

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

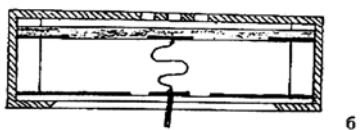
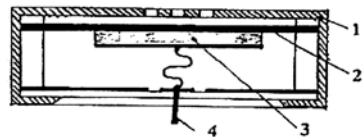
М.К.КЕРИМОВ, М.А.КУРБАНОВ, Г.М.ГЕЙДАРОВ, М.А.НУРИЕВ

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 33*

Исследованы физико-технологические особенности создания акустоэлектрических преобразователей на основе пьезокомпозитных элементов. Определены влияния состава, напряжения и температуры поляризации, конфигурации электрического поля поляризации, геометрических размеров и формы монолитного биморфного пьезоэлектрического элемента на АЧХ композитных акустоэлектрических преобразователей. Показано, что акустоэлектрический преобразователь с выпуклым пьезоэлементом, поляризованным тангенциально, при чувствительности $1,5 \div 2,5 \text{ мВ/Па}$ имеет относительно широкий частотный диапазон $0,1 \div 10,0 \text{ кГц}$ и может быть применен в различных областях электроакустики. Кроме того, пьезоэлементы, поляризованные тангенциально, могут быть применены в вибродатчиках, сейсмодатчиках и ларингофонах.

Известно, что повышение эффективности пьезоэлектрических преобразователей (высокая чувствительность и излучаемая способность, широкий частотный диапазон, низкая неравномерность амплитудно-частотной характеристики АЧХ) осуществляется либо увеличением электрофизических и физико-механических характеристик пьезоэлектрического элемента, вариацией его состава и технологии получения [1,2,3], либо оптимизацией конструктивных параметров функциональных элементов преобразователей [2-4].

Целью данной работы является определение влияния состава, напряжения (U_n) и температуры (T_n) поляризации, конфигурации электрического поля поляризации, геометрических размеров и формы монолитного биморфного пьезоэлектрического элемента на АЧХ композитных акустоэлектрических преобразователей.



Были использованы преобразователи, которые конструктивно показаны на Рис.1. В качестве пьезоэлектрического элемента использованы пьезокомпозиенты трех видов: плоский пьезокомпозиционный элемент на металлической мембране (Рис.1,а), плоский пьезокомпозиционный элемент без мембраны (Рис.1,б), пьезокомпозиционные элементы сферического сегмента с различными радиусами кривизны (Рис.1,в).

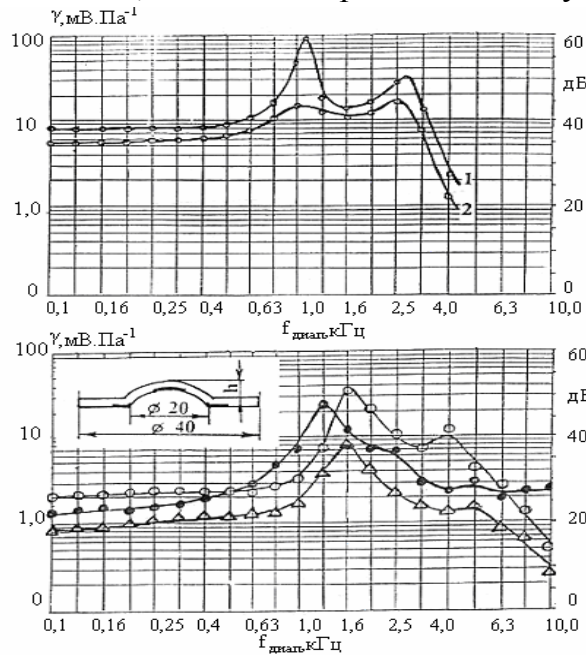
Рис.1.

Пьезокомпозитные преобразователи: а – плоский пьезоэлемент на металлической мембране; б – плоский биморф на основе монолитного пьезокомпозиента, поляризованного тангенциально; в – биморф в виде сферического сегмента, поляризованный тангенциально.

