

НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени ЯРОСЛАВА МУДРОГО

На правах рукописи

БЕЛИЧЕВА КСЕНИЯ ВАЛЕРЬЕВНА

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СЛОИСТЫХ
МАГНИТОСТИКЦИОННО-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
С НЕОДНОРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ**

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Петров В. М.

Великий Новгород 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.....	11
1.1 Исходные материалы для слоистых структур.....	14
1.2 Магнитоэлектрический эффект в структурах на основе неоднородных компонентов.....	18
1.3 Гистерезис и магнитоэлектрический эффект в структурах на основе градиентных компонентов в отсутствие подмагничивающего поля.....	36
1.4 Структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя.....	40
1.5 Выводы.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ.....	46
2.1 Теоретическое моделирование МЭ эффекта в слоистых структурах с неоднородным ферромагнетиком.....	46
2.2 Теоретическое моделирование МЭ эффекта в слоистых структурах на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя.....	61
2.3 Сравнение теоретических и экспериментальных данных.....	72
2.4 Выводы.....	75
3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА.....	77
3.1 Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации.....	78

3.2 Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах на основе пьезоэлектрического материала и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.....	85
3.3 Выводы.....	91
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ	92
4.1 Использование слоистой структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя в управляемом индуктивном элементе ..	95
4.2 Сравнение теоретических и экспериментальных данных.....	110
4.3 Выводы.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационной работы. В последнее время наблюдается значительный рост интереса к материалам, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств. Однако, малые величины магнитоэлектрического (МЭ) эффекта и низкие температуры, при которых он проявляется в однофазных материалах, не позволяли говорить о практическом применении этого эффекта. В последние годы наблюдается всплеск исследовательской деятельности в этой области, который связан с открытием материалов, обладающих сильным МЭ эффектом в относительно слабых магнитных полях. Важное место среди таких материалов занимают магнитострикционно-пьезоэлектрические материалы. Эти материалы представляют собой гетерогенные структуры, состоящие из пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз. Важнейшим свойством таких материалов является способность поляризоваться во внешнем магнитном поле (прямой МЭ эффект), и намагничиваться во внешнем электрическом поле (обратный МЭ эффект). Актуальность создания новых магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов возникла в связи с тем, что в отличие от монокристаллов, они обладают сравнительно более сильным МЭ эффектом при комнатной температуре и высокой технологичностью, которая заключается в возможности выбора состава и соотношения компонентов. Одним из способов получения более сильного МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах является использование неоднородных по составу исходных компонентов. Например, наличие градиентов состава исходных компонентов может вызывать изменения магнитострикционного или пьезоэлектрического эффектов. Если направление варьирования перпендикулярно плоскости слоя, то в слое появляется дополнительный изгибающий момент, который приводит к дополнительным изгибным деформациям и изменению величины МЭ эффекта.

Градиент свойств материала может быть реализован путем варьирования концентрации примесей вдоль одного из направлений. Примером неоднородной по составу структуры является также слоистая структура, получаемая путем механического соединения слоев, отличающихся значением своих физико-химических или геометрических параметров.

Таким образом, исследование и создание МЭ материалов на основе неоднородных компонентов на сегодняшний день является актуальной задачей, ввиду того, что их использование приведет к увеличению МЭ коэффициентов, что представляет интерес с точки зрения практического использования МЭ эффекта.

Целью настоящей работы является исследование МЭ взаимодействия в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических материалах на основе неоднородных по составу компонентов.

Для достижения указанной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Разработать теоретическую модель низкочастотного МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

2. Разработать теоретическую модель МЭ эффекта в области изгибной моды в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

3. Получить выражения для МЭ коэффициента по напряжению через параметры, геометрические размеры магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз.

4. Рассчитать и сравнить с данными измерений частотные зависимости МЭ коэффициента по напряжению для различных значений материальных параметров и геометрических размеров структур.

5. Разработать рекомендации по практическому использованию МЭ взаимодействия в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических материалах на основе неоднородных по составу компонентов

В качестве объекта исследований выбраны слоистые магнитострикционно-пьезоэлектрические образцы на основе неоднородных компонентов, состоящие из поликристаллического цирконата-титаната свинца (ЦТС), никеля, пермендюра, метгласа.

