



МИР электроники

В.М. Шарапов
И.Г. Минаев
Ж.В. Сотула
Л.Г. Куницкая

Электроакустические
преобразователи

Под общ. ред.
В.М. Шарапова

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2013

УДК 621.317.39

ББК 32.96-04

Ш25

Рецензент:

Кошевой Н.Д. – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений национального аэрокосмического университета им. Н.Э. Жуковского «ХАИ», лауреат Государственной премии Украины.

Ш25 Шарапов В.М. и др.

Электроакустические преобразователи / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, Л.Г. Куницкая / Под ред. В.М. Шарапова
Москва: Техносфера, 2013. – 296 с., ISBN 978-5-94836-357-8

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики, методы снижения рабочей частоты, повышения уровня звукового давления, расширения полосы частот электроакустических преобразователей. В конце каждой главы приведена обширная библиография.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки электроакустических преобразователей, измерительных устройств, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

УДК 621.317.39

ББК 32.96-04

© 2013, В.М. Шарапов и др.

© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-357-8

Содержание

Предисловие	7
Глава 1. Общие сведения об электроакустических преобразователях	8
1.1. Термины и определения. Классификация ЭАП.....	8
1.2. Основные характеристики ПЭАП	11
1.3. Материалы для ПЭАП.....	13
Литература к главе 1.....	21
Глава 2. Пьезоэлементы для ПЭАП	23
2.1. Колебания пьезокерамического диска, поляризованного по толщине.....	24
2.2. Вынужденные колебания радиально поляризованного цилиндра	29
2.3. Пьезоэлектрические резонаторы.....	33
2.4. Пьезокерамические трансформаторы	36
2.5. Биморфные и триморфные пьезоэлементы	41
Литература к главе 2.....	60
Глава 3. Электроакустические преобразователи	62
3.1. Общие сведения.....	62
3.2. Фигуры Хладни и диаграммы направленности преобразователей	65
3.3. Электроакустические преобразователи в схемах автогенераторов	73
Литература к главе 3.....	79
Глава 4. Гидроакустические преобразователи	82
4.1. Классификация и характеристики преобразователей	82

4.2. Соотношения электромеханического преобразования	84
4.3. Цилиндрические пьезокерамические преобразователи	87
4.4. Пластинчатые и сферические пьезокерамические преобразователи	88
4.5. Основные требования, предъявляемые к проектируемым преобразователям	90
4.6. Выбор способа преобразования энергии и формы колебаний	92
4.7. Некоторые конструкции преобразователей	95
Литература к главе 4	101
Глава 5. Преобразователи для неразрушающего контроля.....	103
5.1. Классификация методов неразрушающего контроля.....	103
5.2. Акустические методы неразрушающего контроля.....	104
5.3. Пьезоэлектрические преобразователи для неразрушающего контроля.....	108
Литература к главе 5	123
Глава 6. Технологии синтеза ПЭАП.....	126
6.1. Пространственная энергосиловая структура пьезоэлемента.....	126
6.2. Пространственное расположение и коммутация электродов пьезоэлемента.....	135
6.3. Пространственная электромеханическая обратная связь	137
6.4. Включение пьезоэлементов в схемы электрических фильтров	143
6.5. Технология добавочных элементов	145
6.6. Технология синтеза преобразователей, учитывающая электрические сигналы	152
6.7. Комбинированные технологии	153
Литература к главе 6	153

Глава 7. Методы создания низкочастотных колебаний	158
7.1. Метод биений	160
7.2. Пьезоэлектрические сумматоры.....	165
7.3. Создание НЧ-акустических колебаний с помощью амплитудных модуляторов.....	175
7.4. Метод дополнительного колебательного контура	178
7.5. Создание НЧ-акустических колебаний с помощью мономорфных пьезоэлементов.....	181
7.6. Создание НЧ-колебаний с помощью биморфных и триморфных элементов.....	186
7.7. Применение в электроакустических преобразователях объемных резонаторов	189
Литература к главе 7.....	191
Глава 8. Методы увеличения звукового давления	195
8.1. Метод добавочного колебательного контура	195
8.2. Внутреннее трение в пьезокерамических элементах электроакустических преобразователей.....	197
8.3. Пьезоэлектрические излучатели звука на основе биморфных и триморфных элементов	206
Литература к главе 8.....	213
Глава 9. Методы расширения полосы пропускания ПЭАП.....	215
9.1. Снижение добротности преобразователя.....	215
9.2. Связанные контуры.....	218
9.3. Объемные резонаторы.....	222
Литература к главе 9.....	226
Глава 10. Преобразователи с пьезоэлементами в схемах электрических фильтров.....	227
10.1. Схемы электрических фильтров.....	227
10.2. Датчики с пьезоэлементами в схемах фильтров нижних частот.....	237

10.3. Датчики с пьезоэлементами в схемах фильтров верхних частот.....	238
10.4. Датчики с пьезотрансформаторами в схемах электрических фильтров.....	240
Литература к главе 10	251
Глава 11. Устройства для контроля и диагностики биморфных пьезоэлементов	253
11.1. Дефекты биморфных пьезоэлементов	253
11.2. Диагностика дефектов по амплитудно-частотной характеристике.....	254
11.3. Диагностика дефектов по импульсной характеристике.....	263
11.4. Диагностика дефектов по переходной характеристике.....	269
11.5. Устройства на основе схемы автогенератора	274
Литература к главе 11	277
Приложение 1. Список публикаций авторов	280
Приложение 2. Список патентов авторов.....	285
Сведения об авторах.....	294

Предисловие

Настоящая книга написана В. М. Шараповым, И. Г. Минаевым, Ж. В. Сотулой, Л. Г. Куницкой.

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики, методы снижения рабочей частоты, повышения уровня звукового давления, расширения полосы частот электроакустических преобразователей. В конце каждой главы приведена обширная библиография.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки электроакустических преобразователей, измерительных устройств, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

Авторы благодарны рецензенту – д.т.н., профессору Н.Д. Кошевому за полезные замечания, высказанные при обсуждении книги.