Пьезоэлементы первого вида поляризованы в электрическом поле, вектор напряженности которого направлен перпендикулярно поверхности пьезоэлемента (нормальная поляризация, режим А), для второго и третьего вида пьезоэлементов вектор напряженности электрического поля поляризации направлен параллельно поверхности элемента (тангенциальная поляризация, режим Б). Композиты

получены на основе полипропилена (ПП), поливинилидентфорида (ПВДФ) и пьезокерамики семейства цирконата-титаната свинца типа ПКР-7М, ПКР-3М.

На Рис.2 представлена типичная АЧХ акустоэлектрических пьезопреобразователей. Видно, что она характеризуется несколькими интервалами частот, в которых амплитуда выходного сигнала преобразователя

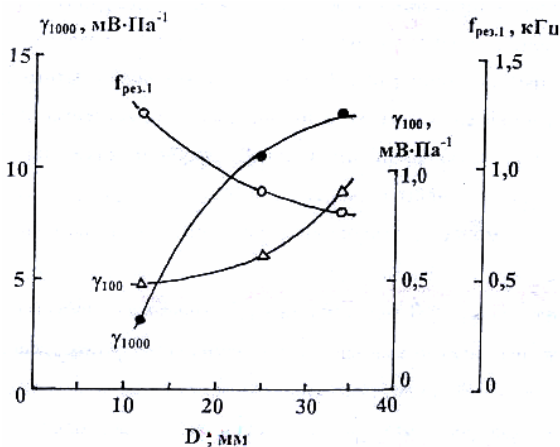


(чувствительность γ , $mB/Па$) практически остается неизменной (γ_1 , γ_2), резонансами при определенных частотах (f_1 , f_2), амплитудой при резонансе ($\gamma_{рез}$), частотными диапазонами ($f_{диап}$) и неравномерностью АЧХ.

Рис.2.

АЧХ пьезокомпозитных преобразователей 40мм на основе композита Ф2МЭ+60% ПКР-7М. а – с плоским биморфным элементом: 1– пьезоэлемент в обычно корпусе, 2– тот же пьезоэлемент после сглаживания частотной характеристики. б – с пьезоэлементом в виде сферического сегмента в центре диаметром 20мм: 1– высота сегмента – $h=1$ мм; 2– $h=1,5$ мм; 3– 2мм.

На Рис.3 представлены зависимости чувствительности (γ) и резонансной частоты от диаметра (D) пьезоэлемента преобразователя. Экспериментальные данные показывают, что зависимости чувствительности преобразователя при 100 и 1000Гц от диаметра, то есть $\gamma_{100}=f(D)$ и $\gamma_{1000}=f(D)$, несколько отличаются: γ_{100} с увеличением D пьезоэлемента растет быстрее, чем по линейному закону, а γ_{1000} с увеличением D сначала растет и постепенно стремится к насыщению. Частота резонанса преобразователя с увеличением D уменьшается. Остальные параметры преобразователя с пьезокомпозитным элементом, поляризованным по режиму А, представлены в Таблице1: чувствительность при частоте $f=100$ Гц (γ_{100}), чувствительность при частоте $f=1000$ Гц (γ_{1000}), частота первого резонанса ($f_{рез1}$), частота второго резонанса ($f_{рез2}$), частотный диапазон ($f_{диап}$), неравномерность АЧХ и чувствительность при резонансе ($\gamma_{рез}$). Видно, что с увеличением диаметра



пьезокомпозитного элемента параметры преобразователя изменяются следующим образом: чувствительность преобразователя при резонансе имеет тенденцию к росту; частота второго резонанса сначала уменьшается, а затем стабилизируется; частотный диапазон несколько уменьшается; неравномерность АЧХ практически остается неизменной.

Рис.3.