Методы проведенных исследований. При математическом моделировании МЭ взаимодействия использовались уравнения эластостатики, эластодинамики, электростатики, магнитостатики. Численные расчеты выполнены с помощью математического пакета Maple. Для измерения прямого МЭ эффекта применялся метод регистрации э.д.с., возникающей на образце при приложении постоянного и переменного магнитных полей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана теоретическая модель низкочастотного МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

2. Впервые получены приближенные выражения для низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению через параметры, геометрические размеры магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с

разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

3. Построена теоретическая модель МЭ эффекта в области изгибной моды в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

4. Получены приближенные выражения для МЭ коэффициента по напряжению в области изгибной моды через параметры, геометрические размеры магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз в магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации, а также пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

5. Исследованы частотные зависимости МЭ коэффициента по напряжению для различных значений материальных параметров и геометрических размеров структур.

Практическая значимость работы

1. Полученные явные выражения для МЭ коэффициента по напряжению позволяют рассчитывать концентрационные и частотные характеристики МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с учетом изгибных деформаций и неоднородностей состава исходных компонентов.

2. На основании полученных теоретических результатов получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, позволяющие рассчитывать МЭ характеристики структур на основе параметров исходных магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз.

3. Построена модель электрически управляемого индуктивного элемента на основе слоистой структуры состава пьезоэлектрический биморфный

преобразователь - магнитострикционный материал. Полученные выражения для индуктивности и ее относительной перестройки позволяют рассчитывать оптимальные параметры устройства.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Низкочастотный МЭ эффект в двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре обусловлен взаимодействием фаз через аксиальные и изгибные деформации. Замена исходных однородных магнитострикционных (пьезоэлектрических) слоев на два слоя с разными знаками магнитострикции (пьезоэлектрических коэффициентов) приводит к росту величины МЭ эффекта на низких частотах при определенных соотношениях толщин компонентов, обусловленному изменением вкладов аксиальных и изгибных деформаций.

2. Использование двухслойной магнитной (пьезоэлектрической) компоненты с разными знаками магнитострикции (пьезоэлектрических коэффициентов) в составе магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры приводит к росту величины МЭ эффекта в области изгибной моды при определенных соотношениях толщин компонентов, обусловленному увеличением изгибных деформаций, по сравнению с двухслойной структурой на основе однородных магнитострикционных (пьезоэлектрических) слоев.

3. МЭ коэффициент по напряжению слоистой структуры на основе пьезоэлектрика ЦТС и двухслойного ферромагнетика с разными знаками магнитострикции (никеля и пермендюра), а также магнитострикционного материала и пьезоэлектрического биморфного преобразователя ЦТС на 50-60 % превышает МЭ коэффициент структуры на основе однородных компонентов при оптимальных соотношениях толщин компонентов.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием апробированных методов теории конденсированных сред,

обоснованностью принятых допущений, совпадением предельных переходов с известными ранее результатами, совпадением результатов теоретического исследования с экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные материалы, изложенные в диссертационной работе, были представлены на Международных и Всероссийских конференциях:

1) Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ-18, секция 18-материаловедение, 29 марта-5 апреля 2012 г., г. Красноярск.

2) Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ-19, секция 15-радиофизика, 28 марта-4 апреля 2013 г., г. Архангельск.

3) XX научная конференции студентов, аспирантов и преподавателей НовГУ, апрель 2013.

4) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2012), Moscow, Russia, 19-23 August, 2012.

5) Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2013), Stockholm, Sweden, 12-15 August, 2013.

5) 11th International Conference on Applied Electromagnetics - ПЕС 2013, Nis, Serbia.

6) V Научно-техническая конференция молодых специалистов, 14 мая 2014 г, ОАО «РИМР», г. Санкт-Петербург.

7) XXI научная конференции студентов, аспирантов и преподавателей НовГУ, апрель 2014.

Внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертации, являются частью НИР:

Грант № 0011268 по программе «УМНИК» 2014-2015 г. «Разработка управляемого индуктивного элемента на основе магнитоэлектрического эффекта».

Грант РФФИ 14-42-06005 р_север_а «Разработка физических основ создания перестраиваемых монолитных керамических фильтров СВЧ диапазона» 2014 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано **9 статей**, из них **5 статей** в журналах, входящих в перечень ВАК, получены **1 патент** на полезную модель, **2 свидетельства** о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также опубликованы **тезисы 2 докладов** на Международных и Всероссийских научных конференциях.