Авторы благодарны также Генеральному директору ЗАО «РИЦ «Техносфера» Казанцевой Ольге Андреевне и выпускающему редактору Артемовой Светлане Юрьевне за квалифицированное рассмотрение рукописи, доброжелательную поддержку авторов и терпение при работе с ними.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

I.1. Термины и определения. Классификация ЭАП

Электроакустические преобразователи (ЭАП) – это устройства, преобразующие электрическую энергию в акустическую (энергию упругих колебаний среды) и обратно [2, 3, 5–9]. В зависимости от направления преобразования различают собственно ЭАП (излучатели) и приемники звука (датчики, сенсоры) (рис. 1.1).

Электроакустические преобразователи широко используют для излучения и приема звука в технике связи и звуковоспроизведении, для излучения и приема упругих колебаний в ультразвуковой технике (неразрушающий контроль), в гидроакустике (гидролокация, подводная связь, звуковое «подсвечивание» подводной обстановки и др.), в акустоэлектронике (датчики физических величин, электрические фильтры и т. д.), в медицине (ультразвуковая интроскопия), в системах безопасности, охранных устройствах и т. д. (рис. 1.2).

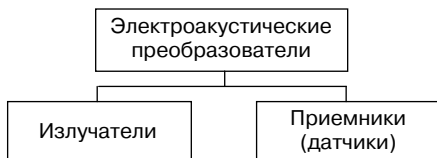


Рис. 1.1. Классификация преобразователей по выполняемой функции

В большинстве ЭАП имеет место двойное преобразование энергии: электромеханическое, в результате которого часть подводимой к преобразователю электрической энергии переходит



Рис. 1.2. Применение электроакустических преобразователей

в энергию колебаний некоторой механической системы, и механо-акустическое, при котором за счет колебаний механической системы в среде создается звуковое поле (рис. 1.3).

Наиболее распространенные ЭАП линейны, т.е. удовлетворяют требованию неискаженной передачи сигнала, и обратимы, т.е. могут работать и как излучатель, и как приемник и подчиняются принципу взаимности.

Существуют, однако, ЭАП, не имеющие механической колебательной системы и создающие колебания непосредственно в среде, например, электроискровой излучатель, возбуждающий интенсивные звуковые колебания в результате электрического разряда в жидкости, излучатель, действие которого основано на электрострикции

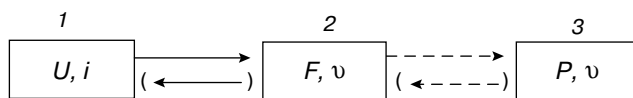


Рис. 1.3. Преобразование энергии в ЭАП

жидкостей. Эти излучатели необратимы и применяются редко. К особому классу ЭАП относятся приемники звука (также необратимые), основанные на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента под влиянием звукового давления, например угольный микрофон или полупроводниковые приемники, в которых используется т.н. тензорезистивный эффект – зависимость сопротивления полупроводников от механических напряжений.

По виду физического эффекта, лежащего в их основе (принципу действия), обратимые ЭАП могут быть разбиты на следующие группы: электродинамические преобразователи, действие которых основано на электродинамическом эффекте (излучатели) и электромагнитной индукции (приемники), например громкоговорители, микрофоны; электростатические, действие которых основано на изменении силы притяжения обкладок при изменении напряжения и на изменении заряда или напряжения при относительном перемещении обкладок конденсатора (громкоговорители, микрофоны); пьезоэлектрические преобразователи, основанные на прямом и обратном пьезоэффекте; электромагнитные

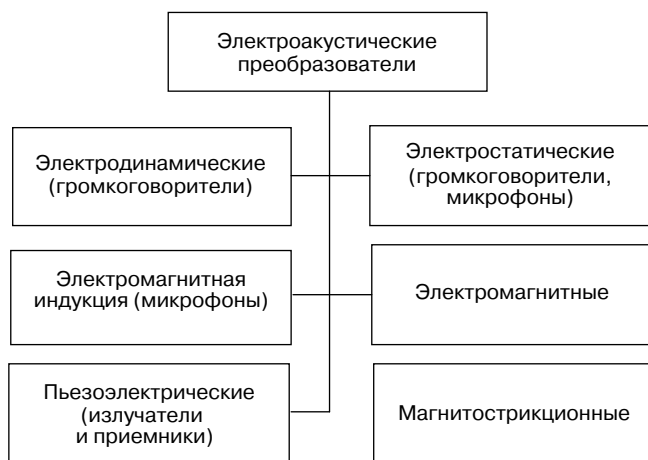


Рис. 1.4. Классификация ЭАП по принципу действия (физическому эффекту)

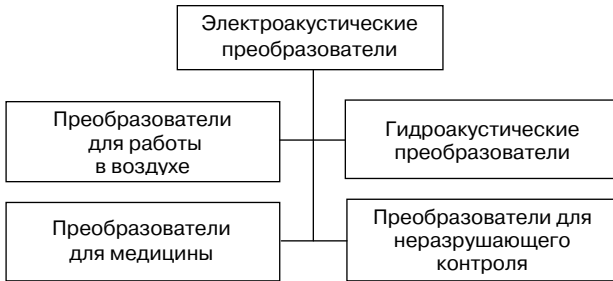


Рис. 1.5. Классификация ЭАП по среде, в которой они работают

преобразователи, основанные на колебаниях ферромагнитного якоря в переменном магнитном поле и изменении магнитного потока при движении якоря; магнитострикционные преобразователи, использующие прямой и обратный эффект магнитострикции (рис. 1.4).

По среде, в которой работают ЭАП, их можно разделить на ЭАП для работы в воздухе (гл. 3), в воде (гидроакустические преобразователи, гл. 4) и для создания акустических колебаний в твердых телах (преобразователи для неразрушающего контроля, гл. 5). В отдельную группу можно выделить преобразователи, используемые в медицине для ультразвуковой интроскопии (УЗИ), которые в данной книге не рассматриваются.

Данная книга посвящена пьезоэлектрическим электроакустическим преобразователям (ПЭАП), работающим на излучение и прием в воздухе и воде.

1.2. Основные характеристики ПЭАП

Преобразователи-излучатели оценивают следующими качественными показателями работы [5].

