

Ростовский военный институт ракетных войск  
E-mail: [chita1983@rambler.ru](mailto:chita1983@rambler.ru)

Рева Василий Юрьевич  
Ростовский военный институт ракетных войск  
E-mail: [vasja0108@mail.ru](mailto:vasja0108@mail.ru)

Zolotukhin Vladimir Filippovich  
Rostov Military Institute of Rocket Troops  
E-mail: [chita1983@rambler.ru](mailto:chita1983@rambler.ru)  
24/50, M, Nagibina street, Rostov-on-Don, 344037, Russia  
Phone: +7(9054392081)

Zakharov Andrey Aleksandrovich  
Rostov Military Institute of Rocket Troops  
E-mail: [chita1983@rambler.ru](mailto:chita1983@rambler.ru)

Reva Vasiluy Yurievich  
Rostov Military Institute of Rocket Troops  
E-mail: [vasja0108@mail.ru](mailto:vasja0108@mail.ru)

УДК 681.586.773

**А.В. Мартыненко**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗГИБНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

*Исследована конструкция пьезоэлектрического изгибного преобразователя. В результате расчетов методом конечных элементов найден наилучший конструкционный материал для преобразователя. Материал позволяет увеличить эффективность преобразователя. Критерием оптимизации является эффективный коэффициент электромеханической связи.*

*Пьезоэлектрический преобразователь.*

**A.V. Martynenko**

#### **RESEARCH OF EFFICIENCY BEND PIEZOELECTRIC CONVERTER**

*The design bend piezoelectric converter is researched. As a result of calculations by a method of final elements the best material for a design of the converter is found. The material allows increasing efficiency of the converter. Criterion of optimization is the effective factor of electromechanical connection.*

*Piezoelectric converter.*

В настоящее время для контроля и прогнозирования состояния промышленного оборудования применяются пьезоэлектрические изгибные преобразователи. Такие преобразователи обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, широкими динамическими и частотными диапазонами, относительно малыми размерами, высокой надежностью и не требуют источников питания [1]. Для достижения и улучшения существующих характеристик пьезоэлектрических преобразователей необходим комплексный подход к проектированию и разработке. Классический подход достаточно полно изложен в [2].

Современный подход должен содержать два основных момента:

1. Решение задач математического моделирования.

## 2. Исследования свойств конструкционных материалов.

Целью данной работы является оптимизация изгибного преобразователя для поиска наиболее эффективного некерамического конструкционного материала, по критерию эффективного коэффициента электромеханической связи  $K_{эф}$ . Для моделирования пьезоэлектрического изгибного преобразователя используется метод конечных элементов (МКЭ). Достаточно полное и последовательное изложение МКЭ представлено в [3], а сам метод наиболее успешно реализован в программном пакете конечно-элементного моделирования ANSYS.

Рассмотрим конструкцию исследуемого преобразователя (рис. 1). Преобразователь состоит из трех слоев, двух активных и одного пассивного слоя. В качестве активного слоя выступает керамика ЦТС-83Г, а в качестве пассивного – некерамический материал. Изначально материалом пассивного слоя выступает та же керамика, что и для активного слоя. Электроды покрывают все горизонтальные поверхности преобразователя в соответствии с рис. 1.

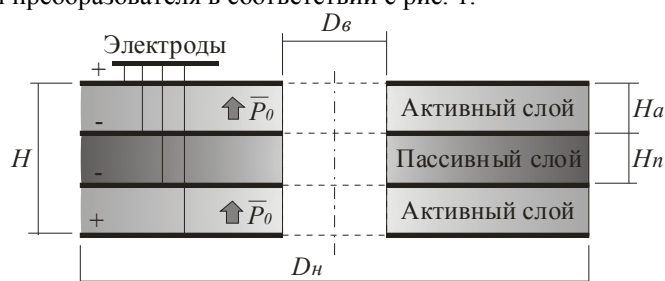


Рис. 1. Пьезоэлектрический изгибный преобразователь

Керамика поляризована по продольной оси преобразователя, о чем говорит направление вектора остаточной поляризованности  $P_0$  (рис. 1). В математической модели используются следующие конечные элементы:

- 1) для пьезокерамики элемент PLANE13, степени свободы – узловые смещения, температура и электрический потенциал;
- 2) для упругой среды PLANE42, степени свободы – узловые смещения.

Граничные условия формулируются в следующем виде:

- механические граничные условия:

- 1) преобразователь жестко закреплен по внутреннему диаметру,
- 2) прочие поверхности свободны от закреплений;

- электрические граничные условия:

- 1) условие короткого замыкания (частота резонанса),
- 2) условие холостого хода (частота антирезонанса).

Кроме граничных условий, на объект наложен ряд ограничений:

- 1) общая высота  $H=2,1$  мм, внутренний диаметр  $Dв=6$  мм, внешний диаметр  $Dн=20$  мм – строго фиксированы;
- 2) изменение толщины пассивного слоя  $Hn$  проводится в диапазоне от 0,2 до 1,9 мм;
- 3) увеличение пассивного слоя  $Hn$  на 0,1 мм приводит к уменьшению активного слоя  $Ha$  на 0,1 мм.