Зависимость γ_{100} , γ_{1000} и $f_{рез1}$ от диаметра (D) для нормально поляризованного пьезокомпозита Ф2МЭ+ПКР-3М с металлической мембраной.

В Таблице 1 приведены также аналогичные характеристики акустоэлектрического преобразователя с использованием в качестве активного элемента пьезокерамики ЦТС-19 (тетрагональная структура), диаметром 25мм. Видно, что параметры пьезокерамических и композитных преобразователей практически одинаковы, но в случае пьезокомпозитного элемента частотный диапазон несколько шире, а неравномерность АЧХ больше (Рис.4).

Таблица 1.

Изменение параметров преобразователей в зависимости от диаметра (d) пьезоэлемента на медной мембране диаметром $D_M=40$ мм, толщиной $h_M=100$ мкм и толщиной элемента $h_{эл}=250$ мкм.

Диаметр пьезоэл. на мембране, $d_{эл}$ (мм)	12	25	34	Керамика ЦТС-19
γ_{100} , мВ/Па	0,5	0,65	0,9	1,2
γ_{1000} , мВ/Па	3,0	10,0	13,5	5,5
$F_{рез}$, мВ/Па	1,25	0,87	0,78	0,83
$\gamma_{рез}$, мВ/Па	~28	~30	~39	~40
$F_{рез}$, 2 кГц	4,0	3,15	3,15	2,7
$F_{диап}$, кГц	0,1÷8,0	0,1÷4,0	0,1÷3,0	0,1÷3,0
Неров. АЧХ, дБ	~35	~33	~37	~26

Полученные многочисленные результаты показывают, что создание биморфных монолитных пьезокомпозитов приводит к увеличению чувствительности и частотного диапазона преобразователя. Указанную задачу можно решить, если в качестве пьезоактивных элементов использовать тангенциально поляризованные (режим Б) и сильно гетерогенные по структуре композиты полимер-пьезокерамики. Анизотропность по толщине поляризации в этих элементах позволяет получить на их основе биморфы без применения металлических мембран. Далее нами приводятся результаты исследования АЧХ только для преобразователей, созданных на основе тангенциально поляризованных биморфных монолитных пьезокомпозитов.

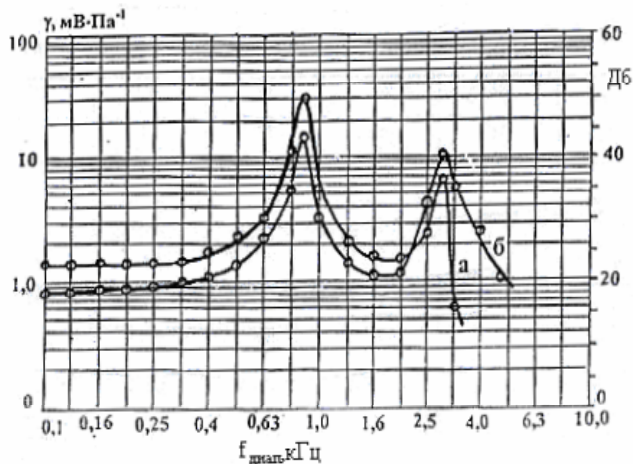


Рис.4.

АЧХ плоского керамического биморфного преобразователя медной мембраной (а) и идентичного пьезокомпозитного преобразователя (б).

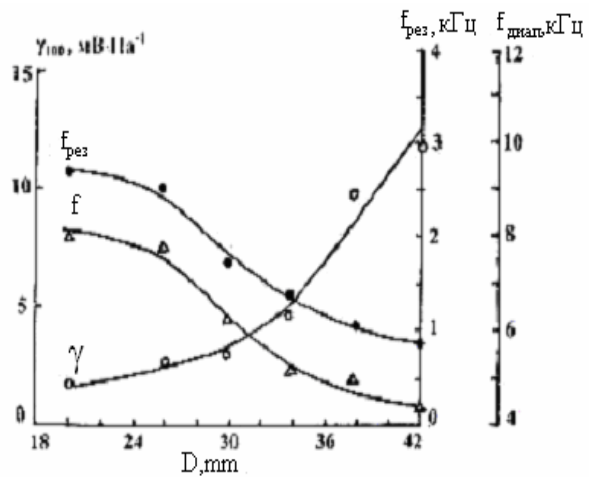


Рис.5.