Акустическая мощность P_a – количество звуковой энергии, излучаемой преобразователем в единицу времени. Величину P_a , отнесенную к единице площади излучающей поверхности, называют **удельной акустической мощностью $P_{a,уд}$** .

Электроакустический КПД $\eta_{эа}$ — отношение излучаемой акустической мощности к активной электрической мощности $P_э$, потребляемой преобразователем от генератора возбуждения.

Входное электрическое сопротивление Z — отношение приложенного напряжения $U_к$ к силе тока I в цепи излучателя.

Характеристика направленности оценивает пространственное распределение поля и представляет собой отношение создаваемого излучателем звукового давления в дальнем поле к максимальному значению в зависимости от угловых координат точки наблюдения.

Коэффициент осевой концентрации K_a определяют отношением интенсивности звука, создаваемой излучателем по направлению главного максимума в точке дальнего поля, к интенсивности ненаправленного излучателя с такой же излучаемой мощностью на том же расстоянии.

Преобразователи-приемники характеризуют следующими показателями работы.

Чувствительность M определяет напряжение холостого хода на выходе преобразователя, отнесенное к воздействию на него в неискаженном свободном поле плоской волны звуковому давлению.

Электрическое сопротивление Z устанавливает соотношение между напряжением, развиваемым на выходе приемника, и силой тока в его цепи.

Характеристика направленности — это нормированное по отношению к максимуму угловое распределение чувствительности приемника.

Коэффициент концентрации K_0 — отношение квадрата чувствительности в максимальном направлении к среднему квадрату чувствительности во всех направлениях. Для обратимых преобразователей коэффициенты концентрации в режимах излучения и приема численно равны.

Эффективность приемника также оценивают **удельной чувствительностью** $M_{уд} = M / \sqrt{|Z_i|}$ (здесь M — чувствительность холостого хода; $|Z_i|$ — модуль внутреннего (выходного) сопротивления

приемника), характеризующей его помехоустойчивость к шумам электрических цепей.

Все перечисленные параметры преобразователей зависят от частоты.

1.3. Материалы для ПЭАП

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на использовании прямого или обратного пьезоэлектрических эффектов. Сущность **прямого пьезоэлектрического эффекта** заключается в электрической поляризации определенного класса диэлектриков, называемых пьезоэлектриками (сегнетоэлектриками, ферроэлектриками), при механическом напряжении в их материале. **Обратный пьезоэлектрический эффект** характеризуется тем, что электрическая поляризация вызывает механическое напряжение в пьезоматериале или изменение геометрических размеров пьезоэлементов.

По другому можно сказать, что **прямой пьезоэлектрический эффект** заключается в образовании электрических зарядов в пьезоэлектрическом материале при приложении к нему механической силы, а **обратный пьезоэффект** – в возникновении колебаний при подключении пьезоэлемента к источнику электрического напряжения.

Особенностью пьезоэлектрического эффекта является **знакочувствительность**, т.е. изменение знака заряда при переходе от сжатия кристалла к растяжению и изменение знака деформации при изменении направления поляризующего поля.

Следует различать явление пьезоэлектричества и близкое к нему явление **электрострикции**. Сущность последнего заключается также в поляризации диэлектрика под действием приложенной внешней силы, однако при электрострикции поляризация пропорциональна квадрату приложенного механического напряжения и не изменяет знак при изменении знака приложенной силы. Электрострикция проявляется обычно значительно меньше, чем

пьезоэлектричество, при наличии которого электрострикцией можно пренебречь [1, 7, 8].

Родственным этим физическим эффектам является **пироэлектричество**, сущность которого заключается в поляризации вследствие нагрева. При конструировании и использовании пьезоэлектриков с явлением пироэлектричества нельзя не считаться. Для некоторых современных пьезоэлектрических керамик, например, цирконата титаната свинца, поляризация в результате изменения температуры может быть источником значительных погрешностей.

Анизотропия характеристик пьезокерамических материалов

Многие свойства кристаллических веществ являются векторными или тензорными и различны в разных кристаллографических направлениях. Таковы, например, коэффициент линейного термического расширения, диффузия, теплопроводность, модуль упругости, удельное электрическое сопротивление, величина показателей преломления или диэлектрической проницаемости. Характер анизотропии этих свойств связан с симметрией кристаллической решетки [8, 10].

Поликристаллическая керамика, состоящая из множества мелких беспорядочно ориентированных друг относительно друга кристаллических зерен, в целом должна была бы быть изотропной. Анизотропия свойств может проявиться у текстурированной керамики, в которой имеется некоторая предпочтительная ориентация зерен кристаллической фазы.

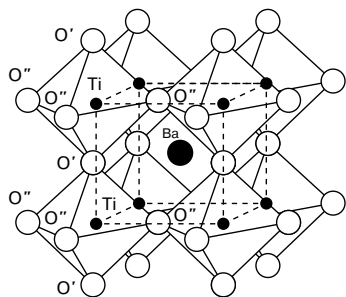


Рис. 1.6. Структура титаната бария

Анизотропной является также сегнетоэлектрическая керамика из титаната бария, цирконата титаната свинца (ЦТС) и других подобных веществ, предварительно поляризованная нагреванием в электрическом поле.

Для примера, рассмотрим часто используемый в практике пьезокерамический материал — титанат бария.

Кристаллической структурой титаната бария является структура перовскита, показанная на рис. 1.6. Структура является кубической, с ионами Ba^{++} в углах куба, ионами O^2 – в центрах граней и ионом Ti^{++++} в центре куба. Особенно важное значение имеет тот факт, что ион титана окружен шестью ионами кислорода, образующими октаэдр [1, 7, 8].

Выше температуры Кюри октаэдр TiO_6 имеет центр симметрии, так что дипольный момент равен нулю. Октаэдр будет обладать дипольным моментом только тогда, когда положительный ион титана сместится относительно одного из отрицательных ионов кислорода.

Существование сегнетоэлектричества в BaTiO_3 является следствием поляризационной «катастрофы», при которой электрическое поле, образующееся при поляризации, возрастает гораздо быстрее, чем упругие восстанавливающие силы между ионами.

