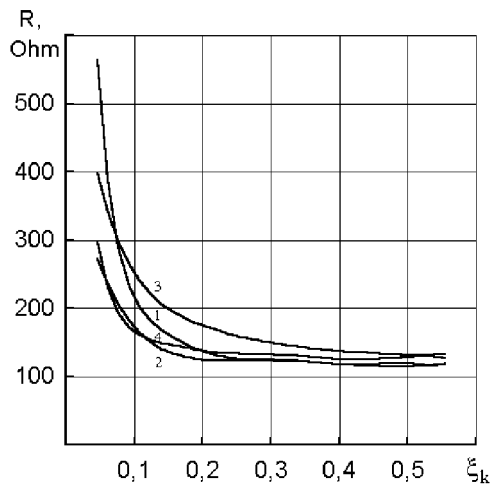


Рис. 2. Зависимость величины активного электрического сопротивления от положения пьезоактивного элемента

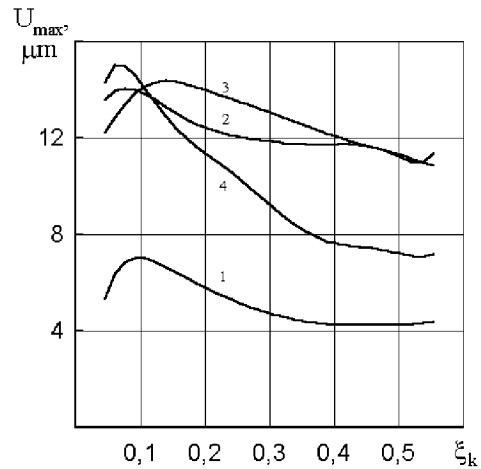


Рис. 3. Зависимость амплитуды перемещения излучающего торца преобразователя от положения пьезоактивного элемента

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 2–8, на которых по оси абсцисс отложена безразмерная координата середины пьезо-керамического элемента, а цифры соответствуют номерам указанных вариантов преобразователя.

На рис. 2 приведены кривые изменения активной (вещественной) составляющей электрического сопротивления преобразователя. Видно, что для стержневого преобразователя характерна монотонно убывающая зависимость сопротивления от координаты ξ_k . Существенные количественные отличия имеют место вплоть до координаты $\xi_k \approx 0.3$. При этом скорость убывания сопротивления для варианта С–С значительно выше, чем у остальных. Наибольшее сопротивление для $\xi_k \geq 0.08$ имеет преобразователь с дюралюминиевыми накладками. При $\xi_k \geq 0.3$ с точки зрения электрического сопротивления все рассматриваемые варианты примерно равноценны.

На рис. 3 приведены кривые изменения амплитуды перемещения торца излучающей накладки преобразователя. Все кривые характеризуются наличием максимума в окрестности точки $\xi_k = 0.1$. В этой области значения перемещений для вариантов С–Д, Д–Д, Т–Т примерно одинаковы, тогда как для варианта С–С они почти вдвое ниже. В области значений $\xi_k > 0.1$ кривые являются монотонно убывающими. С точки зрения достижения максимальной амплитуды наилучшими являются варианты С–Д и Д–Д.

На рис. 4 представлены зависимости эффектив-

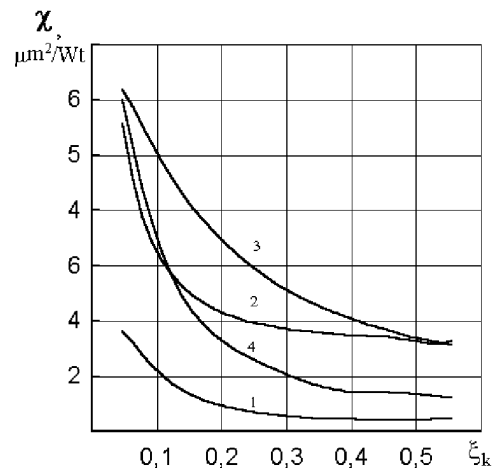


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности возбуждения преобразователя от положения пьезоактивного элемента