Зависимость γ_{100} , $f_{рез}$ и $f_{диап}$ от диаметра (D) тангенциально поляризованных пьезокомпозитов.

На Рис.5 представлены зависимости чувствительности (γ_{100}), резонансной частоты ($f_{рез}$) и частотного диапазона ($f_{диап}$) преобразователя от диаметра (d) пьезокомпозиционного элемента. Экспериментальные данные показывают, что γ с увеличением диаметра пьезоэлемента растет быстрее, чем по линейному закону. Однако, частота возникновения первого резонанса (Рис.3) и частотный диапазон преобразователя с ростом d уменьшается (Таблица 2).

Таблица 2

Характеристики микрофонов с различными диаметрами активного элемента (d) и корпуса (D).

Дк,мм	20	26	30	34	38	42
d,мм	14	18	22	26	30	36
γ_{100} , мВ/Па	1,8	1,2	2,3	4,7	10,0	12,4
γ_{1000} , мВ/Па	2,5	2,2	2,7	19,0	82,0	43,0
$f_{рез}$, кГц	2,7	2,2	1,8	1,25	1,1	0,9
$\gamma_{рез}$, мВ/Па	~42,0	~48,0	~62,0	~98,0	~220	~200
$f_{рез,2}$ кГц	~6,8	6,3	5,0	~4,0	3,5	3,15
$F_{диап}$, кГц	0,1÷8,0	0,1÷8,0	0,1÷6,3	0,1÷5,0	0,1÷4,6	0,1÷3,5
Неров.АЧХ, dB	~30	~27	~30	~28	~26	~31

Видно, что чувствительность преобразователя при резонансах в зависимости от диаметра изменяются по очень сложному закону, а частота второго максимума с ростом D уменьшается, неравномерность АЧХ с увеличением D растет.

Перейдем к обсуждению результатов исследований по влиянию технологических факторов на АЧХ преобразователей. В качестве технологических факторов, непосредственно влияющих на пьезомодуль d_{33} и γ пьезокомпозиционных элементов, нами выбрано объемное содержание (Φ) и структура пьезоэлектрической фазы, полярность полимерной фазы и капсулирование пьезочастиц смолой, позволяющей усиливать межфазные взаимодействия.

Эксперименты показывают, что γ и $f_{рез}$ с увеличением объемного содержания ПКР-7М в композите растут, и рост их ограничивается с ухудшением механической прочности пьезоэлемента при $\Phi > 60\%$ объема. Большое значение имеет выбор полимерной матрицы при разработке биморфной монолитной пьезоэлектрической системы на основе тангенциально поляризованных композитов. Из Рис.6,а видно, что среди использованных в качестве матрицы полимеров наиболее эффективным, с точки зрения получения высокочувствительных монолитных пьезоэлементов для пьезопреобразователей, являются композиты на основе фторуглеродистого полимера типа Ф2МЭ. АЧХ преобразователя на основе композитов Ф2МЭ и пьезокерамики различной структуры имеют широкий частотный диапазон по сравнению с преобразователями, полученными с использованием других полярных и неполярных полимеров. Самое низкое значение чувствительности получается для преобразователя, полученного на основе полипропилена (ПП).