Личный вклад автора. Обсуждение и формулировка цели и задач работы проведено совместно с научным руководителем. Построение математических моделей и вывод конечных формул, а также разработка плана эксперимента и обработка экспериментальных данных выполнены лично автором. Подготовка и обсуждение публикаций проводились при участии соавторов.

1 МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект в твёрдом теле был предсказан Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем в 1957 г. [1]. МЭ эффект проявляется в виде индуцирования электрической поляризации в материале во внешнем магнитном поле или в появления намагниченности во внешнем электрическом поле:

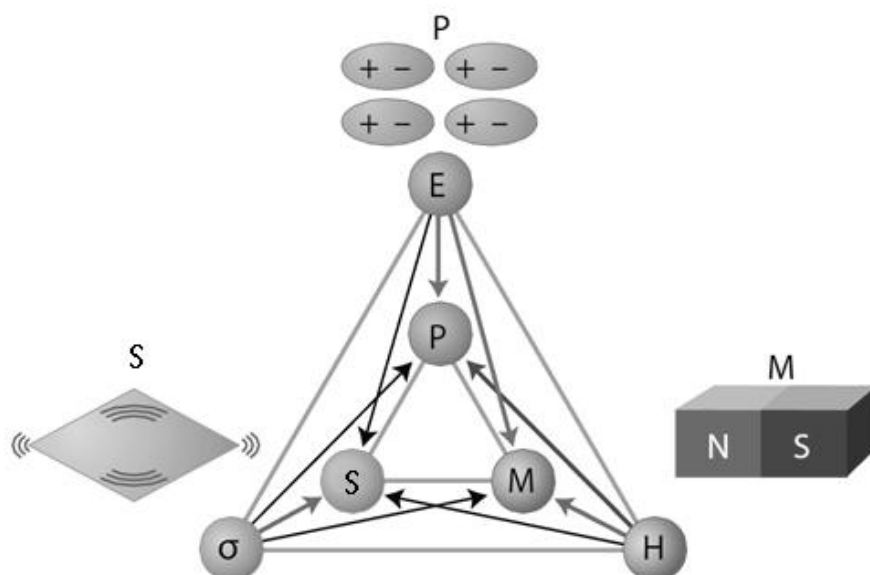
$$P_i = \alpha_{ij} H_j, \quad (1.1)$$

$$M_i = \alpha_{ji} / \mu_0 E_j, \quad (1.2)$$

где P_i – электрическая поляризация, M_i – намагниченность, E_j и H_j – электрическое и магнитное поля, α_{ij} – МЭ восприимчивость, μ_0 – магнитная постоянная.

И.Е. Дзялошинский теоретически показал, что в оксиде хрома должен иметь место МЭ эффект [2]. Д.Н. Астров экспериментально обнаружил МЭ эффект в оксиде хрома в 1960 г. [3]. Вслед за Д.Н. Астровым Folen et al. измерили МЭ эффект, индуцированный магнитным полем [4]. МЭ свойства однофазных материалов изучались многими авторами [5-20]. Однако, большинство однофазных материалов характеризуются малыми значениями МЭ коэффициентов, не достаточными для практического использования, при этом МЭ эффект наблюдается только при температурах, значительно ниже комнатной. Для композиционных материалов МЭ эффект может наблюдаться при комнатной температуре, причем его величина значительно больше по сравнению с однофазными материалами. Таким образом, композиционные материалы открывают широкие возможности варьирования их физических свойств, а значит и оптимизации характеристик устройств на их основе.

Механизм возникновения МЭ эффекта в композиционных материалах пояснен на рис. 1.1 и 1.2 [8].

