

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА»

П.И. ПАХОМОВ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ЛАБОРАТОРНЫМ И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Бишкек 2001

П 12

Пахомов П.И.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. Методическое пособие к лабораторным и практическим занятиям /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2001. – 40 с.

Методическое руководство предназначено для студентов специальности 070600 «Физические процессы горного производства».

Рецензент: д.т.н., проф. *Ш.А. Мамбетов*

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

1. Основные положения

Пьезоэлектрический преобразователь электрической энергии в механическую энергию колебаний представляет собой устройство, состоящее из активного элемента, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, электродов и, в ряде случаев, держателей.

Пьезоэлектрические преобразователи в настоящее время находят применение в ультразвуковой и звуковой технике в диапазоне частот от $8 \div 10$ кГц до $3 \div 6$ МГц.

Активные пьезоэлементы в настоящее время изготавливаются как из природных, так и из искусственных материалов, обладающих пьезоэлектрическими или электрострикционными свойствами. Пьезоэлектрическими свойствами обладают многие природные кристаллы, из которых практическое значение имеют кристаллы кварца и турмалина. Из искусственных пьезоматериалов следует отметить фосфориокислый алюминий, кристаллы которого получают путем выращивания в ваннах с насыщенным водным раствором соли.

Кристаллы сегнетоэлектриков, важнейшими из которых являются сегнетова соль и керамика титана бария и цирконата – титана свинца (ЦТС), обладают электрострикцией. Электрострикционный эффект характеризуется изменением размеров сегнетоэлектрических кристаллов под действием электрического поля. По физической сущности это явление более близко к магнитострикционному, поскольку оно связано с динамикой сегнетоэлектрической доменной структуры. Однако в отличие от магнитострикционных материалов, в сегнетоэлектриках при помещении их в сильное электрическое поле сохраняется остаточная поляризация и остаточная деформация, что видно из рис. [6, 16].

Последующее помещение такого элемента в переменное электрическое поле с амплитудным значением напряженности меньше величины E_t вызывает деформацию, пропорциональную этому полю. В этом случае можно считать, что сегнетоэлектрик стал пьезоэлектриком, а преобразователь будет работать в линейном режиме (вокруг точки А). Таким образом, в дальнейшем будем понимать под термином «пьезоэлектрик» не только пьезоэлектрические кристаллы, но и предварительно поляризованные сегнетоэлектрики. При этом следует заметить, что общим условием существования пьезоэлектрических свойств является отсутствие центра симметрии, что говорит о существенной анизотропии пьезоматериала.

В зависимости от назначения пьезопреобразователя – излучатель или приемник, – может быть использован соответственно обратный или прямой пьезоэффект. При этом прямым пьезоэффектом называется процесс появления зарядов на гранях пьезоэлемента в результате сжатия или растяжения его и соответствующего изменения размеров. Укорочение или удлинение пьезоэлемента в результате помещения его в электрическое поле называется обратным пьезоэффектом.

Поскольку пьезоэффект предполагает необходимость взаимосвязи между диэлектрическими и упругими свойствами материала, то описание пьезоэффекта возможно лишь с привлечением диэлектрических и упругих констант материалов. Однако комплекс этих постоянных в общем случае среды, лишенной симметрии, весьма велик и полностью никогда не был определен для несимметричных кристаллов. Поэтому для простоты обратимся к одновременной задаче.

Пусть на пьезоэлемент площадью S , толщиной d действует сжимающее усилие F , как показано на рис. [6, 16].

В этом случае между механическим напряжением σ , представляющим собой усилие на единицу площади, т.е. $\sigma = \frac{F}{S}$, и относительной деформацией элемента в направлении приложенного усилия $\delta = \frac{\Delta d}{d}$ существует зависимость

$$\delta = \frac{\sigma}{E_{ю}}, \quad (1)$$

которая известна как закон Гука.

Коэффициент пропорциональности $E_{ю}$ называется модулем упругости.

Если теперь тот же пьезоэлемент поместить между электродами [6, 16], к которым приложено U , то эта модель будет представлять собой конденсатор с зарядом q и площадью обкладок S , диэлектриком в котором является пьезоэлемент. При отсутствии пьезоэффекта в диэлектрике напряженность электрического поля E в нем определится как

$$E = \frac{U}{d}.$$

Величина электрической индукции D , т.е. заряд на единицу площади поверхности элемента, равна

$$D = \frac{q}{S}.$$

Так как заряд на обкладках конденсатора, включенного под напряжение U , определяется как

$$q = \varepsilon \frac{S}{d} U,$$

(где ε – диэлектрическая проницаемость), то можно написать, что

$$\frac{q}{S} = \varepsilon \frac{U}{d}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что левая часть представляет собой электрическую индукцию D , а правая – произведение εE . Таким образом

$$D = \varepsilon E. \quad (3)$$

Этот закон аналогичен приведенному выше закону Гука и устанавливает взаимосвязь между двумя электрическими величинами D и E при отсутствии пьезоэлектрического эффекта в диэлектрике.

В пьезоэлектрическом элементе механические и электрические процессы перестают быть независимыми. К двум приведенным выше законам в выражениях (1) и (2) добавляется еще пьезоэлектрический эффект. В этом случае полная деформация определяется суммарной деформацией в результате приложенного механического напряжения и вызванной электрическим полем, т.е.

$$\delta = \frac{\sigma}{E_{ю}^E} + dijE, \quad (4)$$

где dij – пьезомодуль; $E_{ю}^E$ – модуль упругости пьезоматериала в присутствии постоянного электрического поля.

Умножив правую и левую части уравнения (4) на $E_{ю}^E$ и проведя соответствующие преобразования, получим выражение для упругого напряжения σ :

$$\sigma = \delta E_{ю}^E - eijE, \quad (5)$$

где eij – эффективная пьезоэлектрическая постоянная материала пьезоэлемента

$$eij = dijE_{ю}^E.$$

Полная электрическая индукция D определяется как

$$D = 4\pi dij\sigma + \varepsilon^\sigma E, \quad (6)$$

где ε^σ – диэлектрическая проницаемость при постоянной внешней нагрузке; 4π – коэффициент в рационализированной системе единиц.

Подставляя в выражение (6) значение пьезомодуля и механического напряжения $\sigma = E_{ю}^E \delta$, получим выражение для полной электрической индукции при постоянной деформации:

$$D = 4\pi eij\delta + \varepsilon^\delta E, \quad (7)$$

где ε^δ – диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации

$$\varepsilon^\delta = \varepsilon_0(\varepsilon^\delta);$$

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; (ε^δ) – относительная проницаемость при данной деформации.

Следует обратить внимание на выражения (5) и (7), связывающие электрические и упругие параметры пьезоэлементов, т.к. они будут необходимы при выводе расчетных выражений для пьезоэлектрического преобразователя (см. 11).

Диэлектрическая проницаемость пьезоматериала при постоянной нагрузке ε^σ и диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации ε^δ связаны между собой следующим образом:

$$\varepsilon^{\delta} = \varepsilon^i (1 - \kappa^2), \quad (8)$$

где κ – так называемый коэффициент связи, который определяется зависимостью:

$$\kappa = 2dij \sqrt{\frac{\pi E_{ю}}{\varepsilon^{\delta}}}.$$

В приведенных выше выражениях пьезоэлектрические модули dij и пьезоэлектрические константы eij записаны в общем случае, т.е. без указания на соответствующее направление колебаний. Однако пьезоэлектрические свойства как естественных, так и искусственных пьезоматериалов существенно зависят от направления приложенного механического усилия при прямом пьезоэффекте и от расположения электродов при обратном пьезоэффекте

Рассмотрим пьезоэлектрические постоянные на примере керамического куба [6, 16].

Присоединим к каждой грани куба изолированные друг от друга электроды и примем ось Ox_3 за направление поляризации. Под действием внешней силы P_3 [6, 16] на электродах граней x_1 и x_2 возникнут заряды, величины D которых за единицу площади определяются:

$$D_1 = 4\pi d_{31} \sigma_1,$$

$$D_2 = 4\pi d_{32} \sigma_2,$$

$$D_3 = 4\pi d_{33} \sigma_3.$$

Приведенные выражения записаны в системе рациональных единиц. При использовании электрических единиц выражения примут вид:

$$D_j = d_{3j} \sigma_j.$$

В силу симметрии $d_{31}=d_{32}$, поэтому $D_1=D_2$ и $q_1=q_2$.

Однако пьезомодуль d_{33} примерно в два раза больше пьезомодулей в направлении осей x_1 и x_2 , т.е. $d_{33} \approx 2d_{31}$.

2. Характеристики естественных и искусственных пьезоматериалов

Естественные и искусственные пьезокристаллы и пьезокерамика являются в настоящее время одним из наиболее важных материалов, используемых в ультразвуковой и звуковой технике. В табл. 1 приведены основные характеристики ряда пьезоэлектрических материалов. Рассмотрим каждый из них более подробно.

Кварц. Благодаря высокой температурной устойчивости и механической прочности кварц в настоящее время находит применение в лабораторной и производственной практике. Он не растворяется в воде и кислотах, является тугоплавким (температура плавления 1470°C), пьезоэлектрические свойства теряет при температуре 570°C . До этой температуры кварц обладает устойчивым пьезоэффектом и может эффективно работать в условиях высоких температур до 500°C .

Кристалл кварца по форме представляет собой шестигранную призму с пирамидоподобными сужениями на концах [6, 16]. Ось z , проходящая параллельно граням призмы через вершины противоположных концов, является оптической осью кристалла.

Линия, проходящая через противоположные углы призмы перпендикулярно оптической оси z , является электрической осью кристалла или осью x . Ось y направлена перпендикулярно противоположным граням призмы и оси z . Естественно, что у кристалла кварца имеются три оси x и три оси y .