Эффективный коэффициент электромеханической связи вычисляется путем определения частот резонанса и антирезонанса. Исходя из этого для исследования задействован модальный анализ. Собственные частоты определяются в диапазоне от 100 до 1МГц. Так как преобразователь состоит из керамики, а она, в свою очередь, тоже характеризуется коэффициентом электромеханической связи, то это необходимо учитывать и, следовательно, нормировать коэффициент связи пьезо-

керамического элемента (ПКЭ) по коэффициенту связи материала  $K_p$ . Формулы для определения эффективного коэффициента электромеханической связи и коэффициента связи материала приведены ниже:

$$K_{эф} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f_a^2}}; \quad K_p = \sqrt{1 - \frac{\frac{S}{\epsilon_{33}} c_{33}^D}{T \frac{E}{\epsilon_{33} c_{33}}}}$$

где  $f_p$  – частота резонанса;  $f_a$  – частота антирезонанса;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость для диэлектрического смещения и электрического поля ( $S$  – в условиях постоянной деформации;  $T$  – в условиях постоянного давления);  $c$  – модуль упругости для давления и деформации ( $D$  – в условиях постоянного электрического поля;  $E$  – в условиях постоянного электрического смещения). Представленные формулы более подробно описаны в [4]. Результаты модального анализа являются оптимальными и представлены в табл. 1 ( $f_p$  – частота резонанса;  $f_a$  – частота антирезонанса;  $K_{эф}$  – эффективный коэффициент электромеханической связи;  $K_{эф}/K_p$  – нормированный эффективный коэффициент электромеханической связи;  $2H_a/H_n$  – отношение высоты активного слоя к пассивному).

Таблица 1

Материал	$f_p$ , Гц	$f_a$ , Гц	$K_{эф}$	$K_{эф}/K_p$	$2H_a/H_n$
Стеклотекстолит	22206	22912	0,24635	0,65816	1,6
Керамика	21028	21792	0,26251	0,70134	2
Сплав титана	23152	24028	0,26762	0,71499	1,6
Сталь	21976	22802	0,26664	0,70134	2

Цифра 2 в выражении  $2H_a/H_n$  говорит о том, что в конструкции исследуемого преобразователя 2 активных слоя из пьезокерамики.

Ранее оговаривалось, что эффективный коэффициент связи необходимо нормировать. Если не проводить нормировку, учитывается преобразование энергии, связанное только с формой пьезокерамического преобразователя. Необходимость в более высоком значении эффективного коэффициента связи объясняется тем, что чем выше его значение, тем большая часть механической энергии преобразуется в электрическую. Исходя из табличных данных, можно сказать, что для более эффективного преобразования энергии наилучшим материалом для пассивного слоя являются металлы. На рис. 2 представлена зависимость нормированного эффективного коэффициента электромеханической связи от толщины пассивного слоя.

Из рис. 2 видно, что для увеличения эффективности конструкции необходим пассивный слой из сплава титана в оптимальном соотношении с пьезокерамикой активного слоя.

В отличие от классического подхода, рассмотренного в [2], в котором рассматривалась оптимизация керамических конструкций, математический подход позволяет повысить эффективность двухслойной конструкции путем внедрения третьего слоя, удовлетворяющего выше описанным условиям. Это является главным отличием данных подходов.

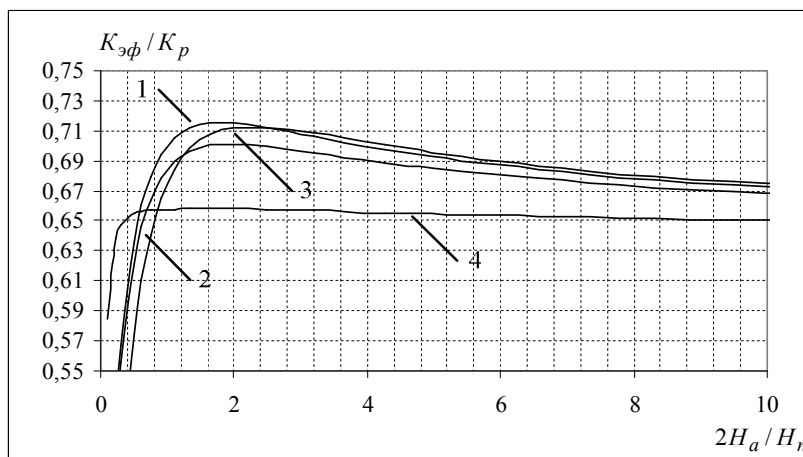


Рис. 2. Зависимость нормированного эффективного коэффициента электромеханической связи от толщины пассивного слоя:

1 – сплав титана, 2 – керамика, 3 – сталь, 4 – стеклотекстолит

В результате проведения модального анализа пьезоэлектрического изгибного преобразователя можно сделать следующий вывод:

Исследуемая многослойная конструкция при заданных условиях и ограничениях будет иметь наибольшую эффективность:

- 1) при пассивном слое из металла (сплав титана, сталь);
- 2) при оптимальном соотношении активного и пассивного слоев.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Богун М.В.* Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2006. – 115 с.
2. *Аронов Б.С.* Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
3. *Наседкин А.В.* Конечно-элементное моделирование преобразователей в ANSYS. – Ростов-на-Дону, 2008. – 90 с.
4. ОСТ 11 0444-87. Пьезокерамические материалы. Технические условия.

Мартыненко Александр Васильевич

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»

E-mail: [2004284@aaanet.ru](mailto:2004284@aaanet.ru)

344090, Ростов-на-Дону, ул. Мельчакова, 10

Тел.: +7(8632)696991

Martynenko Aleksandr Vasilievich

Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»

E-mail: [2004284@aaanet.ru](mailto:2004284@aaanet.ru)

10, Melchikova street, Rostov-on-Don, 344090

Phone: +7(8632)696991