Кластерные соединения, включающие центральный атом металла и лиганды (металлические или ковалентно связанные группы атомов) всегда характеризуются вырождением основного электронного состояния или близко лежащих возбужденных состояний.

Задача движения ядер при наличии электронного вырождения решается с помощью теоремы Яна–Теллера [1]. Чаще всего в керамиках с низкой симметрией реализуется псевдоэффект Яна–Теллера. При этом надо решать сложную систему вибронных уравнений, что требует знания адиабатических потенциалов [7, 8].

В сегнетоэлектриках со структурой перовскита содержится большое число ян-теллеровских центров, а именно – кластеров, включающих атомы переходных металлов типа Ti , Zr и т.д. Для наших целей важно то, что эти центры находятся в электронно-вырожденном (точнее – псевдовырожденном) состоянии.

Эти сегнетоэлектрики обладают кристаллической решеткой высокой симметрии. Такие симметричные структуры не имеют дипольных моментов, однако в процессе сегнетоэлектрического фазового перехода возникают диполи и наводится сильная электрическая поляризация всего кристалла (сегнетоэлектрика), либо отдельных доменов (керамика).

Поскольку в кристалле сегнетоэлектрика со структурой перовскита кластеры координированных атомов титана сильно связаны между собой общими атомами кислорода, то можно рассмотреть кооперативный псевдоэффект Яна–Теллера. Вводя дополнительный вибронный параметр связи между кластерами за счет фононов, можно объяснить структурный фазовый переход в макро-поляризованное состояние кристалла. Это может быть достигнуто выбором определенной температуры (сегнетоэлектричество) за счет возбуждения нужных фононов, либо за счет приложения внешнего электрического поля (поляризация керамики), где группа ян-теллеровских кластеров, связанная между собой вибронной связью, образует домен. Выстраивание поляризованных доменов дает известный эффект.

Знание природы поляризации в домене позволяет понять резко анизотропный механизм проводимости в керамике.

Прикладывая напряжение, как показано на рис. 1.7, мы поляризуем и выстраиваем домены.

Среда между доменами — это тоже кристаллический твердый раствор, атомы которого связаны фононной связью другого типа, нежели в домене. В этой среде нет вибронной корреляции ян-теллеровских центров. Однако и через эту среду может идти проводимость за счет наличия электрического поля поляризованных доменов.

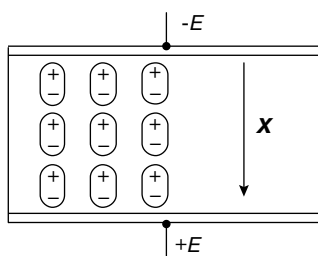


Рис. 1.7. Доменная структура пьезокерамики

Электроны инжектируются в среду с электрода подложки и переносятся с одного кластера на другой по типу полупроводниковой проводимости, усиленной полем доменов. Перенос электронов по цепочке атомов кристаллической решетки на кластеры доменов идет легко. Но дальнейшее его продвижение внутри домена казалось должно было быть заторможено за счет поляризации в домене.

Однако проблема разрешается, как только мы учтем характер химических и физических взаимодействий, которые привели к созданию сегнетоэлектричества внутри домена. Ведь смещения атомов, вызвавшее дипольную неустойчивость, связаны с вибранным смешиванием основного и возбужденного состояний внутри кластеров. Это физически равноценно смешиванию валентной зоны и зоны проводимости внутри всего домена.

Делокализованный характер химических связей внутри каждого кластера и отсутствие характеристических колебаний по химическим связям, вибранный активность «размазанных» колебаний внутри и между кластерами в домене обеспечивают свободную миграцию электрона внутри кластера.

Таким образом, мы видим, что перенос электрона вдоль направления оси X , отмеченного стрелкой на рис. 1.7, должен осуществляться гораздо легче, нежели в перпендикулярном направлении в случае приложения напряжения к боковым граням пьезоэлемента.

Из пьезоэлектрических материалов изготавливают пьезоэлементы, являющиеся чувствительными элементами датчиков.

В качестве пьезоэлектрических материалов используются:

- монокристаллические материалы (кварц, ниобат лития, сегнетова соль и др.);
- поликристаллические материалы (пьезокерамика).

Достоинством кварца является стойкость к воздействиям температуры и влажности, механическая прочность. Кварц имеет незначительный коэффициент линейного расширения, его пьезомодуль практически не зависит от температуры до 200°C , а в диапазоне $200\dots 500^\circ\text{C}$ изменяется незначительно, удельное электрическое сопротивление — порядка 10^{16} Ом/м, однако оно сильно зависит от температуры и имеет неодинаковое значение в направлении раз-

личных осей. Значения пьезомодулей кварца $d_{ij} \left(10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \right)$ следующие:

$d_{21} = -d_{11} = 2,31$; $d_{25} = -d_{14} = 0,67$; $d_{26} = 4,62$, остальные пьезомодули равны нулю.

В настоящее время для изготовления датчиков наиболее широко применяются пьезокерамические материалы. Пьезокерамика синтезирована впервые в СССР в 1944 г. [3, 8].

Пьезоэлектрические керамические материалы (ПКМ) представляют собой сегнетоэлектрические соединения или их твердые растворы, полученные синтезированием из смеси различных оксидов и солей (табл. 1.1) [4].

Основу большинства современных ПКМ составляют твердые растворы титаната-цирконата свинца (ЦТС, PZT), модифицированные различными компонентами и добавками.

Выпускаются также ПКМ на основе титаната бария (ТБ), титаната свинца (ТС), ниобата свинца (НС), титаната висмута (ТВ) и др. Основными свойствами ПКМ, выявляемыми на стандартных керамических образцах, являются:

- высокие значения диэлектрической проницаемости;
- наличие спонтанной поляризации отдельных областей (доменов);
- наличие петель гистерезиса на зависимостях: поляризация—электрическое поле, деформация—электрическое поле;
- рост диэлектрической проницаемости с повышением температуры;
- наличие особой точки (температура Кюри) на кривой зависимости диэлектрической проницаемости—температура, выше которой сегнетоэлектрические свойства не проявляются;
- возникновение остаточной поляризации и двойного электрического слоя на поверхности спеченных образцов после воздействия постоянного электрического поля, обуславливающее возможность проявления телом пьезоэлектрического эффекта (преобразования механической энергии в электрическую и/или наоборот).