Пьезоэлементы могут быть вырезаны из кристалла кварца перпендикулярно каждой из трех осей, а также в некоторых других плоскостях. При этом в каждом случае пьезоэлементы имеют определенные специфические свойства.

Наиболее часто применяются пьезопластины x среза и y среза [6, 16]. Деформация пьезопластин x и y среза иллюстрируется на [6, 16]. Кроме этих срезов, применяются пьезоэлементы среза 45° , с помощью которых возможно возбуждение сдвиговых колебаний в твердых телах.

Сегнетова соль (двойная калиево-натриевая соль виннокаменной кислоты). Легко растворима в воде, плавится при температуре 58°C , а при температуре 54°C теряет пьезоэлектрические свойства.

Пьезоэлектрические и упругие константы сегнетовой соли зависят от температуры и приблизительно постоянными их можно считать лишь в интервале от 0 до 16°C .

Основным достоинством сегнетовой соли является ее высокий пьезоэффект, что важно при разработке высокочувствительных акустических приемников. Чувствительность приемника из сегнетовой соли примерно в 100 раз больше чувствительности кварцевого при прочих одинаковых условиях. Поэтому кристаллы сегнетовой соли используются главным образом при изготовлении пьезоэлементов для измерительной аппаратуры. В частности, они широко применяются в качестве приемников ультразвуковой дефектоскопии.

Форма кристалла сегнетовой соли показана на [6, 16]. Пластины для пьезоэлементов вырезаются из кристалла с различной ориентировкой относительно кристаллографических осей a , b и c .

При этом наибольшее распространение получили пьезоэлементы a среза, т.е. когда одна пара граней перпендикулярна кристаллографической оси, а две другие пары граней образуют углы в 45° с осями b и c [6, 16]. Если в таком пьезоэлементе создать электрическое поле E , направленное вдоль оси a [6, 16], то в направлении оси x возникает механическое напряжение, равное

$$\sigma = e_{14} E, \quad (9)$$

где e_{14} – пьезоэлектрическая постоянная;

$$e_{14} = \frac{1}{2} d_{14} E_{ю},$$

где d_{14} – пьезомодуль в направлении оси x ; $E_{ю}$ – модуль Юнга для направления, образующего угол в 45° с осями v и s , определенный при отсутствии электрического поля.

Пьезокерамика. В настоящее время для изготовления пьезокерамических элементов получили распространение следующие основные виды керамики: керамика титаната бария и его производных, керамика системы цирконат-титанат свинца (ЦТС) и керамика на основе ниобата бария свинца

Пьезокерамика титаната бария ($BaTiO_3$) характеризуется меньшим пьезоэффектом в сравнении с сегнетовой солью, но большим в сравнении с пьезоэффектом кварца.

Титанат бария нерастворим в воде, фазовый переход 2-го рода (точка Кюри) соответствует температуре 120°C . Пьезоэлементы, изготовленные из керамики титаната бария с добавкой 4-8% ($PbTiO_3$) титаната свинца, могут работать в диапазоне температур до $+150^\circ\text{C}$. В настоящее время известна пьезокерамика ниобата свинца бария, точка Кюри которой соответствует 260°C .

По упругим свойствам пьезокерамика титаната бария ближе всего подходит к кварцу. Зависимость основной собственной частоты колебаний от толщины пьезоэлемента из титаната бария приведена на [6, 16]. Одним из преимуществ титаната бария является высокий коэффициент преобразования электрической энергии в механическую энергию колебаний.

Особенно тяжелые условия работы преобразователей при больших механических напряжениях и в сильных электрических полях предопределили использование титаната бария модифицированного кальцием и кобальтом, – материала сложного в производстве, обладающего не очень высокими показателями пьезоэлектрических свойств, но относительно более устойчивого при работе в указанных условиях.

Пьезокерамика ЦТС $Pb(Zr_{0,55}Ti_{0,45})O_3$ характеризуется пьезоэффектом, вдвое большим по сравнению с титаном бария. Она не растворима в воде и имеет точку Кюри 330°C . Прочность керамики ЦТС больше прочности керамики титаната бария. Поэтому в последнее время керамика ЦТС используется в основном для работы в трудных технологических условиях. Заготовки из пьезокерамики ЦТС, как и из керамики титаната бария, допускают механическую обработку (резку, шлифовку, полировку) для получения пьезоэлементов заданных форм и размеров.

В настоящее время пьезокерамика получила большее распространение в ультразвуковой и звуковой технике благодаря относительно низкой стоимости, возможности изготовления из нее пьезоэлементов самых разнообразных форм, создания фокусирующих систем и т.д. При этом ее можно заставить излучать и принимать упругие колебания с равной эффективностью в любом направлении. Эти и другие преимущества пьезокерамики являются причиной того большого внимания, которое уделяется разработке и совершенствованию пьезокерамик с целью улучшения упруго-прочностных и пьезоэлектрических свойств.

3. Производство пьезокерамических материалов

Пьезокерамические материалы синтезируются из окислов металлов и представляют собой неорганические диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. Для них характерна зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля и наличие резко выраженного максимума в зависимости от температуры. Такие диэлектрики обладают спонтанной поляризацией и относятся к сегнетоэлектрикам.

Температура, которой соответствует максимум диэлектрической проницаемости (точка Кюри), является предельной для использования пьезокерамик. Выше этой температуры происходит изменение структуры вещества и его основных свойств.

Технологический процесс производства пьезокерамических материалов включает подготовку исходного сырья, дозировку и смешивание компонентов, брикетирование и высокотемпературной обработки.

Пьезокерамику титаната бария готовят синтезом из углекислого бария $BaCO_3$ (71%) и двуокиси титана TiO_2 (29%). Синтез осуществляется при температуре $1300-1325^\circ\text{C}$ в слабо окислительной среде с выдержкой при этой температуре в течении 1-2 часов.

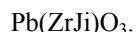
Разработан также способ получения заготовок изделий из титана бария методом горячего литья под давлением при температуре синтеза соответственно из углекислого кальция (55,6%) и окиси свинца PbO (73,7%) и двуокиси титана TiO_2 (44,4%; 26,3%). Температура синтеза титаната кальция $1320-1330^\circ\text{C}$, титаната свинца – 650°C .

Титанат бария-кальция ($BaCaTiO_3$) с кобальтом получается из предварительно синтезированных титаната бария (95%) и кобальта (0,75%).

При производстве материала без предварительного синтеза шихта готовится из 67,2% $BaCaO_3$; 3,1% $CaTiO_3$; 29,7% TiO_2 и 0,63% $CaCO_3$. Синтез протекает при температуре $1300-1320^\circ\text{C}$ с выдержкой в течении 1-2 часов.

Производство пьезокерамических материалов системы ЦТС может быть осуществлено двумя способами. По одному из них предварительно синтезируются цирконат свинца ($PbZrO_3$) и титанат свинца ($PbTiO_3$),

смесь которых с добавками подвергается высокотемпературной обработке. В результате образуется твердый раствор титаната свинца



По другому способу гомогенная смесь окиси свинца, двуокиси циркония и двуокиси титана подвергается однократной термической обработке.

Для осуществления процесса синтеза и улучшения свойств пьезокерамики в основной состав могут вводиться различные малые добавки (табл. 2).

Максимальная температура синтеза пьезокерамики ЦТС составляет 910°C , подготовительная – 850°C . Продолжительность синтеза 10,5 ч, в том числе при максимальной температуре – 1,5 ч. Синтез материалов ЦТС в промышленных условиях эффективно осуществляется в электрических туннельных печах.

Пьезокерамика необата бария свинца $(\text{Pb}_x\text{Ba}_{1-x})\text{Nb}_2\text{O}_6$ получается в результате синтеза окиси свинца, углекислого бария и пятиокиси ниобия. Существует три разновидности этой пьезокерамики, соответствующие следующим значениям индексов x и y : $1-x=0,57$; $y=0,43$; $2-x=0,53$; $y=0,47$; $3-x=0,60$; $y=0,40$. Температура синтеза $1050 \div 1100^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 1 часа.

Таблица 2

Пьезоматериалы системы ЦТС

Компоненты	Состав компонентов в % по весу										
PbO	65,17	66,0	67,32	67,32	67,32	67,32	67,32	64,74	67,32	66,40	69,66
ZrO ₂	21,20	19,96	20,63	20,63	20,63	20,63	20,63	20,56	20,63	07,45	15,38
TiO ₂	11,36	10,83	11,08	11,08	11,08	11,08	1,08	11,47	11,08	13,15	14,96
La ₂ O ₃	-	0,99	0,97	-	-	-	-	-	-	-	-
Nd ₂ O ₃	-	-	-	0,97	0,49	-	-	-	-	-	0,50
Nb ₂ O ₅	-	-	-	-	0,49	0,97	-	0,97	0,49	-	0,50
La ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,97	-	0,49	-	-
SrCO ₃	2,28	2,22	-	-	-	-	-	2,26	-	2,22	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,78	-

4. Изготовление пьезоэлементов

Изготовление пьезоэлементов из естественных материалов отличается от изготовления их из искусственных пьезоматериалов. Изготовление изделий из естественных пьезоматериалов осуществляется разрезанием пьезокристалла на элементы в определенном направлении в зависимости от заданного среза и последующей механической обработки их шлифованием и притиркой для доводки до необходимых размеров.

Пьезокерамические изделия изготавливаются из соответствующих заготовок путем шлифования и придания им требуемой формы и соответствующих размеров. Таким образом, общим для пьезоэлементов из пьезокристаллов, из пьезокерамик является заключительный этап изготовления – процесс доводки. Рассмотрим процесс изготовления керамических заготовок и процесс обработки и доводки изделий из пьезокристаллов и пьезокерамик.

Керамические заготовки (называемые до обжига полуфабрикатами) заданной формы и размеров изготавливают с помощью ряда технологических приемов. В настоящее время используются три следующих способа оформления полуфабриката: прессование, литье и протяжка.