ности возбуждения преобразователя, которая характеризует затраты электрической мощности (в Вт) для достижения механического перемещения излучающего торца преобразователя в один микрон. Для всех видов рассматриваемых вариантов изменение кривых носит одинаковый характер: эффективность возбуждения уменьшается при смещении керамики к срединной плоскости преобразователя. По отношению к принятому критерию вариант Д–Д является предпочтительным. При этом эффективность возрастает по мере уменьшения толщины отражающей накладки.

На рис. 5 представлены зависимости электриче-

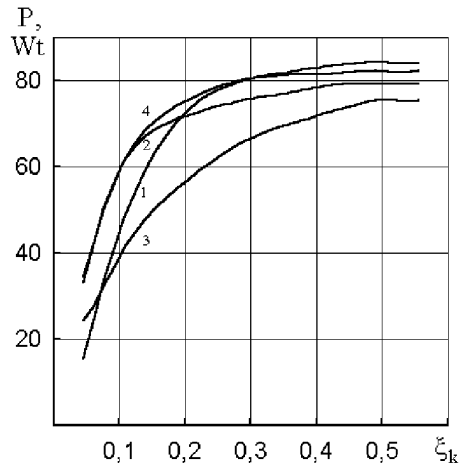


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности преобразователя от положения пьезоактивного элемента

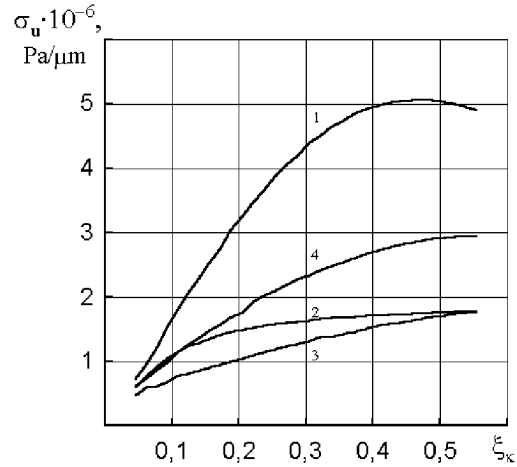


Рис. 6. Зависимость значения нормированной амплитуды механических напряжений в пьезоактивном слое от положения самого элемента

ской мощности, потребляемой преобразователем, от координаты керамики ξ_k . Потребляемая мощность для всех вариантов преобразователей возрастает с увеличением ξ_k . Это объясняется тем, что при постоянном напряжении источника питания мощность возрастает с уменьшением активного электрического сопротивления преобразователя. С точки зрения теплового критерия выгодна малая мощность. Из сопоставления рис. 3 и рис. 5 следует преимущество варианта Д–Д, обеспечивающего максимальное перемещение торца излучающей накладки преобразователя при минимальной рассеиваемой мощности.

На рис. 6 представлены кривые зависимости нормированной амплитуды механического напряжения в пьезоэлементе преобразователя от координаты керамики ξ_k . Амплитуда механического напряжения в керамическом элементе нормируется на амплитуду механического перемещения на выходном торце преобразователя. При росте ξ_k напряжения монотонно возрастают с различными скоростями (максимальной – для варианта С–С, минимальной – для варианта Д–Д). Последний вариант является минимально напряженным преобразователем на единицу перемещения.

На рис. 7 представлены кривые зависимости коэффициента усиления перемещения преобразователей от координаты керамики ξ_k . В данном случае коэффициент усиления определяется соотношением акустических сопротивлений составных частей преобразователя. Очевидно, что вне конкуренции находится вариант С–Д в силу наиболее существенных различий акустических сопро-

тивлений накладок. Для вариантов С–С, Д–Д, Т–Т различия в зависимостях коэффициента усиления от координаты ξ_k – незначительны.