Ранее нами были показаны, что интенсивность развития электронно-ионных и поляризационных процессов при электротермополяризации, а также пьезоэлектрические и механические свойства композитов полимер-пьезокерамика зависят от межфазных взаимодействий [5]. Именно межфазные взаимодействия определяют степень потери механической энергии на границе раздела фаз. Этот эффект будет расти с увеличением частоты механического возмущения и следовательно, этим эффектом определяется частотный диапазон

акустоэлектрического преобразователя. Межфазным взаимодействием определяется также упругость пьезокомпозитного элемента, которая связана с коэффициентом электромеханической связи (K) преобразователя, как

$$K^2 = \frac{d_{ij}^2}{\epsilon^\sigma S^E} = \frac{g^2 \epsilon^\sigma}{S^E},$$

где S^E - податливость пьезоэлемента. Одним из технологических способов увеличения межфазного взаимодействия в полимерных композитах является использование третьего компонента, имеющего высокую адгезию как к полимеру, так и диспергатору, в частности к ПВДФ и пьезокерамики ПКР-7М. В наших исследованиях в качестве третьего компонента использована смола типа ЭД-20, имеющая вышеуказанные качества. На Рис.6,б приведены зависимости γ_{100} , $f_{рез}$, $U_{рез}$ и $f_{диап}$ от объемного содержания смолы в композите ПВДФ + ПКР-7М + ЭД-20.

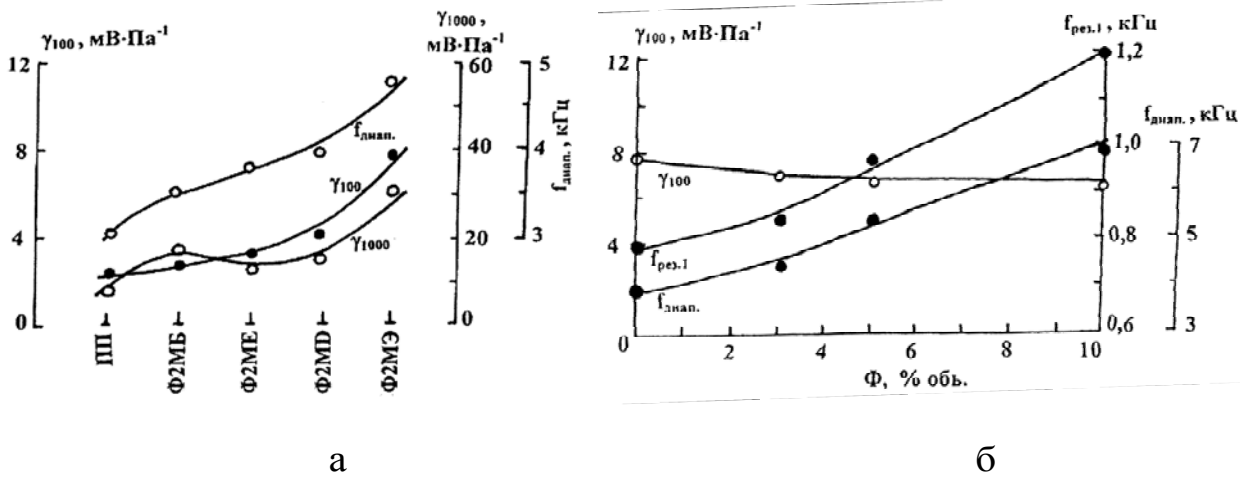


Рис.6.

а - Диаграмма изменения γ_{100} , γ_{1000} и $f_{диап}$ для композитов с различными полимерными матрицами, $\Phi=60\%$ объема ПКР-7М. б - Зависимость γ_{100} , $f_{рез1}$, $f_{диап}$ от содержания смолы ЭД-20 в трехкомпонентных композитных Ф2МЭ+ПКР-7М+ЭД-20, содержание ПКР-7М 60% объема.