Способ прессования является наиболее распространенным, т.к. он пригоден для большинства существующих конструкций преобразователей. Изготовление изделий прессованием характеризуется высокой производительностью, обеспечивает получение высококачественной керамики. При этом прессованные заготовки могут подвергаться механической обработке как после отжига, так и до него.

Приготовление пресс-порошка осуществляется на стандартных дробилках, сепараторах, шаровых и вибрационных мельницах, смесителях и протирочных машинах. В качестве связки (пластификатора) пресс-порошков применяется парафин, поливиниловый спирт, бакелитовый лак и др. В зависимости от размеров заготовки и сложности ее формы количество пластификатора составляет от 2 до 5% по весу. В размерах заготовок учитывается их усадка в процессе обжига и пропуск на обработку после него.

Способ изготовления керамических заготовок горячим литьем заключается в следующем. Приготовленная масса из порошка синтезированного материала, литейного шликера и парафина разжижается при температуре $75-90^{\circ}\text{C}$ и нагнетается под давлением 4-7 атм в металлическую форму с температурой $10-25^{\circ}\text{C}$. Находясь под этим давлением, масса отвердевает и образует изделие в соответствии с литейной формой. Полученные отливки после механической обработки подвергаются специальной термической обработке при температуре $750-900^{\circ}\text{C}$ для удаления парафиновой связки и придания заготовке прочности за счет частичного спекания.

Следует отметить, что этот способ широкого распространения пока не получил и требует проведения дальнейших исследовательских работ о целесообразности его применения.

Способом протяжки изготавливаются тонкостенные изделия трубчатой формы малых диаметров. Для этого пластичную массу, полученную пластификацией порошка синтезированного материала протягивают

через мундштук. Протяжка осуществляется на вертикальных прессах. Живое сечение выходного отверстия мундштука определяет форму и размеры изделия.

Помимо рассмотренных здесь способов производства керамики, известны способы получения сверхтонких заготовок (до 10 мкм) вальцеванием и литьем пленок. Однако они пока не получили промышленного применения.

Полученный одним из рассмотренных способов полуфабрикат подвергается высокотемпературной обработке, называемой обжигом. В результате обжига достигается достаточно полное спекание керамики. Изделия с повышенной склонностью к деформации – тонкостенные, сложной формы – подвергаются двукратному обжигу: при пониженной температуре и при нормальной.

Различают туннельный обжиг – термическая обработка в туннельной печи; обжиг в муфельной печи и камерный обжиг – в каменной печи.

Температурный и временный режимы термической обработки оказывают существенное влияние на свойства пьезокерамических изделий.

Для обжига в печах периодического действия (камерных) задается режим на «оборот» печи (на один цикл). В течении заданного времени после загрузки печи изделиями осуществляется подогрев с подъемом температуры, затем обжиг с выдержкой при максимальной температуре и охлаждение.

При обжиге в печах непрерывного действия (туннельных) полуфабрикат на «кладочках» или «вагонетках» транспортируется по каналу печи в заданном режиме, последовательно проходя зоны подогрева, обжига и охлаждения.

При обработке изделий из пьезокристаллов и из пьезокерамических материалов применяются различные виды доводки элементов до заданных размеров: обработка по диаметру, фигурная обработка, шлифовка по плоскости, притирка и др.

Обработка по диаметру производится на круглошлифовальных станках. Заготовки склеиваются менделеевской замазкой (40% канифоли + 60% воска) в блоки, на торцы которых наклеиваются стальные центры. Обработка пьезоэлементов по внутреннему диаметру осуществляется с помощью внутришлифовального станка. Пьезоэлементы в форме пирамид, трапеций и им подобных обрабатываются на плоскошлифовальных станках, вогнутые и выпуклые – на притирках.

Шлифовка (мокрая) по плоскости осуществляется на плоскошлифовальных станках или на чугунных планшайбах. Для этого заготовки наклеиваются на металлические пластины, параллельность плоскостей которых должна быть с допуском не более 0,01 мм. В качестве клея используется менделеевская замазка, смесь канифоли и парафина и чистая канифоль.

Получившие в последние годы большое распространение методы изготовления и обработки пьезоэлементов на ультразвуковых станках позволяют вести чистую обработку поверхностей, резку изделий, прошивку отверстий в них и образование углублений любой формы и сечения.

5. Нанесение электродов и поляризация пьезокерамики

Для эффективной работы пьезоэлектрических преобразователей необходимы электроды, обеспечивающие надежный контакт по всей плоскости пьезоэлемента. Электродами служат металлопокрытия пьезоэлементов, наносимые на специально подготовленные для этого поверхности. Нанесение электродов на пьезоэлементы из керамики осуществляется одним из следующих способов: никелированием, палладированием, индированием или серебрением.

Никелирование является одним из видов химического покрытия керамики. Сущность этого метода заключается в восстановлении никелевых солей на металлизированной поверхности керамики с помощью гипофосфата натрия или калия. Для улучшения процесса восстановления солей никеля при металлизации, содержащий свинец керамики, поверхность предварительно покрывается слоем меди.

В состав ванны для химического никелирования входят следующие компоненты: хлористый никель – 21 г/л, водный аммиак – 50 мл/л, гипофосфат – 24 г/л, хлористый аммоний – 50 г/л и лимоннокислый натрий – 12 г/л. Толщина покрытия определяется по разности весов пьезоэлемента до и после никелирования как

$$h^i = \frac{p \cdot 10^4}{Sp^i}, \quad (10)$$

где p – привес элемента за счет покрытия; S – суммарная площадь металлизированных поверхностей, см²; p^i – удельный вес никеля, г/см³;

Никелевое покрытие хорошо поддается пайке. Прочность сцепления его керамикой достигает 50-60 кг/см².

Индирование пьезокерамических элементов осуществляется методом вакуумной металлизации или гальванического покрытия.

Процесс вакуумной металлизации включает в себя нагрев, испарение металла в вакууме и осаждение его на поверхности изделия. Таким методом наносятся покрытия малой толщины, обычно не более 1 мкм.

При индировании методом гальванического покрытия пьезокерамические изделия вначале подвергаются химическому меднению для активизации поверхности, затем осуществляется гальваническая металлизация индием. В состав электролита для индирования входят: сернокислый индий – 70 г/л, сернокислый натрий – 10 г/л. В качестве анода используется металлический индий в виде ленты. Температура ванны поддерживается в пределах от 18 до 25°C.

Нанесение электродов методом палладирования осуществляется путем вжигания палладиевого покрытия при обжиге пьезоэлементов.

Серебрение керамических пьезоэлементов может осуществляться методом вжигания серебра в керамику, путем вакуумной металлизации и нанесением дисперсного серебра на клею.

Вид покрытия пьезокерамических элементов и способ нанесения электродов определяется, главным образом, из следующих соображений:

- 1) для осуществления пайки отводов в электродах необходимо сочетание общего серебрения в вакууме с вжиганием серебрянной точки;
- 2) химической обработке пьезокерамических изделий в процессе никелирования может сопутствовать изменение электрических характеристик элементов;
- 3) нанесение электродов методом палладирования неприменимо при обжиге керамики в засыпке;
- 4) применение металлизации методом серебрения на клею (электроды из токопроводящего клея) целесообразно в тех случаях, когда заделка пьезоэлемента в преобразователе исключает возможность механического повреждения электродов.

В настоящее время наибольшее распространение получил способ нанесения электродов вжиганием серебра, которое образует надежное покрытие пьезоэлемента, отличающееся высокой влагостойкостью и химической стойкостью. Прочность сцепления нанесенного таким образом электрода с керамикой зависит от качества подготовки металлизированной поверхности.

Процесс металлизации пьезокерамических элементов включает приготовление специальной серебрянной пасты, нанесение ее на соответствующие поверхности изделий и непосредственное вжигание. Исходными компонентами для пасты являются: окись серебра, пламень, связка, окись висмута и касторовое масло. В качестве плавня применяется борнокислый свинец, а в качестве связки – раствор канифоли в скипидаре.

Состав пасты по компонентам в весовых частях следующий:

Окись серебра – 100,
Свинец борнокислый – 1,5;
Связка канифольная – 2,2;
Окись висмута – 1,5;
Касторовое масло – 6,5;
Скипидар – 7,0.

Нанесение пасты на поверхность пьезоэлементов осуществляется либо с помощью кисти, либо распылением (пульверизацией), причем второй способ является более совершенным и производительным.

Вжигание серебра осуществляется в электрических печах, обеспечивающих нагрев до температуры 900⁰С. При мелкосерийном производстве пьезоэлементов применяются муфельные печи, а в условиях массового производства – конвейерные печи с автоматической регулировкой температуры и вытяжной вентиляцией для обеспечения окислительной среды в печи.

Процесс вжигания в пьезокерамику начинается при температуре свыше 600⁰С, однако оптимальной является температура 825 ± 25⁰С. При такой температуре коллоидное соединение металлического серебра с борнокислым свинцом и окисью висмута проникает в поверхностные слои керамики на максимальную глубину и обеспечивает надежное сцепление кристаллов серебра между собой и с керамическим изделием. Прочное покрытие, превышающее 100 кг/см², достигается двух – трехкратным нанесением пасты на элемент и вжиганием ее.

Помимо рассмотренных здесь способов нанесения электродов на пьезокерамические элементы известен метод лужения керамики оловянно-цинковым припоем (Sn90%+Zn10%) с помощью ультразвука. Процесс лужения заключается в том, что нагретый до 240-250⁰С пьезоэлемент помещают в приспособление паяльником, который, медленно передвигаясь, слегка касается металлизированной поверхности. Для того, чтобы керамическая заготовка с нанесенными на нее электродами превратилась в пьезоэлемент, заготовку необходимо подвергнуть поляризации. Поляризация заготовок пьезоэлементов заключается в смещении электрических зарядов диэлектрика по направлению к обкладкам, с помощью которых создается электрическое поле.