В зависимости от основного назначения ПКМ подразделяются следующим образом.

1. «Сегнетомягкие» ПКМ. Применяются для изготовления высокочувствительных преобразователей работающих без жестких

требований по стабильности параметров к воздействию дестабилизирующих факторов (повышенных температур, электрических и механических полей).

ПКМ общего назначения. К ним относятся материалы ЦТС-19 и ЦТС-19 (цт). ЦТС-19 (цт) является модификацией ЦТС-19 с повышенными (рекордными для данного материала) значениями пьезоэлектрических модулей (d_{ik}). Это повышение достигнуто за счет замены сырьевых компонентов оксида циркония и оксида титана на специально разработанное высокоактивное сырье – титанат циркония (цт).

ПКМ специального назначения с пониженной диэлектрической проницаемостью и высокой чувствительностью в режиме приема. К ним относится материал ЦТС-36, выпускаемый обычно в виде горячепрессованных блоков и предназначенный главным образом для изготовления преобразователей ультразвуковых линий задержки.

ПКМ специального назначения с повышенными значениями диэлектрической проницаемости и пьезомодулей. К ним относится материал НЦТС-2. Эти материалы предназначены для использования в телефонных устройствах с повышенной чувствительностью.

2. **«Сегнетожесткие» ПКМ.** Применяются для изготовления преобразователей, работающих в режиме приема и (или) излучения в условиях воздействия сильных электрических полей и (или) механических напряжений. К ним относятся материалы ЦТС-23, ЦТССт-3 (цт) и ЦТБС-7. Материалы ЦТС-23 и ЦТССт-3 (цт) хорошо зарекомендовали себя при использовании в пьезоэлементах систем зажигания и гидроакустики. ЦТССт-3 (цт) и ЦТБС-7 можно рекомендовать для изготовления пьезотрансформаторов и ультразвуковых излучателей повышенной мощности.
3. **ПКМ для частотно-селективных устройств.** Применяются для изготовления пьезоэлементов (обладающих повышенной температурной и временной стабильностью частотных характеристик)

Таблица 1.1. Параметры пьезокерамических материалов

Материал	Коеф. электромеханической связи, K_p	Относит. диэлектр. проницаем., $\epsilon_{33}^T/\epsilon^0$	Плотность, ρ , 10^3 кг/м ³	Пьезомодули, 10^{-12} Кл/Н			Чувствительность в режиме приема, 10^{-3} В-м/Н			Относител. отклон. частоты в интервале температур $-60 \dots +85^\circ\text{C}$, $\delta\phi_\Theta/\phi_p$, %	Тангенс угла диэл. потерь, $\text{tg}\delta$, 10^{-2}		Водопоглощение, W , %, не более	Модуль Юнга, Y_1^E , 10^{-11} н/м ²	Электрич. прочность, $E_{пр}$, 10^6 В/м	Температура точки Кюри, T_k , $^\circ\text{C}$	Скорость звука, v_1 , 10^3 м/с	Механическая добротность, Q_M
				d_{15}	d_{33}	d_{31}	g_{15}	g_{33}	g_{31}		сильное поле	слабое поле						
ЦТС-19	0,6	1750	7,5	160	330	400	10,4	21,4	30,6	0,8	2,8	-	0,2	0,7	3,0	300	3,0	80
ЦТС-19(итр)	0,65	2200	7,5	210	430	-	10,7	22,0	-	-	2,0	-	-	-	300	300	2,6	60
ЦТС-21	0,3	500	7,6	40	100	120	9,1	22,6	-	1,5	2,0	-	0,2	0,9	4,0	400	3,7	150
ЦТС-23	0,5	1000	7,5	120	240	365	13,6	27,1	-	-	0,7	3,0	0,09	0,65-0,85	3,0	280	3,3	300
ЦТС-26	0,62	1750	7,6	160	330	400	10,4	21,4	-	1,0	2,0	-	-	-	350	350	3,0	80
ЦТС-26м	0,62	1750	7,6	160	330	-	10,4	21,4	-	-	2,0	-	-	-	350	350	3,0	80
ЦТС-35	0,45	1000	7,5	100	200	-	-	-	-	0,4	2,0	-	0,2	0,75	1	300	3,45	700
ЦТС-35у	0,48	800	7,5	85	190	-	-	-	-	-	2,5	-	-	-	290	3,5	650	80
ЦТС-36	0,57	670	7,7	90	220	440	15,4	38,0	-	3,0	3,0	-	-	-	350	3,3	80	80
ЦТС-38	0,3	460	7,5	40	70	-	-	-	-	0,2	1,0	-	-	-	330	3,5	1700	-
ЦТС-39	0,38	720	7,5	60	100	-	-	-	-	0,25	1,0	-	-	-	290	3,5	1150	-
ЦТС-40	0,48	1350	7,5	80	150	-	-	-	-	0,4	1,0	-	-	-	240	3,45	600	-
ЦТСТ-3	-	1400	7,4	130	275	-	10,5	22,2	-	-	-	-	0,15	-	-	-	900	-
ЦТСТ-3(итр)	0,55	1400	7,7	140	260	-	11,3	21,0	-	-	3,0	-	-	-	280	3,0	300	-
ЦТБС-3	0,45	2300	7,25	134	286	-	7,8	16	23,8	-	1,2	3,5	0,1	$\geq 0,7$	3,0	180	3,4-3,6	200
ЦТБС-7	0,54	1600	7,5	140	330	575	9,6	23,1	-	-	0,8	3,5	-	-	220	3,3	300	300
НЦТС-2	0,65	5700	7,8	310	650	-	7,9	12,9	-	-	3,0	-	-	-	140	2,6	50	50
ТНaВ-1	-	140	6,9	-	16	-	-	12,9	-	-	0,5	-	-	-	660	-	4000	-
ТНaВ-1м	-	130	6,6	-	22	-	-	19,2	-	-	0,8	-	-	-	630	-	-	-
ТНВ-1	-	100	7,2	-	7	-	-	7,9	-	-	0,8	-	-	-	920	-	-	-

частотно-селективных устройств на объемных и поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Материалы для частотно-селективных устройств на объемных волнах планарной моды колебаний. Применяются в основном при создании фильтров на дискретных пьезоэлементах. К ним относятся материалы ЦТС-38, ЦТС-39 и ЦТС-40.