Видно, что с увеличением объемного содержания ЭД-20 $f_{рез}$, $\gamma_{рез}$ и $f_{диап}$ преобразователя возрастает, а γ_{100} имеет тенденцию к уменьшению. Дальнейшее увеличение объемного содержания ЭД-20 в композите ограничено заметным уменьшением пьезоэлектрических характеристик (d_{ij}) пьезоэлемента и γ_{100} преобразователя на его основе. Остальные характеристики акустоэлектрического преобразователя на основе композита Ф2МЭ + ПКР-7М + ЭД-20 приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Изменение параметров АЧХ преобразователей в зависимости от содержания смолы ЭД-20. Содержание ПКР-7М-60% объема.

$\Phi_{смола}, \% об.$	0 %	3%	5%	10%
$\gamma_{100}, мВ/Па$	7,8	6,8	6,9	6,5
$\gamma_{1000}, мВ/Па$	14	17	18	53
$f_{рез,1}, кГц$	0,8	0,85	0,95	1,2
$\gamma_{рез}, мВ/Па$	110	120	160	180
$f_{рез,2}, кГц$	2,4	2,7	3,5	4
$f_{диап}, кГц$	0,1÷4,0	0,1÷4,5	0,1÷5,6	0,1÷6,3
Неров.АЧХ, dB	25	25	30	28

В качестве технологического фактора нами было рассмотрено влияние режима поляризации на АЧХ акустоэлектрического преобразователя. В качестве изменяющегося параметра при поляризации было выбрано электрическое напряжение.

Таблица 4.

Изменение параметров АЧХ преобразователей в зависимости от напряжения поляризации для Ф2МЭ+ПКР-7М $T_{пол}=120^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$ объема.

Напряж. поляр., кВ параметры	1кВ	2кВ	3кВ	4кВ
γ_{100} , мВ/Па	1,0	2,2	4,5	7,8
γ_{1000} , мВ/Па	6,0	11	18	35
$f_{рез,1}$, кГц	0,8	0,9	0,9	1,0
$\gamma_{рез}$, мВ/Па	15	60	90	110
$f_{рез,2}$, кГц		2,5	2,7	3,5
$f_{диап}$, кГц	0,1÷4,0	0,1÷3,15	0,1÷4,0	0,1÷5,0
Неров.АЧХ, dB	25	30	27	25

В Таблице 4 приведены основные характеристики преобразователя на основе композита Ф2МЭ+ПКР-7М в зависимости от напряжения поляризации. Экспериментальные результаты показывают, что напряжение поляризации существенно влияет на чувствительность акустоэлектрического преобразователя для всех исследованных нами частот. Дальнейшее увеличение величины напряжения поляризации U_n ограничено возникновением по поверхности пьезоэлемента электрических разрядов при электротермополяризации композитов. Отметим, что эффект улучшения АЧХ преобразователей в зависимости от напряжения поляризации практически сохраняется при всех исследованных нами объемных содержаниях пьезокерамики, в частности, ПКР-7М в композите.

Далее, были изучены преобразователи, где в качестве преобразующего пьезокомпозитного элемента использован композит диаметром 40мм, содержащий сферический сегмент диаметром 20мм, и с разной высотой h в центре (см. Рис.2).

На Рис.2б представлена амплитудно-частотная характеристика микрофонов на основе пьезокомпозита состава Ф2МЭ+60%ПКР-7М. Высота сферического сегмента h образцов изменилась дискретно и составляла 1мм, 1,5 мм и 2мм. Из АЧХ (Рис.2, а,б) видно, что пьезокомпозиты со сферическим сегментом имеют относительно широкий динамический диапазон, а микрофоны с пьезокомпозитом со значением $h=1,5\text{мм}$ имеют относительно лучшую частотную характеристику и оптимальную чувствительность. Можно считать, что улучшение динамического диапазона пьезоэлементов связано увеличением механической упругости плоского пьезоэлемента после формования его в форме пьезоэлемента со сферическим сегментом. Формование сферического элемента из плоского пьезокомпозита проводилось в прессформах, с соответствующими конструкциями пуансонов.