В силу особенностей внутренней структуры пьезокерамических материалов они обладают собственной (спонтанной или самопроизвольной) электрической поляризацией. При этом кристалл пьезокерамики не создает электрического поля вне себя [6, 16]. При помещении такого кристалла во внешнее электрическое поле в пьезокерамике происходит переориентация поляризации в доменах. В результате этого появляется общая результирующая поляризация [6, 16], сохраняющаяся после прекращения воздействия электрического поля, т.е. керамика приобретает пьезоэлектрические свойства.

Изоляционная среда, в которую помещаются заготовки для поляризации, может быть газообразной или жидкой: воздух, трансформаторное масло, силиконовая жидкость, церезин и др. Поляризация может осуществляться как при обычной температуре (18-20⁰С), так и с подогревом. При этом выбор режима поляризации определяется, главным образом, физико-химическими свойствами керамики. Так, например, при высокотемпературной поляризации (свыше 100⁰С) изделий с серебрянными электродами, нанесенными вакуумной металлизацией, последние склонны к разрушению, а элементы из керамики ЦТС-19 с индиевыми покрытиями имеют тенденцию к растрескиванию.

Кроме этого, процесс поляризации оказывает влияние на прочность сцепления электродов с поверхностью керамики, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл.3.

Влияние поляризации на прочность сцепления серебра с керамикой

Номер образца	Прочность на отрыв от электрода, кг/см ²		
	До поляризации	После поляризации на воздухе	
		Температура поляризации 20 ⁰ С	Температура поляризации 140 ⁰ С
1	130	125	95
2	120	122	95
3	130	127	45
4	125	125	90

Величина напряженности электрического поля определяется насыщением поляризации при данной температуре и продолжительности процессов. При этом величина напряженности поля примерно обратно пропорциональна толщине поляризуемого изделия. С учетом отмеченных здесь особенностей процесса поляризации керамики в настоящее время осуществляется в соответствии с режимами, приведенными в табл.4.

Таблица 4

Режимы поляризации пьезокерамических изделий

Состав пьезокерамики	Температура подогрева, ⁰ С	Максимальная напряженность электрического поля, кв/см
(BaCa)JiO ³	До 100	8
(BaCaPb)JiO ³	До 150	10
(BaCa)JiO ³	До 95	7
С кобальтом (Pb _{0,6} Ba _{0,4}) NbO ₆	До 160	30
(Pb _{0,53} Ba _{0,47}) NbO ₆	До 180	25-40
(Pb _{0,57} Ba _{0,43}) NbO ₆	До 180	25-40

Поляризация изделий из керамических материалов системы ЦТС с подогревом до 140-180⁰С позволяет при одинаковых условиях в 1,5-2,0 раза увеличить пьезомодули элементов в сравнении с поляризацией при 20⁰С. Поляризация с подогревом способствует и увеличению диэлектрической проницаемости, характеризующей способность пьезокерамики к поляризации.

Продолжительность воздействия электрического поля на поляризуемую керамику составляет, как правило, не более 2 часов при поддержании максимальной температуры подогрева. Известны данные об эффективной поляризации с продолжительностью воздействия поля менее 1 ч. Однако и это время может быть сокращено путем воздействия высокочастотным полем при поляризации постоянным электрическим полем.

Разработан метод поляризации пьезокерамики, заключающийся в последовательном воздействии на заготовку элемента превышающих коэрцитивное поле переменного электрического и постоянного поляризуемого полей. Этот способ отличается высокой эффективностью с точки зрения стабильности пьезокерамических свойств поляризуемой керамики во времени. В особенности это относится к поляризации при температурах, близких к точке Кюри.

Повышенная эффективность этого способа объясняется тем, что предварительное воздействие переменного поля способствует «расшатыванию» механической структуры поляризуемой керамики, создавая неустойчивое состояние доменов. Последующее воздействие постоянного электрического поля приводит к ориентации доменов в направлении поля и закреплению структуры керамики.

После окончания процесса поляризации электроды пьезоэлементов закорачиваются, т.е. в первые дни после поляризации наблюдается некоторое изменение пьезоэлектрических свойств элементов. Изменение свойств элементов объясняется процессом старения, характеризующимся уменьшением диэлектрической проницаемости и упругой постоянной, а следовательно, и увеличением резонансной частоты. Причиной старения является постепенное ослабление внутренних механических напряжений, возникающих в результате переориентации доменов в процессе поляризации, сопровождающихся потерей некоторого электрического момента.

Установлено, что, спустя примерно 3 суток после поляризации, величина пьезомодулей элементов стабилизируется.

6. Краткая теория пьезоэлектрического преобразователя

Работа средства ультразвуковой техники и звуковой техники, целью которой является эффективное воздействие на различные среды, основана на использовании колебаний конечных амплитуд. В связи с этим преобразователи, в том числе и пьезокерамические, работают в нелинейном режиме. Нелинейный расчет преобразователей представляет определенные трудности и является довольно громоздким. В то же время расчет преобразователей на основе линейных соотношений дает вполне удовлетворительные результаты в большинстве практических задач ультразвуковой и звуковой техники и технологии.

Исходя из этого, рассмотрим расчет пьезопреобразователя в линейном режиме в одновременном приближении, т.е. полагая пьезоэлемент в виде слоя бесконечных размеров по сравнению с толщиной. Такое допущение позволяет учитывать колебания пьезоэлемента только по толщине. Кроме того, следует принять допущение в том, что минерал пьезоэлемента однороден.

Теоретический анализ и расчет любой колебательной системы может быть осуществлен либо путем непосредственного решения дифференциальных уравнений при соответствующих граничных условиях, либо с помощью эквивалентных механических и электрических схем.

Заменим пьезоэлемент преобразователя эквивалентной электрической схемой колебательного контура [6, 16], состоящего из индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R .

Известно, что электрический заряд q_0 заряженного до напряжения U конденсатора C_1 равен

$$q_0 = C_1 U. \quad (11)$$

Однако, если между обкладками конденсатора расположена пьезопластинка, то электрическое поле вследствие обратного пьезоэффекта приведет к деформации пластинки. В результате деформации и проявления прямого пьезоэффекта на ее противоположных поверхностях появится дополнительный заряд $q_1 = d_{11} F$ и общий заряд q составит:

$$q = C_1 U + d_{11} F, \quad (12)$$

где F – полная сила, действующая на пьезоэлемент и обусловленная напряжением U и противодействием, оказываемым пьезопластинкой при деформации; d_{11} – пьезомодуль кварца при колебаниях по толщине (для пьезокерамики d_{33}).

Если к обкладкам пьезоэлемента (конденсатора) подвести переменное напряжение $U = U_m \sin \omega t$ (где ω – частота, t – время), то в системе потечет ток смещения.

$$i = C_1 \frac{du}{dt} + \frac{dq_1}{dt} = i_0 + i_1. \quad (13)$$

Выражение (13) свидетельствует о том, что конденсатор, емкость которого является функцией размеров пластинки и ее диэлектрической проницаемости, должен быть включен в эквивалентную систему параллельно элементам, отражающим другую часть схемы, параметры которой определяются пьезоэлектрическими и упругими параметрами пьезоэлемента.

Найдем эти элементы, исходя из следующих соображений.

Представим пьезоэлемент, находящийся под действием периодической силы $F = F_m \sin \omega t$, в виде двух сосредоточенных масс m , соединенных между собой гибкой связью упругости. В этом случае уравнение примет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F_m \sin \omega t, \quad (14)$$

где r – коэффициент трения; x – смещение массы m из положения равновесия.

Так как $F = aU$ (где a – постоянная), то

$$q_1 = a d_{11} U.$$

Учитывая, что $d_{11} U = x$, получим

$$q_1 = ax. \quad (15)$$

Дифференцируя выражения (15) по t , найдем:

$$\begin{aligned} \frac{dq_1}{dt} &= i_1 = a \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2 q_1}{dt^2} &= \frac{di_1}{dt} = a \frac{d^2 x}{dt^2}, \\ \frac{d^3 q_1}{dt^3} &= \frac{d^2 i_1}{dt^2} = a \frac{d^3 x}{dt^3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Продифференцировав уравнение движения (14) по t и изменив в нем производные на основании (16), получим уравнение

$$m \frac{d^2 i_1}{dt^2} + r \frac{di_1}{dt} + \frac{k}{d^2} i_1 = \omega U_m \cos \omega t. \quad (17)$$

Возвращаясь к электрическому колебательному контуру, состоящему из индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R , следует отметить, что ток в таком контуре, являющийся результатом приложенного напряжения $U_m \sin \omega t$, удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \omega U_m \cos \omega t. \quad (18)$$

Сравнивая уравнения (17) и (18), можно записать

$$L = \frac{m}{d^2}; \quad R = \frac{r}{d^2}; \quad C = \frac{d^2}{k}. \quad (19)$$

Таким образом, пьезоэлемент преобразователя в процессе колебаний можно заменить электрической эквивалентной схемой.

Активное сопротивление R состоит из сопротивления холостого хода R_0 , соответствующего ненагруженному пьезопреобразователю, и сопротивления излучения R_5 .

При колебаниях пьезопластинки по толщине входящие в уравнение (17) величины m , g , k и a можно определить следующими выражениями:

$$m = \frac{1}{2} p d b l; \quad r = \frac{1}{2d} \pi^2 p r b l; \\ k = \frac{1}{2d} \pi^2 E_{ю}^v b l; \quad a = \frac{2e_{11} b l}{d + \pi l^1}, \quad (20)$$

где p – плотность материала пьезоэлемента; d , b , l – толщина, ширина и длина пьезопластинки; g – коэффициент, характеризующий внутренние механические потери в пьезоэлементе; $E_{ю}^v$ – объемный модуль упругости пьезоэлемента

$$E_{ю}^v = E_{ю} + \frac{4\pi E_{ю}^2}{\varepsilon},$$

где d – расстояние между обкладками и пьезоэлементом; $E_{ю}$ – модуль упругости в направлении оси x (для кварца можно приближенно считать $E_{ю}^v \approx E_{10}$); e_{11} – пьезоэлектрическая константа элемента.