Материалы для частотно-селективных устройств на объемных волнах моды колебаний сжатия-растяжения по толщине. Представителями этой подгруппы являются материалы ЦТС-35 и ЦТС-35У. ЦТС-35У выпускается в виде горячепрессованных блоков.

Материалы для частотно-селективных устройств на объемных волнах моды колебаний сдвига по толщине. Представителем этой подгруппы является материал ЦТС-35. Материалы этих подгрупп используются при создании монолитных фильтров для частотно-модулированных сигналов на частоты до 10 МГц.

Материалы для частотно-селективных устройств на поверхностных акустических волнах. К этой подгруппе относится материал ЦТС-33, изготавливаемый в виде горячепрессованных блоков. Он применяется при разработке фильтров на частоты до 40 МГц.

Высокотемпературные ПКМ. Высокотемпературные ПКМ используются для изготовления пьезоэлементов, работающих при температурах не менее 250 °С. В эту группу входят материалы ЦТС-21, ЦТС-26, ТНаВ-1 и ТНВ-1, обеспечивающие повышенные рабочие температуры пьезоэлементов (250–750 °С). Для повышения температурной стабильности пьезомодуля (d_{33}) разработаны модификации материалов ЦТС-26 и ТНаВ-1, ЦТС-26М и ТНаВ-1М.

Литература к главе 1

1. Берсукер И.В. Эффект Яна–Теллера и вибронные взаимодействия в современной химии. – М.: Наука, 1987. – 344 с.

2. Дидковский В.С., Лейко А.Г., Савин В.Г. Электроакустические пьезокерамические преобразователи. – Кировоград: Имекс ЛТД, 2006. – 448 с. (на укр.).
3. Домаркас В.И., Кажис Р.-Й.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс, «Лиентис», 1975. – 258 с.
4. Материалы пьезокерамические. Типы и марки. Технические требования. ГОСТ 13927-80. М., 1980.
5. Справочник по гидроакустике / А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, Е.А. Корепин и др. Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
6. Ультразвук (маленькая энциклопедия) / Под ред. И. П. Голяминой. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.
7. *Sharapov V.* Piezoceramic sensors. – Springer Verlag, 2011. – 498 p.
8. *Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шаранова Е.В.* Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632с.
9. *Шарапов В.М.* Пьезокерамические трансформаторы и датчики // В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, К.В. Базило, Л.Г. Куницкая. / Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 278 с.

ГЛАВА 2

ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ПЭАП

Промышленность выпускает значительное количество типоразмеров пьезокерамических элементов из различных пьезоматериалов [6, 12–14]. Некоторые из них показаны на рис. 2.1.

В данной работе изучаются преобразователи с пьезоэлементами в форме диска, поляризованного по толщине, и в форме полого цилиндра, поляризованного по радиусу.

При изучении пьезоэлементов мы можем рассматривать их с разных точек зрения. Например, мы можем рассматривать пьезоэлемент как электромеханическую систему, колеблющуюся на резонансной частоте под действием электрического напряжения (излучатель) или в дорезонансной области и на резонансной частоте под действием механического давления (приемник).



Рис. 2.1. Пьезокерамические элементы для ПЭАП

Мы можем также рассматривать пьезоэлемент с двумя электродами как резонатор, а с тремя и более электродами – как пьезоэлектрический трансформатор.

Если к пьезоэлементу или двум пьезоэлементам приклеить металлическую пластину (биморфный или триморфный элемент), характеристики этой колебательной системы будут существенно отличаться от характеристик мономорфного пьезоэлемента. Поэтому такие устройства рассматриваются нами отдельно.

2.1. Колебания пьезокерамического диска, поляризованного по толщине

Анализ колебаний тонкого пьезокерамического диска выполнен Н.А. Шульгой и А.М. Болкисевым [15].

Рассмотрим пьезоэлектрический диск, радиус R которого значительно превосходит его толщину (рис. 2.2). Колебания возбуждаются разностью потенциалов ΔV , приложенной к электродам, расположенным на торцевых поверхностях. Допустим, что толщина диска настолько мала, что изменением напряжений вдоль оси Z можно пренебречь. Приходим к задаче о плоском напряженном состоянии, в которой

$$\sigma_{zz} = \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0;$$

остальные компоненты напряжений и перемещений в плоскости диска не зависят от r . Кроме того, из осевой симметрии следует $u_{\theta} = 0$, и тогда геометрические соотношения можно записать в виде

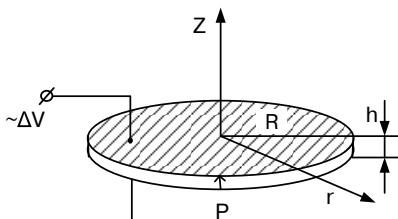


Рис. 2.2. Пьезоэлемент в форме диска

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} u_r, \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta z} = 0$$

Поскольку тонкая пластина заключена между двумя эквипотенциальными поверхностями, то электрическое поле вдоль радиуса считаем однородным. Таким образом, уравнение состояния выбираем в форме

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} &= s_{11}^E \sigma_{rr} + s_{12}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{31} E_z, \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= s_{12}^E \sigma_{rr} + s_{11}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{01} E_z, \\ \varepsilon_{zz} &= s_{13}^E (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + d_{33} E_z, \\ D_z &= d_{31} (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \varepsilon_{33}^T E_z.\end{aligned}\tag{2.2}$$

Третье уравнение системы (2.2) оказывается избыточным и может быть использовано для определения смещений по толщине.