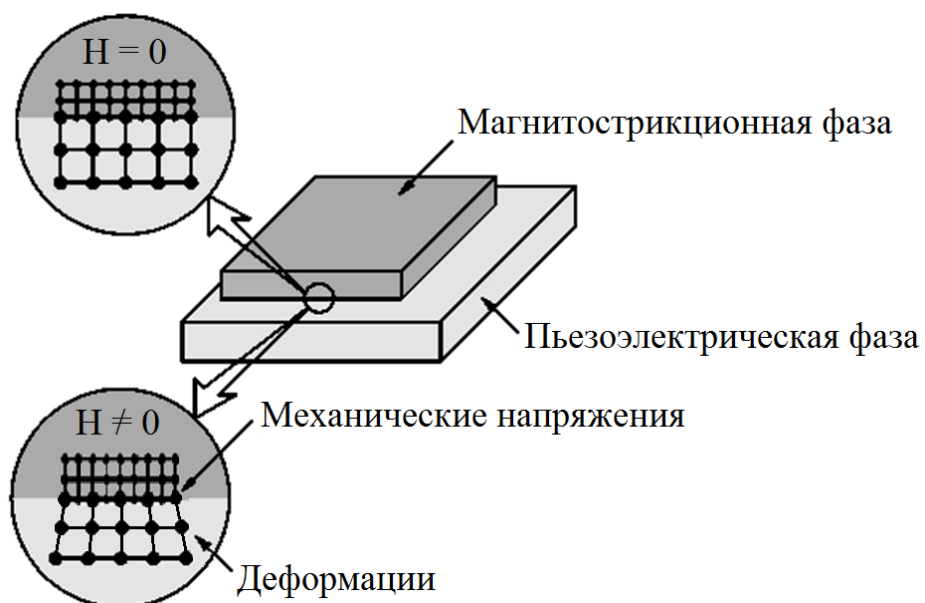


$H \rightarrow P$ – магнитоэлектрический эффект,
 $E \rightarrow M$ – обратный магнитоэлектрический эффект,
 $H \rightarrow S$ – магнитострикционный эффект,
 $\sigma \rightarrow M$ – магнитоупругий эффект (эффект Виллари),
 $E \rightarrow S$ – обратный пьезоэлектрический эффект,
 $\sigma \rightarrow P$ – пьезоэлектрический эффект.

Рисунок 1.1 – Механизм возникновения МЭ эффекта. В обозначениях S – деформация, σ – механическое напряжение.

При помещении образца в магнитное поле, пьезомагнитный материал деформируется, что приводит к возникновению механических напряжений в пьезоэлектрической компоненте, а, следовательно, и к электрической поляризации, появляющейся вследствие пьезоэлектрического эффекта. В случае обратного МЭ эффекта при подаче напряжения на электроды происходит поляризация пьезоэлектрической пластины, из-за чего в ней вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта возникает деформация, которая в виде механических напряжений передается в магнитострикционную фазу. Вследствие магнитоупругого эффекта магнитострикционная фаза намагничивается, что в свою очередь дает изменение магнитной проницаемости пьезомагнитного материала.

Прямой МЭ эффект



Обратный МЭ эффект

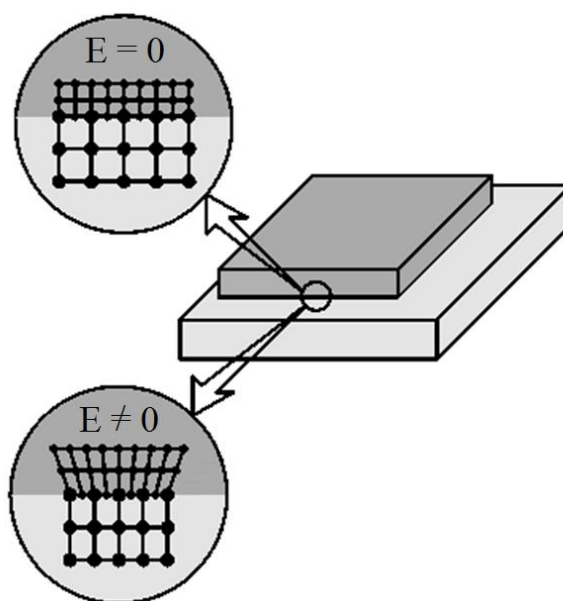


Рисунок 1.2 – Взаимодействие электрической и магнитной фаз при возникновении прямого и обратного МЭ эффекта

1.1 Исходные материалы для слоистых структур

Как известно, в монокристаллических материалах МЭ эффект проявляется при сравнительно низких температурах, а величина МЭ взаимодействия в них слишком мала для практического применения. В связи с этим в настоящее время широко используются искусственные магнитоэлектрики, представляющие собой механические соединения магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов. Комбинируя состав и соотношение этих фаз, можно получать композиционные материалы с требуемыми свойствами, что делает их перспективными для технического применения.