Таким образом, по приведенным выражениям (19) и (20) можно найти параметры элементов эквивалентного электрического колебательного контура. При этом по аналогии с логарифмическим декрементом затухания электрического колебательного контура, определяющим как

$$\theta = \frac{1}{\gamma} \frac{R}{2L} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (21)$$

можно определить декремент затухания пьезоэлемента, обусловленный внутренним трением

$$\theta = \frac{r}{2\gamma m} = \frac{\pi}{d^2} \sqrt{\frac{r p}{E_{ю}}}. \quad (22)$$

При изучении колебаний значению θ добавляется декремент затухания θ , связанный с излучением и, как правило, во много раз превосходящий величину декремента, обусловленного внутренним трением.

7. Резонансные частоты пьезопреобразователя

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему пьезопреобразователя с электродами, нанесенными путем металлизации (т.е. при $C_2 = \infty$) (см. [6, 16]). Такая электрическая схема характеризуется двумя резонансными частотами: частотой γ_R последовательного резонанса и частотой γ_A параллельного резонанса, которая обычно называется частотой антирезонанса.

Как известно, эти частоты определяются следующими выражениями

$$\gamma_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad (23)$$

$$\gamma_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{C}{C_1}\right)}. \quad (24)$$

Из приведенных выражений следует, что частота является функцией только размеров пьезоэлемента. Частоту же антирезонанса можно изменять путем подключения дополнительных емкостей к пьезоэлементу. При этом с увеличением емкости, включенной параллельно (C_1), частота антирезонанса приближается к частоте последовательного резонанса.

На [6, 16] приведена частотная зависимость реактивного сопротивления X пьезоэлемента, которое определяется следующими выражениями:

при последовательном резонансе

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad (25)$$

при параллельном резонансе (антирезонансе)

$$X = \frac{1 - \omega C_1 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}, \quad (26)$$

где ω – круговая частота колебаний, равная $2\pi\gamma$.

Таким образом, пьезоэлемент в процессе колебаний можно рассматривать как резонансный колебательный контур. При этом резонанс возникает при равенстве между частотой электрических колебаний и час-

тотой собственных упругих колебаний пьезоэлемента. В этом случае полное сопротивление эквивалентного контура равно его активному сопротивлению, т.е. $X=0$ (см. [6, 16]).

Основная частота и соответственно первая резонансная частота γ_1 колебаний пьезоэлемента может быть определена на основе приведенных здесь и в (6) выражений при равенстве нулю реактивного сопротивления в выражении (25) и с учетом соотношений (19) и (20). В этом случае

$$r_1 = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E_{ю}}{p}}. \quad (27)$$

Это же выражение может быть получено и в результате подстановки значений k и m из соотношений (20) в известное выражение для резонансной частоты колебаний системы «масса-пружина».

$$r_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (28)$$

Однако пьезоэлемент, как и любая система с распределенными параметрами, может совершать резонансные колебания на высших гармониках [6, 16], частоты γ_i которые определяются как

$$\gamma_i = \frac{i}{2d} \sqrt{\frac{E_{ю}}{p}}, \quad (29)$$

где $i=1,2,3,\dots$ – порядок колебаний.

Приведенные здесь выражения справедливы лишь при условии колебаний пьезоэлемента в вакууме (практически на воздухе) и при отсутствии дополнительных соколеблющихся масс. При применении же пьезопреобразователей в технических процессах работа пьезоэлемента связана с соответствующими технологическими нагрузками, характеризующимися сопротивлением излучения и присоединенной массой среды. При этом в зависимости от частоты колебаний реактивная составляющая сопротивления может иметь упругий характер, в результате чего резонансная частота повышается, или имеет инерционный характер, что определяет снижение частоты.

Кроме того, при техническом оформлении преобразователей или для снижения резонансной частоты часто пьезоэлемент снабжается накладками, элементами технического оформления или изучающими элементами, которые в общем случае можно заменить сосредоточенными присоединенными массами (а иногда и упругостью). Рассмотрим более подробно влияние этих масс на резонансную частоту преобразователя.

Разделим пьезоэлемент по толщине на две равные части и представим одну из них в виде колебательной системы, схема которой приведена на рис. 14. Обозначив через продольное смещение поперечного сечения системы из положения равновесия, можно написать следующее дифференциальное уравнение свободных колебаний ее без учета сил сопротивления.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - C_D^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0, \quad (30)$$

где C_D – скорость распространения упругой волны в материале пьезоэлемента; x – текущая координата.

Решение уравнения (30) необходимо получить при следующих граничных условиях, соответствующих рассматриваемой схеме:

у верхнего конца (заделанного)

$$(\xi)_{x=0} = 0, \quad (31)$$

у нижнего конца следует учесть влияние груза массой m_1 , исходя из того что растягивающая сила должна равняться силе инерции¹ колеблющейся массы m_1 , т.е.

$$SE_{ю} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{x=\frac{d}{2}} = -m_1 \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right)_{x=\frac{d}{2}}, \quad (32)$$

где S – площадь сечения пьезоэлемента в плоскости, перпендикулярной направлению колебаний; d – толщина пьезоэлемента (при колебаниях по длине необходимо брать длину l).

Решение уравнения (30) в предположении, что система совершает колебания одной из главных форм, можно записать в следующем виде:

$$\xi_m = x^1 (A \cos \omega t + B \sin \omega t), \quad (33)$$

где X^1 – некоторая функция только координаты x , определяющая форму колебаний и называемая нормальной функцией; A и B – постоянные, определяемые начальными условиями; при $t=0$ получим $A=0$ в случае $(\xi)_{t=0}=0$, при этом $B=0$ в случае $(\dot{\xi})_{t=0}=0$.

Подставляя в уравнение (30) значение ξ_m из (33), получим

$$C_B^2 \frac{d^2 x^1}{dx^2} + \omega X^1 = 0. \quad (34)$$

Решая уравнение (34) относительно X^1 , найдем

¹ Постоянный вес груза уравновешен равномерным растяжением старения в положении равновесия и не оказывает влияние на запись условия.

$$X^1 = C \cos \frac{\omega x}{C_D} + D \sin \frac{\omega x}{C_D}, \quad (35)$$

где C и D – постоянные интегрирования.

Чтобы выполнялось граничное условие (31) в решении (35), необходимо принять C=0. На основании второго условия (32) получим

$$SE_{\pi} \frac{\omega}{C_D} \cos \frac{\omega t}{C_D} = m_1 \omega^2 \sin \frac{\omega t}{C_D}. \quad (36)$$

Обозначим отношение массы m половины пьезоэлемента к массе m, груза α , т.е. $\alpha = \frac{Sdp}{2m}$, а отношение $\frac{\omega t}{C_D}$ через β . Тогда уравнение (36) примет вид

$$\alpha = \beta \operatorname{tg} \beta. \quad (37)$$

Выражение (37) представляет собой частотное уравнение для рассматриваемого случая.

В ультразвуковой технике наибольший практический интерес представляет основная форма колебаний, соответствующая полуволновой толщине (или длине при колебаниях по длине) пьезоэлемента. Поэтому в табл. 5 приведены значения β_1 наименьшего корня уравнения (37) в зависимости от величины α .

Если $m \ll m$, то величина α и значение $\operatorname{tg} \beta$ будут малы. Выражение (37) можно упростить, приняв $\beta \approx \operatorname{tg} \beta$, т.е. получим:

$$\beta^2 = \alpha \frac{Sdp}{2m}. \quad (38)$$

Подставив в выражение (38) значение β и решив его относительно ω , найдем:

$$\omega = \frac{2\pi C_D}{d} \sqrt{\frac{Sdp}{2m_1}} = \frac{2\pi C_D}{d} \sqrt{\frac{m}{m_1}}. \quad (39)$$

Таблица 5

α	0,01	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,0	1,50	2,00	3,00	4,00	5,00	10,0	20,0	100,0	∞
β	0,10	0,32	0,52	0,65	0,75	0,82	0,86	0,98	1,08	1,20	1,27	1,32	1,42	1,52	1,57	$\pi/2$

8. Коэффициент электромеханической связи пьезопреобразователя

Пьезоэлемент, совершающий колебания, представляет собой электромеханический преобразователь энергии. Под действием электрического напряжения в нем запасается определенное количество электрической энергии. Часть этой энергии в силу пьезоэлектрических свойств элемента расходуется на создание неупругих напряжений и переходит, следовательно, в механическую энергию упругой деформации.

Отношение величин этих энергий является мерой эффективности электромеханического преобразователя и называется коэффициентом электрической связи k . Квадрат коэффициента электромеханической связи определяется отношением генерируемой в пьезоэлементе механической энергии к запасаемой в нем электрической энергии $k^2 = \frac{W_m}{W_e}$.

При колебаниях по толщине механическая энергия, приходящаяся на единицу объема пьезоэлемента, может быть представлена в виде

$$W_m = \frac{1}{2} E_{\pi} d^2 ij E^2. \quad (40)$$

Электрическая энергия на единицу объема равна

$$W_e = \frac{1}{8\pi} \varepsilon E^2, \quad (41)$$

где E – напряженность электрического поля в направлении колебаний.

Таким образом

$$k^2 = \frac{W_m}{W_e} = \frac{4\pi E_{\pi} d^2 ij}{\varepsilon}, \quad (42)$$

откуда

$$k = 2dij \sqrt{\frac{\pi E_{\pi}}{\varepsilon}}. \quad (43)$$

Анализируя выражения (43), можно отметить, что коэффициент k связывает пьезоэлектрический модуль dij с упругими и диэлектрическими параметрами пьезоэлемента. Поэтому он представляет собой величину, наилучшим образом характеризующую пьезоэлемент как электромеханический преобразователь.