Планарный коэффициент электромеханической связи k_p определяется долей электрической энергии от полной входной энергии, создаваемой системой напряжений $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = p_0$, $\sigma_{zz} = 0$. Под действием такой системы напряжений в диске возникают деформации и электрическое поле:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\theta\theta} &= s_{11}^E (1-\nu) \left(1 - \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E (1-\nu) \varepsilon_{33}^T}\right) p_0 \\ E_z &= -\frac{2d_{31}}{\varepsilon_{33}^T} p_0.\end{aligned}$$

Здесь $\nu = -s_{12}^E / s_{11}^E$ — коэффициент Пуассона. Плотность запасаемой электрической энергии вычисляется по формуле

$$W_{эл} = \frac{1}{2} \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E (1-\nu) \varepsilon_{33}^T}\right) E_z^2.\tag{2.3}$$

Плотность подводимой механической энергии определяется как

$$W_{мех} = \frac{1}{s_{11}^E (1-\nu)} \varepsilon_{rr}^2 = s_{11}^E (1-\nu) \left(1 - \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E (1-\nu) \varepsilon_{33}^T}\right) p_0^2.$$

Учитывая (2.3), для планарного коэффициента связи получаем

$$k_p^2 = \frac{W_{эл}}{W_{мех} + W_{эл}} = \frac{2}{1-\nu} \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}.$$

Радиальные колебания диска описываются уравнением движения

$$\frac{\partial \sigma_{kk}}{\partial r} - \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) + \rho \omega^2 u_r = 0. \quad (2.4)$$

Для того чтобы подставить соотношения (2.2) в уравнение движения, необходимо выразить компоненты механических напряжений через компоненты деформаций. Принимая во внимание (2.1), получаем

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{1}{S_{11}^E (1-\nu^2)} \left(\frac{du_r}{dr} + \nu \frac{1}{r} u_r \right) - \frac{d_{31}}{S_{11}^E (1-\nu)} E_z, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{1}{S_{11}^E (1-\nu^2)} \left(\nu \frac{du_r}{dr} + \frac{1}{r} u_r \right) - \frac{d_{31}}{S_{11}^E (1-\nu)} E_z. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Уравнения (2.4) и (2.5) можно свести к канонической форме уравнения Бесселя, вводя переменную $z_1 = \sqrt{\rho s_{11}^E (1-\nu^2)} \omega r$:

$$\frac{d^2 u_r}{dz_1^2} + \frac{1}{z_1} \frac{du_r}{dz_1} + \left(1 - \frac{1}{z_1^2}\right) u_r = 0. \quad (2.6)$$

Общее решение (2.6) является линейной комбинацией функций Бесселя первого и второго рода

$$u_r = AJ_1(kr) + BY_1(kr), \quad (2.7)$$

где $k^2 = \rho \omega^2 s_{11}^E (1-\nu^2)$. Произвольные постоянные A, B определяются из граничных условий

$$u_r = 0, \quad r = 0, \quad \sigma_{rr} = 0, \quad r = R. \quad (2.8)$$

Так как при $r=0$ функция $Y_1 \rightarrow -\infty$, то $B=0$. Из второго условия (2.8) получаем

$$A = \frac{(1+\nu)d_{31}E_z R}{\chi J_0(\chi) - (1-\nu)J_1(\chi)},$$

$$\sigma_{rr} = \frac{d_{31}E_z}{s_{11}^E(1-\nu)} \left[\frac{\chi J_0(kr) - (1-\nu)\frac{R}{r}J_1(kr)}{\chi J_0(\chi) - (1-\nu)J_1(\chi)} - 1 \right], \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{d_{31}E_z}{s_{11}^E(1-\nu)} \left[\frac{\chi \nu J_0(kr) - (1-\nu)\frac{R}{r}J_1(kr)}{\chi J_0(\chi) - (1-\nu)J_1(\chi)} - 1 \right],$$

где $\chi = \omega R \sqrt{\rho s_{11}^E(1-\nu^2)}$ – безразмерная частота. Следующим шагом решения является определение полной проводимости диска. Для этого проинтегрируем физическое соотношение (2.2) для D_z по площади электрода. Из (2.9), учитывая, что $\Delta V = E_z h$, находим

$$I = i\omega \frac{2\pi R d_{31} A}{s_{11}^E(1-\nu)} J_1(\chi) + i\omega \frac{\pi R^2}{h} (\epsilon_{33}^T - \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E(1-\nu)}) \Delta V.$$

Таким образом, полная проводимость диска на радиальной моде определяется по формуле

$$Y_6 = i\omega \frac{\pi R^2 \epsilon_{33}^T}{h} (1 - k_p^2 + k_p^2 \frac{1+\nu}{\Delta} J_1(\chi)). \quad (2.10)$$

Здесь $\Delta = \chi J_0(\chi) - (1-\nu)J_1(\chi)$ – частотное уравнение, корни которого определяют значения резонансных частот. Как видим, резонансные частоты зависят от податливости s_{11}^E и коэффициента Пуассона. Эти два параметра пьезокерамического материала могут быть определены по измерениям двух резонансных частот. Первые четыре безразмерные резонансные частоты χ достаточно тонкого диска ($h/R < 0,1$) имеют значения, относящиеся приблизительно

как 2,05:5,40:8,58:11,73, тогда как основная мода толщинных колебаний $\chi \approx 20$. Следовательно, на нескольких первых резонансах допущения, сделанные при решении задачи о радиальных колебаниях, остаются в силе. Отношение основной частоты к частоте обертона $\chi_{r0} / \chi_{r1} = f_{r0} / f_{r1}$ не зависит от податливости s_{11}^E . Построив по частотному уравнению зависимость χ_{r0} / χ_{r1} от коэффициента Пуассона, определим его по измерению f_{r0} / f_{r1} . Далее коэффициент податливости вычисляется по формуле

$$s_{11}^E = \chi_{r0}^2 / 4\pi^2 \rho(1 - \nu^2) R^2 f_{r0}^2. \tag{2.11}$$

Решение задачи о колебаниях диска можно обобщить для задачи о радиальных колебаниях кольца с толщиной поляризации, для которой общее решение также имеет вид (2.7), а постоянные A и B определяются из краевых условий

$$\sigma_{rr} = 0, \quad r = r_1, r_2, \tag{2.12}$$

где r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы кольца. Частное решение, удовлетворяющее (2.12), имеет вид

$$u_r(r) = \frac{(1 + \nu)d_{31}E_z r_2}{\Delta k} \times \left\{ [\chi_1 \Delta_2(\chi_2) - \chi_2 \Delta_2(\chi_1)] J_1(kr) + [\chi_2 \Delta_1(\chi_1) - \chi_1 \Delta_1(\chi_2)] Y_1(kr) \right\}, \tag{2.13}$$