Таким образом, изучая АЧХ различных видов преобразователей можно заключить, что акустоэлектрические преобразователи (микрофоны) с плоским тангенциально поляризованным пьезоэлементом в корпусе с диаметром 40÷42мм имеют относительно высокую чувствительность (8-10 мВ/Па) и широкий динамический диапазон (0,1÷3,6÷4кГц) и могут быть применены в телефонии. Акустоэлектрический преобразователь с выпуклым пьезоэлементом, поляризо-

ваным тангенциально, при чувствительности (1,5÷2,5)mВ/Па имеет относительно широкий динамический диапазон (0,1÷10,0)Кгц и может быть применен в различных областях электроакустики. Кроме того, пьезоэлементы поляризованные тангенциально могут быть применены в вибродатчиках, сейсмодатчиках и ларингофонах.

1. А.И.Богатырев, И.В.Вовк, В.Н.Олейник, *Акустический вестник*, № 1 (2001) 3.
2. *Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. Под общей ред. И.Н.Ермолова. Москва. Машиностроение, (1986) 275.*
3. М.А.Курбанов, А.М.Магеррамов, М.А.Нуриев, Р.С.Исмаилова, Р.Б.Ибрагимов, *Проблемы Энергетики, НАН Азербайджана Институт Физики*, №4 (2004) 27.
4. А.М.Магеррамов, М.А.Нуриев, *Физика*, 5 № 2 (1999) 46.
5. М.К.Керимов, М.А.Курбанов, А.О.Оруджев, Г.Г.Алиев, И.Н.Оруджев, *Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, series of physical-mathematical and technical sciences, physics and astronomy*, XXIII №5(1) (2003) 89.

PYEZOELEKTRİK ELEMENTLƏR ƏSASINDA ELEKTROAKUSTİK ÇEVİRİCİLƏRİN YARADILMASININ XÜSUSİYYƏTLƏRİ

M.K.KƏRİMOV, M.Ə.QURBANOV, Q.M.QEYDAROV, M.A.NURİEV

Pyezokompozit elementlər əsasında akustik çevricilərin yaradılmasının fiziki-texnoloji xüsusiyyətləri tədqiq edilir. Monolit-bimorf püzelektrik elementin tərkibinin, polarizasiya gərginliyinin və temperaturunun polarizasiya elektrik sahəsinin konfigurasiyasının elementin həndəsi ölçüləri və formasının kompozit akustik çevricinin amplitud-tezlik xarakteristikasına təsiri müəyyən edilir.

Göstərilmişdir ki, tangensial polarlaşmış qabarıq pyezoelementə malik akustik çevrici 1,5÷2,5 həssaslığında nisbətən geniş dinamik tezlik 0,1÷10,0kHs malikdir və elektroakustikanın müxtəlif sahələrində tətbiq oluna bilər. Bundan başqa tangensial polarlaşmış pyezoelementlər vibratçik. Seysmodatçik və larinqafonlarda tətbiq oluna bilər.

FEATURES OF CREATION OF ELECTROACOUSTIC TRANSDUCERS THE BASIS OF PIEZOCOMPODITE ELEMENTS

M.K.KERIMOV, M.A.KURBANOV, G.M.GEYDAROV, M.A.NURIEV

Physico – technological features of creation of acousto-electrical transducers on the basis of piezocomposite elements have been investigated. Influences of content, voltage and temperature of polarization, configuration of polarization electric field, geometrical dimensions and form of neonolith bimorph piezoelectric element on the amplitude-frequency-charactersitic of composite acoustoelectric transducers have been determined. It was shown that acaustoelectric transducer with convex piezoelement, polarized tangentially has relatively wide frequency range 0,1÷10kHz at the sensitivity 1,5÷2,5mV/Pa and could be applied in different areas of electroacoustics. Besides the tangentially polarized piezoelements could be applied in vibration transolucers, seismogauges and laryngophones.

Редактор: М.Алиев