Коэффициент электромеханической связи может быть определен путем измерения двух резонансных частот, соответствующих последовательному γ_R и γ_A параллельному резонансам (см. 7). Относительная разность этих двух частот, на основании выражений (23) и (24) определится как

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_R} = \frac{\gamma_A - \gamma_R}{\gamma_R} = \frac{C}{C_1}. \quad (44)$$

На основании выражений (43) и (44) можно написать

$$C = \frac{8}{\pi^2} \frac{e^2 i j b l}{E_{ю} d} = \frac{8}{\pi^2} \frac{d^2 i j E_{ю} b l}{d}. \quad (45)$$

Электрическая емкость C_1 колеблющегося пьезоэлемента может быть выражена как

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{LC} b l}{4 \pi i t}, \quad (46)$$

где ε_{LC} – диэлектрическая постоянная колеблющегося пьезоэлемента,

$$\varepsilon_{LC} = \varepsilon \left(1 - \frac{4 \pi i t^2 i j E_{ю}}{\varepsilon} \right), \quad (47)$$

где ε – диэлектрическая постоянная покоящейся пьезопластины.

Как видно из выражений (46) и (47), электрическая емкость колеблющегося пьезоэлемента меньше емкости покоящегося элемента. Это снижение емкости определяется тем, что при колебаниях в пьезоэлементе возникают не стекающие заряды, ослабляющие диэлектрическое смещение.

Подставив в выражение (44) значения C и C_1 с учетом выражения (47), получим

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_R} = \frac{8}{\pi^2} \frac{4 \pi d^2 i j}{\varepsilon \left(1 - \frac{4 \pi d i j E_{ю}}{\varepsilon} \right)} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{k^2}{1 - k^2}. \quad (48)$$

Таким образом, измерение частот γ_A и γ_R позволяет определить коэффициент электромеханической связи.

Отношение емкости последовательного колебательного контура C , обусловленной механическими свойствами пьезоэлемента, к параллельной емкости C_1 , связанной с его электрическими параметрами, составляет согласно выражению (48)

$$\frac{C}{C_1} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\kappa}{1 - \kappa^2}. \quad (49)$$

Это отношение также определяется коэффициентом электромеханической связи. При этом чем отношение емкостей больше, тем коэффициент электромеханической связи выше. Такая зависимость обусловлена тем, что энергия упругих деформаций, возникающих в пьезоэлементе, при подаче на него постоянного напряжения U составляет в электрических единицах $\frac{1}{2} C U^2$, а запасаемая в системе электрическая энергия равна $\frac{1}{2} C_1 U^2$.

Фигурирующий в правой части выражения (49) множитель $\frac{8}{\pi^2} \frac{\kappa^2}{1 - \kappa^2}$ обусловлен тем, что при колебаниях кристалла емкость C изменяется в соответствии с геометрическим множителем $8/\pi^2$, а диэлектрическая постоянная, определяющая C_1 , возрастает согласно выражению (47) в $(1 - \kappa^2)$ раз.

9. Основные типы пьезоэлектрических преобразователей и их расчет

В настоящее время в ультразвуковой технике, связанной с использованием высокоэнергетических колебаний все большее распространение получают пьезокерамические преобразователи. Поэтому остановимся на рассмотрении пьезокерамических излучателей.

В расчет пьезокерамических излучателей входят определение следующих параметров: собственной частоты и толщины пьезоэлемента, напряжения, необходимого для возбуждения его, определение его акустической мощности и др. Расчет этих параметров необходим для правильного выбора типа излучателя, а также для определения основных электрических величин, обеспечивающих работу излучателя в оптимальном режиме.

Наибольшее распространение в ультразвуковой технике в настоящее время получили плоские, стержневые, цилиндрические и сферические излучатели. Здесь же остановимся на трех первых типах преобразователей.

Плоские преобразователи представляют собой пьезопластины прямоугольной или круглой формы. Толщина пластины определяется рабочей частотой γ колебаний и при работе на основной частоте на основании выражения (39) может быть найдена как

$$d = \frac{1}{2\gamma} \sqrt{\frac{E_{ю}}{p}} = \frac{C_D}{2\gamma}. \quad (50)$$

Для расчета полуволновых преобразователей обычно пользуются выражением

$$d = \frac{k^1}{\gamma}, \quad (51)$$

где d – толщина пьезопластины, мм; k^1 – частотный коэффициент, кгц·мм (k^1 для кварца равен 2280, для сегнетовой соли – 1540, для титаната бария – 2200).

Кроме полуволновых в практике могут найти применение четвертьволновые и многослойные преобразователи.

Четвертьволновой преобразователь представляет собой систему, состоящую из двух жестко соединенных (склеенных или спаянных) пластин, одна из которых изготовлена из керамики и имеет толщину

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{C_D}{4\gamma}, \quad (52)$$

а вторая – из металла толщиной

$$d_1 = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{C_D}{4\gamma}, \quad (53)$$

где λ и C_D – соответственно длина волны и скорость распространения ультразвука в используемом металле.

Металлическая пластина обычно изготавливается из стали или алюминия.

Многослойный излучатель [6, 16] состоит из тонкой пьезопластины и двух металлических накладок. Собственная частота колебаний такого излучателя и может быть найдена приближенно по выражению (37) или более точно в результате решения уравнения, полученного из условия оптимума удельной акустической мощности:

$$tgk_1 d_1 = \frac{\omega_1 S_1}{\omega S} ctg \frac{kd}{2}, \quad (54)$$

где d_1 и k_1 – толщина и волновой коэффициент накладок; ω и ω_1 – волновые сопротивления пьезоэлемента и накладок; S и S_1 – площади сечения пьезоэлемента и накладок.

Площадь пьезоэлемента определяется, исходя из данной полной акустической мощности P_a и интенсивности I

$$S = \frac{P_a}{I} J_{за}, \quad (55)$$

где $J_{за}$ – электроакустический к.п.д. преобразователя (при ориентировочных расчетах принимается равным 0,5-0,6).

Интенсивность ультразвуковых колебаний, излучаемых полуволновым и четвертьволновым односторонними излучателями, в общем виде может быть определена из выражения

$$I = \frac{1}{2} \xi^2 (pC)_{cp} = \frac{n_i U_{эфф}^2 d_{ij}^2 J_{ам}^2}{9 \cdot 10^{11} (pC)_{cp} d}, \quad (56)$$

где I – интенсивность излучаемых колебаний, Вт/см²; $(pC)_{cp}$ – акустическое сопротивление среды, г/см²·сек; ξ – амплитудное значение колебательной скорости на излучателе; n_i – числовой коэффициент, равный для полуволнового излучателя – 4 и для четвертьволнового излучателя – 1; $U_{эфф}$ – эффективное значение возбуждающего напряжения; d_{ij} – пьезомодуль, $\frac{см}{2} \frac{2}{сек}$.

Интенсивность звука пьезоэлектрических излучателей во многом зависит от качества их изготовления, режима работы, охлаждения и т.п. В среднем можно принять для кварца интенсивность звука до 20 Вт/см².

Для излучателей из пьезокерамики средняя интенсивность звука лежит в пределах до 5 Вт/см², однако при достаточном охлаждении интенсивность может быть и намного большей.

Амплитуда переменного звукового давления может быть определена по выражению

$$P_m = \sqrt{2I(pC)_{cp}}. \quad (57)$$

Амплитуда скорости частиц в жидкости находится как

$$U_m = \sqrt{\frac{2I}{(pC)_{cp}}}. \quad (58)$$

Цилиндрические пьезопреобразователи могут быть основаны на использовании поперечного и продольного пьезоэффекта.

Рассмотрим пьезоэлектрический излучатель, работа которого основана на поперечном эффекте.

Такой излучатель представляет собой цилиндр, изготовленный из керамики, на внешнюю и внутреннюю боковые поверхности которого нанесены электроды. Под действием переменного напряжения периодически изменяется длина средней окружности цилиндра, что приводит к возникновению у него радиальных колебаний.

Рассмотрим действующие силы, вызывающие радиальные колебания цилиндра.

Вырежем из цилиндра элемент [6, 16] с центральным углом $\Delta\varphi$. На концевых гранях его действуют силы F_n . Определяя равнодействующую этих сил, найдем силу, вызывающую радиальные колебания

$$\frac{\Delta F_t}{2} = F_n \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \approx F_n \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (59)$$

поскольку при малом угле $\Delta\varphi$ можно принять $\frac{\Delta\varphi}{2} \approx \sin \frac{\Delta\varphi}{2}$.

Из выражения (59) следует

$$\Delta F_r = F_n \Delta\varphi. \quad (60)$$

На основании выражения (60) можно определить полную радиальную силу F_r , которая равна

$$F_r = \Delta F_r \frac{2\pi}{\Delta\varphi}, \quad (61)$$

или с учетом выражения (59)

$$F_r = 2\pi F_n, \quad (62)$$

Если обозначить через ξ_1 изменение длины средней окружности цилиндра, которое равно $\xi_1 = 2\pi\xi_r$ (где ξ_r – радиальное смещение из среднего положения), то силу упругости, возникающую при деформации ξ_1 длины окружности, можно определить как

$$F_y = \frac{E_{ю} \cdot S^1}{l} \xi_1, \quad (63)$$

где S_1 – площадь продольного сечения цилиндра; H – высота цилиндра; ΔR – толщина стенки цилиндра; l – длина средней окружности цилиндра; R_{cp} – средний радиус пьезоэлемента.

Определим взаимосвязь между силой упругости F_y и радиальной силой упругости F_{ry} . Работа, совершаемая силой на перемещении ξ_1 , должна быть равна работе, совершаемой радиальной силой упругости F_{ry} на перемещении ξ_r

$$F_{ry} \xi_r = F_y \xi_1, \quad (64)$$

откуда следует с учетом выражения (63) для F_y

$$F_{ry} = F_y \frac{\xi_1}{\xi_r} = 2\pi F_y = \frac{2\pi E_{ю} S^1 \xi_r}{R_{cp}}. \quad (65)$$

С другой стороны, силу F_{ry} можно представить как

$$F_{ry} = \frac{1}{C_r} \xi_r, \quad (66)$$

где C_r – радиальная гибкость.