где

$$\chi_1 = kr_1, \quad \chi_2 = kr_2, \quad \Delta_1(\chi) = \chi J_0(\chi) - (1 - \nu) J_1(\chi),$$

$$\Delta_2(\chi) = \chi Y_0(\chi) - (1 - \nu) Y_1(\chi);$$

$\Delta = \Delta_1(\chi_1) \Delta_2(\chi_2) - \Delta_1(\chi_2) \Delta_2(\chi_1)$ – частотное уравнение. Анализ последнего уравнения показывает, что частота основной моды при увеличении r_1 / r_2 уменьшается, частоты первого и второго обертонов сначала уменьшаются, а затем увеличиваются, т.е. при $0,05 < r_1 / r_2 < 0,3$ существует минимум. Влияние коэффициента Пуассона на корни частотного уравнения для диска с малым отверстием ($r_1 / r_2 \leq 0,4$) оказывается существенным (порядка 2%). За счет соответствующего выбора

геометрических размеров эффективность преобразования энергии на обороте основной моды можно увеличить.

Определим проводимость кольца на радиальных модах. Проинтегрировав физическое соотношение (2.2) для D_z по площади электрода, получим ток смещения

$$I = i\omega \frac{2\pi d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu)} \left\{ A[r_2 J_1(\chi_2) - r_1 J_1(\chi_1)] + B[r_2 Y_1(\chi_2) - r_1 Y_1(\chi_1)] \right\} + i\omega\pi \left(\epsilon_{33}^T - \frac{2d_{31}^2}{s_{11}^E(1-\nu)} \right) (r_2^2 - r_1^2).$$

Отношение тока к подводимой разности потенциалов $E_2 h$ дает полную проводимость кольца

$$Y_7 = i\omega \frac{S \epsilon_{33}^T}{h} \left\{ \begin{array}{l} 1 - k_p^2 + \frac{(1+\nu)k_p^2}{\Delta k^2 (r_2^2 r_1^2)} \times \\ \times [(\chi_1 \Delta_2(\chi) - \chi_2 \Delta_2(\chi_1)) \cdot (\chi_2 J_1(\chi_2) - \chi_1 J_1(\chi)) + \\ + (\chi_2 \Delta_1(\chi_1) - \chi_1 \Delta_1(\chi_2)) \cdot (\chi_2 Y_1(\chi_2) - \chi_1 Y_1(\chi_1))] \end{array} \right\}, \quad (2.14)$$

где S — площадь электрода.

2.2. Вынужденные колебания радиально поляризованного цилиндра

Рассмотрим колебания цилиндра, возбуждаемые внешними гармоническими нагрузками [15]. В качестве таковых могут выступать электрическое поле, возникающее под действием разности потенциалов, приложенной к электродированным цилиндрическим поверхностям $r_0 \pm h$, и (или) механические усилия, например давление со стороны внешней среды на цилиндрические поверхности.

В соответствии с характером нагружения, а следовательно, видом краевых условий удобно разрешающую систему уравнений представить в смешанном виде. Выберем в качестве независимых функций

переменные $u_z, \sigma_{rr}, \sigma_{rz}, u_r, \phi, D_r$. После простых преобразований приведем разрешающую систему к форме [15]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u_z}{\partial r} &= -\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{1}{c_{55}^E} \left(\sigma_{rz} - e_{15} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right), \\
 \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} &= \frac{1}{r} \left(c_{12}^E + \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right) \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\Delta_4}{\Delta_1} \right) \sigma_{rr} - \\
 &\quad - \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} - \left[\rho \omega^2 - \frac{1}{r^2} \left(c_{11}^E + \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right) \right] u_r + \frac{1}{r} \frac{\Delta_3}{\Delta_1} D_r, \\
 \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} &= -\rho \omega^2 u^2 - \left(c_{11}^E + \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right) \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{\Delta_4}{\Delta_1} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial z} - \frac{1}{r} \sigma_{rz} - \\
 &\quad - \frac{1}{r} \left(c_{12}^E + \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right) \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\Delta_3}{\Delta_1} \frac{\partial D_r}{\partial z}, \\
 \frac{\partial \phi}{\partial r} &= \frac{1}{\Delta_1} \left(-\Delta_3 \frac{\partial u_z}{\partial z} + \varepsilon_{33}^S \sigma_{rr} - \frac{1}{r} \Delta_4 u_r + e_{33} D_r \right), \\
 \frac{\partial \phi}{\partial r} &= \frac{1}{\Delta_1} \left(-\Delta_3 \frac{\partial u_z}{\partial z} + e_{33} \sigma_{rr} - \frac{1}{r} \Delta_3 u_r - c_{33}^E D_r \right), \\
 \frac{\partial D_r}{\partial r} &= \frac{1}{c_{55}^E} \left(-e_{31} \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \Delta_5 \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{r} D_r.
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Здесь использованы обозначения

$$\Delta_1 = e_{33}^2 + c_{33}^E \varepsilon_{33}^S; \quad \Delta_2 = c_{33}^E e_{31}^2 + 2c_{13}^E e_{31} e_{33} - c_{13}^2 \varepsilon_{33}^S;$$

$$\Delta_3 = c_{13}^E e_{33} - c_{33}^E e_{31}; \quad \Delta_4 = c_{13}^E \varepsilon_{33}^S + e_{31} e_{33};$$

$$\Delta_5 = e_{15}^2 + c_{55}^E \varepsilon_{11}^S.$$

Введем системы базисных функций $1, \cos \alpha, \cos 2\alpha, \dots, \cos n\alpha, \dots$ и $\sin \alpha, \sin 2\alpha, \dots, \sin n\alpha, \dots$. Если принять

$$\{u_z(r, z); \sigma_{rz}(r, z)\} = \sum_{n=0}^{\infty} \{u_z^{(n)}(r), \sigma_{rz}^{(n)}(r)\} \cos x_n z,$$