В настоящей работе объектами исследования были выбраны слоистые композиционные структуры. Как показывает опыт предыдущих исследований, слоистые МЭ материалы наиболее эффективны по сравнению с объемными композитами. Величина МЭ эффекта в слоистых композитах как правило выше, чем в объемных структурах благодаря отсутствию тока утечки, легкости поляризации и усилению пьезоэлектрического эффекта. При проведении научно-исследовательских работ четкое разделение магнитных и пьезоэлектрических слоев позволяет лучше контролировать химический состав экспериментальных образцов, а соединение слоев достаточно легко реализовать в элементарных лабораторных условиях. Но важно также отметить, что МЭ взаимодействие в таких структурах обусловлено упругой связью магнитных и сегнетоэлектрических слоев, и, таким образом, величина МЭ эффекта в таких материалах в существенной степени определяется не только характером деформирования структуры, но и качеством межслоевого соединения.

1.1.1 Материалы для магнитной фазы

Для наиболее эффективного преобразования магнитной энергии в механическую требуются материалы, обладающие высоким значением

магнитострикции. Никель, пермендюр и метглас в полной мере удовлетворяют заявленному требованию, в связи, с чем выбраны для теоретических и экспериментальных исследований. Данные материалы относятся к ферромагнетикам – классу веществ, обладающих магнитным упорядочением. В отличие от пара и диамагнитных веществ в ферромагнетиках магнитострикционные явления имеют ряд качественных особенностей, обусловленных наличием у последних спонтанной намагниченности. На рис. 1.3 в качестве примера дана зависимость линейной магнитострикции λ ($\lambda = \Delta l/l$ относительное изменение длины) никеля от напряженности магнитного поля H . Как видно, магнитострикция никеля уже в сравнительно слабых магнитных полях достигает некоторого предельного значения (насыщения) и затем мало меняется при дальнейшем увеличении напряженности поля H . Это обстоятельство указывает на то, что магнитострикция ферромагнетиков зависит не от H , а от намагниченности M . Величину магнитострикции при техническом насыщении называют магнитострикцией насыщения λ_s и обычно принимают в качестве основной характеристики магнитострикционных свойств ферромагнетиков.

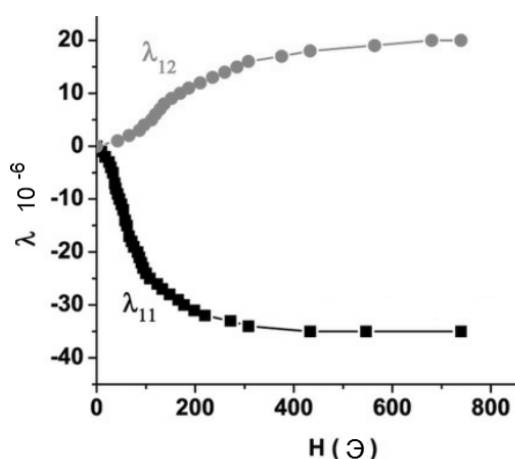


Рисунок 1.3 – Зависимость магнитострикции никеля от напряженности постоянного магнитного поля [22]

Метглас (российский аналог АМАГ) представляет собой аморфную ленту на основе кобальта или железа-никеля с высоким значением магнитострикции. Применение аморфного материала обеспечивает высочайшие значения магнитной проницаемости, малую коэрцитивную силу, высокие значения индукции насыщения и удельного электрического сопротивления, что обуславливает снижение потерь на гистерезис и вихревые токи. Кроме того, аморфные сплавы имеют высокую прочность и износостойкость, а также исключительную коррозионную стойкость даже в некоторых агрессивных средах (морской воде, кислотах).

Также достаточно перспективным магнитострикционным материалом является никель, обладающий гигантским значением пьезомагнитного коэффициента q_{33} , которое наблюдается при относительно слабом подмагничивающем поле (не более 100 Э). Никель, как и метглас, характеризуется высокой коррозионной стойкостью – устойчив на воздухе, в воде, в щелочах и в ряде кислот. Кроме того, высокая технологичность никеля позволяет относительно легко получать слоистые магнитострикционно-пьезоэлектрические структуры методом напыления.

Пермендюр представляет собой железокобальтовый сплав. Наиболее перспективным является легированный ванадием прецизионный сплав К50Ф2. Этот сплав отличается наивысшим значением индукции насыщения из всех выпускаемых материалов. Для него характерны высокие магнитострикционные характеристики в широком диапазоне температур, большие значения магнитной проницаемости. Однако при столь хороших магнитных параметрах этот сплав плохо обрабатывается механически, неустойчив к коррозии и достаточно дорог.

1.1.2 Материалы для пьезоэлектрической фазы

При прямом пьезоэлектрическом эффекте деформация образца приводит к возникновению электрического напряжения между поверхностями

деформируемого твердого тела, в обратном случае приложение напряжения к телу вызывает его деформацию.