На рис. 8 представлены зависимости динамического коэффициента электромеханической связи преобразователя от координаты керамики ξ_k . Он характеризует эффективность преобразования энергии и добротность преобразователя на данном резонансе. Здесь наблюдается монотонное возрастание коэффициента при росте ξ_k . Максимальное значение коэффициента наблюдается у варианта С–С, а минимальное – у варианта Д–Д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов можно сделать ряд выводов от том, что положение пьезокерамического элемента и тип материала пассивных накладок оказывают существенное влияние на кинематические, динамические и энергетические характеристики преобразователя. В частности, можно отметить следующее.

1. Центральное размещение пьезоэлектрического элемента не является оптимальным в смысле КПД, так как при этом потребляемая электрическая мощность достигает максимального значения без заметного выигрыша в амплитуде механического перемещения излучающего торца. При центральном размещении пьезоэлектрического элемента, несмотря на минимальное электрическое сопротивление и максимальный коэффициент электромехани-

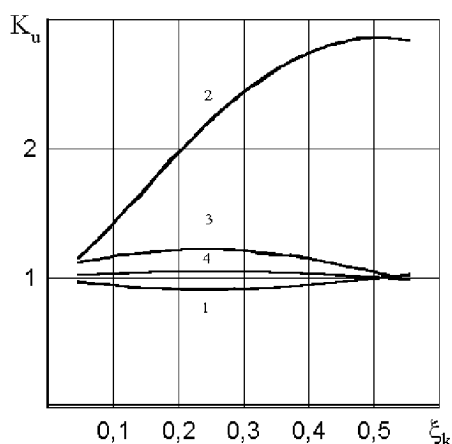


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления перемещений от положения пьезоактивного элемента

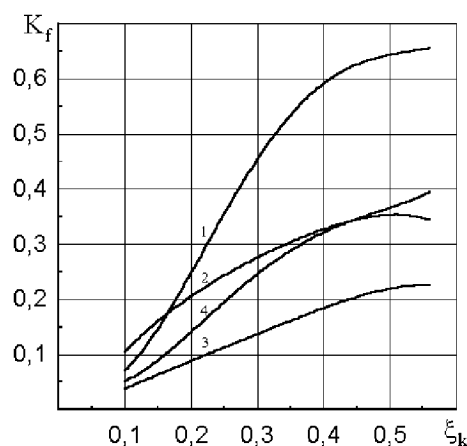


Рис. 8. Зависимость динамического коэффициента электромеханической связи от положения пьезоактивного элемента

ческой связи, характерно наличие максимума амплитуды динамической составляющей механического напряжения, приходящегося на область пьезокерамики, а также наличие минимума эффективности возбуждения.

- В зависимости от технологических целей необходим дифференцированный подход к конструированию преобразователя. Так, при проектировании преобразователей амплитуды перемещения целесообразно располагать пьезокерамический элемент ближе к торцу отражающей накладки, так как при этом наблюдается рост амплитуды перемещения торца излучающей накладки (см. рис. 3) и коэффициента эффективности возбуждения (см. рис. 4). Положительным фактором является и уменьшение амплитуды динамического напряжения в пьезоэлектрическом элементе (см. рис. 6), а также уменьшение потребляемой электрической мощности (см. рис. 5). К недостаткам данного конструктивного решения следует отнести увеличение электрического сопротивления (см. рис. 2) и уменьшение коэффициента электромеханической связи (см. рис. 8), что, в свою очередь, эквивалентно увеличению механической добротности преобразователя. Для преобразователей мощности (применяющихся, например, для ультразвуковой сварки полимеров) целесообразно смещать пьезокерамический элемент от торца отражающей накладки к середине преобразователя. Положительными факторами

при этом конструктивном решении являются уменьшение электрического сопротивления (см. рис. 2) и увеличение коэффициента электромеханической связи (см. рис. 8).