Из выражения (65) и (66) можно найти

$$C_r = \frac{R_{cp}}{2\pi E_{ю} S^1}. \quad (67)$$

Масса цилиндра равна

$$m = p S^1 l, \quad (68)$$

где p – плотность керамики.

Зная C_r и m , находим резонансную частоту радиальных колебаний цилиндра

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_r}} = \frac{1}{R_{cp}} \sqrt{\frac{E_{ю}}{p}} \quad (69)$$

или

$$r_0 = \frac{C_D}{2\pi R_{cp}}, \quad (70)$$

где C_D – скорость звука в пьезокерамике.

Вычисляя длину волны при резонансной частоте, найдем

$$\lambda_0 = \frac{C_D}{\gamma_0} = 2\pi R_{cp}. \quad (71)$$

Таким образом, на резонансной частоте длина средней окружности цилиндра равна длине упругой волны в материале пьезокерамики.

Высота цилиндрического пьезопреобразователя выбирается из следующих соображений. Если высота будет равна половине длины волны, то появится продольный резонанс на частоте резонанса по радиальным колебаниям. Если же будет $H > \frac{\lambda}{2}$, то может возникнуть резонанс на более низких частотах. Поэтому целесообразно принимать высоту цилиндра меньше половины длины волны.

Цилиндрические пьезопреобразователи при внешней излучающей поверхности снабжаются на торцах заглушками. В этом случае для определения резонансной частоты по продольным колебаниям и выбора частоты следует воспользоваться выражением (37).

Вычислим акустическую мощность цилиндрического излучателя. Определим силу F_n на основании выражения (9) найдем

$$F_n = eijES^1, \quad (72)$$

где E – напряженность поля.

Радиальную силу F_r определим, как

$$F_r = 2\pi eijES^1. \quad (73)$$

Подставляя значение силы F_r из выражения (73) в общую формулу для акустической мощности, получим следующее выражение для акустической мощности пьезокерамического цилиндрического излучателя на резонансной частоте:

$$P_a = \frac{1}{2} \frac{F_r^2}{R_s} r_{AM}^2 = \frac{2(\pi eijES^1 r_{am})^2}{R_s}. \quad (74)$$

Если частота и диаметр цилиндра сравнимы с длиной волны, то

$$R_s = (pC)_{cp} S.$$

Выражая напряженность электрического поля E через напряжение, подводимое к электродам, как

$$E = \frac{U}{\Delta R} \quad (75)$$

и учитывая, что

$$ES^1 = \frac{U}{\Delta R} \Delta RH = UH, \quad (76)$$

выражение (74) можно написать в виде

$$P_0 = \frac{2(\pi eijUHr_{om})^2}{(pC)_{cp} S^2}. \quad (77)$$

Определяя интенсивность, найдем

$$I = \frac{P_a}{S} = \frac{2(\pi eijUHr_{om})^2}{(pC)_{cp} S^2}. \quad (78)$$

Цилиндрический пьезопреобразователь, работа которого основана на продольном пьезоэффекте, схематично показан на [6, 16]. Конструктивно он выполняется в виде набора призматических пьезоэлементов, устанавливаемых по окружности цилиндра длинной стороной призмы вдоль образующей. Электроды располагаются между соседними призмами, соединяясь между собой через один.

Расчет такого преобразователя аналогичен рассмотренному выше. Сила F_r в данном случае возникает благодаря продольному пьезоэффекту

$$F_r = 2\pi F_n - 2\pi e_{33} S^1 E. \quad (79)$$

Вычисляя акустическую мощность, получим

$$P_0 = \frac{2(\pi e_{33} ES^1 r_{om})^2}{(pC)_{cp} S}. \quad (80)$$

Стержневые пьезоэлектрические преобразователи конструктивно выполняются в виде призматических или цилиндрических пьезоэлементов, каждый из которых устанавливается на металлическом резонирующем основании (см. [6, 16]). Элементы работают на поперечном пьезоэффекте при колебаниях по длине. Излучение осуществляется внешней стороной стального основания.

Условием резонанса является равенство

$$tgk_2 l_2 = -\frac{w_1 S_1}{w_2 S_2} tgk_1 l_1. \quad (81)$$

Следовательно, имеем

$$2\pi \frac{l_1}{\lambda_1} = 2\pi \frac{l_2}{\lambda_2} = \frac{\pi}{2}. \quad (82)$$

или

$$\frac{l_1}{\lambda_1} = \frac{l_2}{\lambda_2} = \frac{1}{4}. \quad (83)$$

Как видно из выражения (83), при резонансе как на длине пьезокерамического стержня, так и на длине элемента резонирующего основания накладки укладывается четверть длины волны. Следовательно, излучатель является четвертьволновым.

Если резонансная частота равна γ_0 , то

$$l_1 = \frac{C_{D1}}{4\gamma_0}; l_2 = \frac{C_{D2}}{4\gamma_0}, \quad (84)$$

где C_{D1} и C_{D2} – скорости распространения упругой волны соответственно в пьезоматериале и в материале накладок.

При резонансе амплитуда скорости смещения излучающей поверхности такого излучателя определяется выражением

$$\xi_m = \frac{F_m}{R_m} \frac{w_2 S_2}{w_1 S_1}, \quad (85)$$

где w_1 и w_2 – удельное волновое сопротивление пьезоэлемента и накладки; S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения пьезоэлемента и накладки.

Амплитуда движущей силы F_m согласно выражению (9) равна

$$F_m = e_{31} S^1 E_m, \quad (86)$$

где E_m – амплитуда напряженности электрического поля.

Заменив в выражении (85) механическое сопротивление R_m на R_s/r_{am} , получим

$$\xi_m = \frac{e_{31} S^1 E_m r_{am}}{R_s} \frac{w_2 S_2}{w_1 S_1} \quad (87)$$

или

$$\xi_m = \frac{e_{31} S E_m r_{am} \sigma^1}{R_s}, \quad (88)$$

где R_s – акустическое сопротивление среды;

$$\sigma^1 = \frac{w_2 S_2}{w_1 S_1}.$$

Вычисляя акустическую мощность, находим

$$P_a = \frac{(e_{31} E_m S^1 \sigma^1 r_{am})^2}{R_s}. \quad (89)$$

Как видно из приведенных выше выражений, для определения акустической мощности и интенсивности, значения последних существенно зависят от напряженности электрического поля и соответствующего напряжения, подводимого к пьезоэлементу.

При этом для обеспечения максимальной мощности излучения необходимо выбирать возможно большее рабочее напряжение. U_{max} определяется целесообразностью работы пьезоэлемента на линейном участке характеристики «напряжение-деформация» и необходимостью обеспечения достаточной надежности против пробоя пьезоэлемента.

Предельная величина рабочего напряжения для керамики составляет 10-20% от напряжения поляризации. При поляризации отдельных видов пьезокерамики напряженность поля колеблется в пределах $7000 \div 14000$ В/см. Поэтому при толщине пьезоэлемента d , принимая рабочее напряжение равным 25% от напряжения поляризации, получим

$$U_{max} = 0,15(7000 \div 14000) \text{ а, в.}$$

При использовании кварцевых пьезоэлементов для получения той же мощности напряжение U_{max} необходимо принять в 80-100 раз больше, чем для керамики.

Может быть так, что исходя из заданной акустической мощности, напряжение U_{max} окажется выше значения, определенного в формуле (90). В этом случае для обеспечения заданной мощности излучения необходимо принять не один, а несколько пьезопреобразователей или заменить обычный излучатель фокусирующим.

10. Конструктивное оформление пьезопреобразователей

Конструктивное оформление преобразователей определяется рядом требований, обусловленных особенностями работы колебательных систем, а также их назначением и условиями применения. Одним из этих требований является крепление пьезоэлемента, подвод к нему электрического напряжения, защита пьезоэлемента от агрессивной среды и др.

Простейший пьезопреобразователь (на основе плоского круглой формы пьезоэлемента) для одностроннего излучения приведен на [6, 16].

Преобразователь включает пьезоэлемент и корпус, между которыми может быть помещена акустическая резина, оказывающая незначительное сопротивление со стороны пьезоэлемента, противоположной излучающей стороне и кабель, подводящий электрическое напряжение.

Корпус пьезопреобразователя может быть выполнен как из металлов, так и из других материалов, обладающих достаточной механической прочностью, пьезоэлемент крепится в корпусе по средней линии (по

толщине). В этом случае максимально снижаются потери, связанные с передачей колебаний корпусу преобразователя при работе на основной частоте колебаний полуволнового пьезоэлемента.

При креплении активного элемента пьезопреобразователя в зонах, не соответствующих пучности деформации, могут быть использованы различные способы акустической развязки колебательной системы с корпусом преобразователя или с технологической ванной. При этом для обработки токопроводящих жидкофазных сред используются обрезиненные преобразователи [6, 16] или же преобразователь является конструктивным элементом технологической ванны (дном, стенкой).

Для интенсификации различных технологических процессов используются преобразователи, представляющие собой один или несколько отдельных пьезоэлементов, которые в виде мозаики наклеены на общую металлическую пластину. При этом толщина пластины равна половине длины волны. Пластина с наклеенными на ней пьезоэлементами является крышкой корпуса преобразователя. В корпус заливается масло, которое служит для охлаждения преобразователя. Охлаждение масла осуществляется с помощью змеевика с проточной водой.