Наиболее перспективным пьезоэлектрическим материалом является пьезокерамика. Технология производства пьезокерамики проста, а значит, удастся значительно снизить стоимость преобразователей на ее основе. Высокая радиационная стойкость пьезокерамических материалов ставит вне конкуренции те устройства на их базе, которые рассчитаны на работу в условиях повышенной радиации. Пьезокерамические элементы исключительно стойки к действию различных агрессивных сред. Это позволяет использовать пьезокерамические устройства во многих сложных химических производствах. [24, 25]

ЦТС – условное наименование серии технических пьезокерамических материалов, разработанных на основе твердых растворов титаната свинца PbTiO_3 и цирконата свинца PbTiO_3 в виде плотно спеченных поликристаллических образцов. Эти твердые растворы обладают высокими значениями пьезоэлектрических характеристик. Температура точки Кюри этих материалов, как правило, превышает 250°C , и у них отсутствуют низкотемпературные фазовые переходы, что приводит к большей стабильности диэлектрической проницаемости, пьезомодуля и резонансных частот пьезоэлектрических элементов [24].

Важными параметрами пьезокерамики являются пьезомодуль, пьезоконстанта, диэлектрическая проницаемость, модуль упругости, механическая добротность, температура точки Кюри. Пьезомодуль является параметром конкретного материала и определяет величину генерируемого электрического заряда на электродах пьезоэлемента от действующей на него силы. В конечном итоге от величины пьезомодуля зависит значение коэффициента преобразования электрической энергии в механическую.

Пьезокерамика приобретает пьезоактивность только после предварительного процесса поляризации, происходящего под воздействием временно приложенного электрического поля, в результате чего,

большинство из хаотически ориентированных доменов, после снятия внешнего поля приобретают преимущественную ориентацию. Для практического использования из пьезоэлектрического материала выполняются пьезоэлементы, имеющие заданные геометрические параметры и электроды, необходимые для снятия и подачи электрического сигнала.

В данной работе рассматриваются два вида деформации: растяжения-сжатия и изгиба. Следовательно, из всей известной матрицы пьезомодулей используются только пьезомодули d_{33} и d_{31} , которые характеризуют электростатические заряды, образующиеся на обкладках образца при действии нормальных механических напряжений в направлении предшествующей поляризации (d_{33}) и перпендикулярном к нему (d_{31}).

Для теоретических и экспериментальных исследований в данной работе выбран пьезокерамический материал общего назначения ЦТС-19. Данный сорт керамики имеет достаточно высокое значение пьезоэлектрического модуля и применяется для изготовления высокочувствительных преобразователей, работающих без жестких требований по стабильности параметров дестабилизирующих факторов. Также для теоретических оценок выбран монокристаллический сегнетоэлектрический твердый раствор $\text{Pb}(\text{Mg}^{1/3}\text{Nb}^{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT), демонстрирующий еще более высокие пьезоэлектрические параметры.

1.2 Магнитоэлектрический эффект в структурах на основе неоднородных компонентов

Градиентные материалы представляют собой композиционные или однофазные материалы, функциональные свойства которых скачкообразно или равномерно изменяются по объему. Изменение свойств градиентных материалов, как правило, связано с соответствующим варьированием химического состава или структуры материала.

Градиент свойств материалов может быть получен при механическом соединении слоев, отличающихся значениями своих физико-химических и/или геометрических параметров. Кроме того, градиент свойств материалов может быть реализован путем варьирования концентрации примесей вдоль одного из направлений. В данном случае состав материала, а, следовательно, и свойства, непрерывно изменяются по объему образца в соответствии с некоторой закономерностью.

В физике сегнетоэлектрических явлений создание и исследование структур с изменяющимся по объему составом – градиентных пьезоэлектриков началось с середины 90-х годов. В работах [26-31] представлены последние научные исследования физических свойств градиентных сегнетоэлектрических структур. Сравнительно недавно в ведущих научных журналах появились работы, касающиеся исследования функционально градиентных ферромагнетиков. Теоретические и экспериментальные данные по этой теме отражены в ряде работ [32-33].

В сегнетоэлектриках градиент состава приводит к появлению внутренней поляризации и спонтанной деформации, а также к увеличению диэлектрической проницаемости. В ферромагнетиках градиент намагниченности приводит к возникновению наведенной магнитной анизотропии или внутреннему магнитному полю.