- Выбор материала накладок влияет на характеристики преобразователя. В частности, для получения высоких амплитуд перемещения торца излучающей накладки, целесообразно использовать комбинацию сталь-дюралюминий или дюралюминий-дюралюминий. Минимальную динамическую нагрузку на керамику обеспечивает вариант дюралюминий-дюралюминий. Эффективность возбуждения преобразователя для варианта дюралюминий-дюралюминий существенно выше, чем для варианта сталь-сталь. Динамический коэффициент связи преобразователя для варианта дюралюминий-дюралюминий существенно ниже, чем для варианта сталь-сталь.

- Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностран. лит., 1957. – 723 с.
- Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
- Ганопольский В. В., Касаткин Б. А., Легуша Ф. Ф., Прудько Н. И., Пугачев С. И. Пьезо-керамические преобразователи. Справочник. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
- Ленк А. Электромеханические системы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 472 с.
- Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 272 с.

6. Aronov B. S. Application of the Tonpitz design for optimizing parameters of rod transducer // *Acustica*.– 85.– 1999.– P. 213.
7. Голямина И. П. О критериях выбора материалов и режима работы для ультразвуковых преобразователей // *Тр. Акуст. инст.*– 1970.– N 10.– С. 45–55.
8. Гутин Л. Я. Пьезоэлектрические излучатели и приемники // *ЖТФ*.– 1946.– 16, N 1.– С. 39–54.
9. Мэзон У. Физическая акустика. Том 1. Часть А.– М.: Мир, 1966.– 585 с.
10. Харкевич А. А. К расчету пьезоэлектрических вибраторов // *ЖТФ*.– 1945.– 15, N 4–5.– С. 212–222.
11. Dominguez R., Ranz C. Sandwich transducer, simplified mathematical model // *Acustica*.– 1973.– 29.– P. 156–167.
12. Ando E., Kagawa Y. Finite-element simulation of transient heat response in ultrasonic transducers // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Contr.*– 1992.– 39, N 3.– С. 432–440.
13. Карнаухов В. Г., Козлов В. И., Михайленко В. В. Метод конечных элементов в связанных задачах термоэлектроупругости // *Прикл. мех.*– 1989.– 25, N 2.– С. 19–28.
14. Карнаухов В. Г., Сенченков И. К., Михайленко В. В., Дяченко С. М. Численное моделирование вибронагрева и тепловых напряжений в стержневом пьезопреобразователе типа Ланжевена // *Прикл. мех.*– 1996.– 32, N 3.– С. 80–85.
15. Rich S. Improvements in or relating to electromechanical transducer system // *Brit. pat.*– 868.784.– 1957.
16. Grinchenko V. T., Vovk I. V., Oliylik V. N. On the method of control of acoustical and mechanical properties of the Tonpitz transducer // *Proc. 2-nd Europ. Conf. Underwater Acoust. Vol. 1.*– Brussels–Luxembourg: EC, 1994.– P. 591–596.
17. Вавер В. Р. Теоретические исследования составных стержневых пьезокерамических преобразователей // *Вопросы судостроения, сер. Акустика*.– 1976.– N 7.– С. 52–61.
18. Вавер В. Р., Скородумов С. Н., Экнадиосянц О. К. Составные стержневые пьезокерамические преобразователи // *Вопросы судостроения, сер. Акустика*.– 1976.– N 7.– С. 62–69.
19. Макаров Л. О. Исследование пакетных резонансных ультразвуковых преобразователей на основе пьезокерамики. Автореф. дис. канд. техн. наук.– М.: Акуст. инст, 1968.– 24 с.
20. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов.– М.: Машиностроение, 1980.– 237 с.
21. Шинкарь А. И., Голуб Г. П., Семенова В. В. Решение линейных краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // *Алгоритмы и программы решения задач механики твердого деформированного тела*.– Киев, 1976.– С. 144–156.