В лабораторной практике применяются ультразвуковые установки, в которых преобразователями служат пьезоэлементы, вырезанные из кристаллов кварца. Ванна с пьезокварцевым преобразователем [6, 16] состоит из корпуса 1 с крышкой 2, куда помещается колба с обрабатываемым материалом 7. Пьезоэлемент 3 вместе с держателями 4 погружают в трансформаторное масло, которое служит электрическим изолятором, а также звукопроводящей и охлаждающей средой. Трансформаторное масло охлаждается водой, циркулирующей в охлаждающей рубашке. Для проведения питающего напряжения от генератора используется кабель 11.

Рассмотренные конструкции пьезоэлектрических преобразователей предназначены для получения высокочастотных звуковых колебаний (порядка 150-2000 кГц). Преобразователь из пьезокерамики, работающий на низких частотах порядка 20 кГц, должен иметь толщину около 100 мм. Плохая теплопроводность и большой объем приводит к быстрому ее разогреву и деполяризации. Толстая керамика требует высоких рабочих напряжений для возбуждения, что значительно усложняет конструкцию преобразователя. Снижение рабочей частоты преобразователя без увеличения толщины пьезоэлемента достигается применением частотопонижающих накладок.

Преобразователь [6, 16] состоит из двух керамических пластин из материала ЦТС – 19, верхней накладки 2 из дюралюминия Д16, нижней накладки 3 из стали 45 и прокладки 4 толщиной 0,2-0,3 мм из алюминиевой фольги. Накладка 2 является излучающей, а накладка 3 – отражающей.

Преобразователь рассчитан на частоту $f=22$ кГц. Его удельная акустическая мощность выбирается равной $1 \div 2,5$ Вт/см². Механоакустический и электроакустический к.п.д. составляют соответственно 0,6 и 0,5.

Данные электрического и конструктивного расчета преобразователя мощностью 100 Вт следующие:

площади накладок, см² – 25;

размеры пластины, мм – 50;

высота накладок:

верхней, мм – 48;

нижней, мм – 32;

напряжение возбуждения, В – 700;

эквивалентная емкость преобразователя, пФ – 1500;

ток через преобразователь, А – 0,18.

Для уменьшения напряжения на преобразователе пьезоэлемент набирается из двух пьезоэлектрических пластин толщиной $d = \frac{\lambda}{2}$ таким образом, чтобы контактирующие между собой поверхности пьезоэлемента

имели один и тот же знак поляризации. При этом обе накладки заземляются, а переменное напряжение относительно земли подается на прокладку между пьезоэлементами.

В этом случае все сопротивление преобразователя на резонансной частоте составляет четвертую часть от сопротивления преобразователя с одним пьезоэлементом, а напряжение уменьшается в два раза.

Создание жесткого акустического контакта элементов можно обеспечить с помощью болтового соединения. Некоторые конструкции преобразователей [6, 16] стягиваются с помощью болтов и фланцев. Недостатки фланцевого соединения: увеличиваются поперечные размеры преобразователя, появляются паразитные изгибные колебания, соединение недостаточно надежно при длительной эксплуатации.

В последних конструкциях преобразователей стягивание элементов осуществляется с помощью одного центрального болта, проходящего через отверстия в пьезокерамических пластинах и накладках [6, 16].

Технические данные преобразователя этого типа:

резонансная частота преобразователя, кГц – 18,5;

подводимое напряжение, В – 400;

ток через преобразователь, А – 0,6;

мощность преобразователя, Вт – 100;

амплитуда вибрации, $\mu\text{к}$ – 2;

электроакустический к.п.д., % – 45.

Для увеличения мощности и поверхности излучения используются составные пьезокерамические преобразователи [6, 16], представляющие собой три квадратные стальные пластины (со стороной квадрата 50 мм), стянутые в середине болтом. Между пластинами зажаты по четыре диска из пьезокерамики диаметром

25 мм и толщиной 6 мм. В среднем толщина каждой пластины составляет 12 мм. Изменяя толщину стальных пластин, можно в широком диапазоне менять частоту многослойного преобразователя.

Для ультразвуковой механической обработки твердых материалов могут использоваться колебательные системы, в которых в качестве преобразователя используется составной пакетный преобразователь [6, 16], или цилиндрический пьезокерамический преобразователь, колеблющийся по длине [6, 16].

В настоящее время промышленностью серийно выпускаются ультразвуковые установки для работы на жидкие среды типа УЗУ – 0,1 и УЗУ – 0,2, в комплект которых входят генераторы мощностью 0,1а и 0,25 кВт и ванны емкостью 5 л с четырьмя пьезокерамическими преобразователями типа ПП2 – 0,1/18 (см. [6, 16]).

Разработаны также конструкции пьезокерамических преобразователей мощностью 0,8; 1,6 и 2,5 кВт на частоты 16 и 18 кГц, основанные на принципе мозаики из однотипных пакетных преобразователей. Суммарная площадь излучающих поверхностей преобразователей составляет треть от общей рабочей поверхности излучающей пластины. Системы преобразователей на разные номинальные мощности набираются из типовых секций. Одна секция состоит из 6 пакетных преобразователей [6, 16]. Системы мощностью 1,6 и 2,5 кВт состоят, соответственно, из двух и трех секций, образующих единые излучающие поверхности, встраиваемые в стенки ванн. Параметры одной секции из шести преобразователей следующие:

напряжение питания, В – 500;
потребляемая мощность, Вт – 800;
полное сопротивление, Ом – 180;
рабочая площадь, см² – 780.

Литература

1. Авраменко М.Д., Баранова М.А., Бородин В.И., Майков В.Г., Шур Я.С. Статистические и динамические магнитные свойства магнитоотрицательных железоалюминиевых сплавов //Тр. VI Всесоюзной акустической конференции. – М., 1968.
2. Андреев Н.Н. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение //Электричество. – 1947. – №2.
3. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М., 1956.
4. Булычева З.Н., Гурвич Е.И., Селицкий Я.П. Магнитные сплавы, применяемые в звуковой технике. //Применение ультразвука в промышленности. – М.: Машгиз, 1959.
5. Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря /Пер. с франц. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
6. Глоzman И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1967.
7. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967.
8. Новицкий Б.Г., Фридман В.М., Чижов М.П. Кольцевые цилиндрические магнитоотрицательные излучатели //Ультразвуковая техника. – 1964. – №5.
9. Применение ультразвука в технологии машиностроения //Тр. НИТИ. – М., 1964.
10. Рой Н.А. Температурная зависимость электроотрицательных и упругих свойств керамического титаната бария //Акустический журнал. – 1955. – Т.1. – Вып 3.
11. Смоленский Г.А., Жуков В.А. Сегнетоэлектрики. – Л.: Изд. Общество по распространению политических и научных знаний РСФСР, 1957.
12. Стамов-Витковский А.В., Бирюкова П.П. Магнитоотрицательные преобразователи с равномерно распределенным полем //Развитие теории и практики внедрения прогрессивной ультразвуковой технологии в машиностроении. – М., 1965.
13. Теумин И.И. Определение размеров пакета магнитоотрицательного преобразователя //Ультразвуковая техника. – 1964. – №5.
14. Атаманян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Уч. пособие для студ. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
15. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая аппаратура промышленного назначения. – М.: Энергия, 1967. – 254 с.
16. Тютюнник П.М. Ультразвуковая и звуковая техника /Московский горный институт. – М., 1973. – 104 с.
17. Ямицкий В.С. Методы и средства исследования и контроль горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
18. Ямицкий В.С. Контроль процессов горного производства. – М.: Недра, 1989. – 446 с.
19. Прибор ультразвуковой ГСП УК – 10 ПМС. Руководство по эксплуатации ЩЮЗ.031.007 РЭ. 3-д Электро-точприбор. – Кишинев, 1989. – 73 с.

Таблица 1

Физико-механические характеристики пьезоматериалов

Пьезоматериал	Срез	Пьезоэлектрический модуль $d_{ij} 10^{-12}, \text{м/В}$	Пьезоэлектрическая константа, н/Вм	Пьезоэлектрическая константа давления $g 10^{-3} \text{В/Н}$	Пьезоэлектрическая константа деформации $h 10^3, \text{В/м}$	Коэффициент электромеханической связи	Добротность	Диэлектрическая постоянная	Плотность $\rho 10, \text{кг/м}^3$	Скорость распространения упругих колебаний $C 10^3, \text{м/сек}$	Удельное волновое сопротивление $\rho c, \text{кг/м}^2 \cdot \text{сек}$	Модуль Юнга $E_{10} 10^{10}, \text{Н/м}^2$	Предельное механическое напряжение $\sigma_n 10^6, \text{Н/м}^2$	Температура точки Кюри $t_{\text{кр}} 0 \text{C}$
Кварц	ох	2,3	0,17	57	4,8	10	10^6	4,5	2,65	5,74	15,4	8,6	95	550
Сегнетова соль	45°	36/25 11/55	36/25 0,11/0,08	36/25 160/600	36/25 1,6/1,9	29	10^3	9,4	1,77	2,4	4,3	1,0	14	45
Сульфат лития	0°	16	0,9	190	9	38	10^3	10,3	2,06	5,46	11,2	6,2	15	75
Титанат бария	-	150	16,7	12	1,2	50	400	1200	5,5	5,68	31,2	18,0	80	100
Цирконат-титанат свинца	-	33	16,7	33	1,7	50	400	1200	7,0	5,0	35,0	20,0	80	350
Метаниобат свинца	-	165	4,8	40	1,2	42	11	225	5,8	2,76	16,0	0,46	-	550

П.И. Пахомов

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ Методическое пособие

Редактор И.С. Волоскова
Технический редактор Э.К. Гаврина
Корректор О.А. Матвеева
Компьютерная верстка Д.Р. Зайнулина

Подписано к печати 21.10.2001. Формат 60x84 $1/16$.
Офсетная печать. Объем 2,5 п.л.
Тираж 30 экз. Заказ 157.

Издательство Кыргызско-Российского Славянского университета
720000, Бишкек, Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ

720000, Бишкек, Шопокова, 68