Теоретические и экспериментальные исследования МЭ эффекта [34-45] говорят о том, что использование градиентных магнитной и сегнетоэлектрической фаз в составе магнитострикционно-пьезоэлектрических композитов повышает эффективность МЭ взаимодействия на 50 – 60 % по сравнению с двухслойными структурами с гомогенным составом фаз. В асимметричных структурах внешнее магнитное поле приводит к появлению растягивающего (сжимающего) усилия и изгибного момента. МЭ эффект определяется суммарным продольным механическим напряжением, которое является суммой аксиальной и изгибной компонентов. Поскольку это компоненты имеют разные знаки,

наблюдается ослабление МЭ эффекта для несимметричных структур с однородными компонентами. Использование градиентных по составу ферромагнитной и пьезоэлектрической компонентов позволяет получить дополнительный вращающий момент, который используется для компенсации изгиба образца и, следовательно, увеличения МЭ эффекта. Направление градиента пьезомагнитных/ сегнетоэлектрических свойств выбирается перпендикулярным плоскости образца для того, чтобы изгибной момент, вызванный наличием градиента, приводил к снижению суммарной изгибной деформации.

При возникновении традиционного МЭ эффекта взаимодействие магнитострикционной и пьезоэлектрической подсистем происходит посредством упругих деформаций. Однако, отличительной особенностью композита с градиентным ферромагнетиком является наличие в нем внутренней намагниченности. Эта намагниченность приводит к новому типу МЭ взаимодействия, которое возможно даже в отсутствие магнитострикционного взаимодействия. В этом случае физический механизм МЭ эффекта состоит в следующем: внутренняя намагниченность взаимодействует с приложенным к образцу переменным магнитным полем и приводит к возникновению вращательного момента в магнитной фазе. Возникшие изгибные деформации передаются в пьезоэлектрический слой, в котором индуцированное выходное напряжение определяется средним значением продольной составляющей механического напряжения. Важно отметить, что магнитные слои должны обладать различными значениями намагниченности насыщения, причем намагниченность насыщения внешнего магнитного слоя должна быть больше, чем граничащего с пьезоэлектриком.

Поскольку использование градиентных компонентов в составе магнитострикционно-пьезоэлектрических композитов может существенно повысить эффективность МЭ взаимодействия, такие материалы также могут быть полезны при создании устройств и приборов на основе МЭ эффекта, и

поэтому представляют большой интерес для научных и практических исследований.

Основным недостатком функциональных устройств на основе МЭ эффекта является то, что для оптимизации величины МЭ взаимодействия необходимо использовать предварительную электрическую поляризацию образца и подмагничивание внешним постоянным магнитным полем. Процесс поляризации заключается в нагреве образца до температуры выше температуры Кюри и медленном охлаждении в постоянном электрическом поле. Величина подмагничивающего поля выбирается из условия достижения максимального пьезомагнитного модуля, при котором величина МЭ эффекта максимальна[46]. Процесс предварительной поляризации и подмагничивания образца заметно усложняет технологический процесс и подразумевает введение в конструкцию устройств дополнительных элементов.

От степени поляризации пьезоэлектрика зависит величина пьезоэлектрического эффекта. Операция поляризации направлена на ориентирование доменной структуры сегнетоэлектриков в одном преимущественном направлении. При температуре ниже точки Кюри сегнетоэлектрик имеет области с различными направлениями спонтанной поляризации - домены. Под влиянием постоянного электрического поля некоторая часть доменов ориентируется в направлении приложенного поля. После снятия внешнего поля значительная часть доменов удерживается в своем новом положении из-за внутреннего поля, которое возникает в результате параллельной ориентации направлений поляризации доменов.

Перспективным техническим решением по созданию внутреннего электрического поля в образце, а, следовательно, поляризации, является использование градиентных пьезоэлектриков вместо однородных. Амплитуда внутреннего электрического поля определяется градиентом поляризации образца [45]

$$E_i = -\frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^L \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (1.3)$$

Перспективность использования магнитной фазы с градиентом намагниченности в составе МЭ композитов исходит из следующих соображений. В большинстве известных магнитоупорядоченных материалах, обладающих магнитострикцией, не обнаруживается пьезомагнитный эффект. По этой причине МЭ эффект в композиционных материалах не линейен. Это затрудняет использование композитов в линейных устройствах, т. к. для линеаризации МЭ свойств композиционных материалов требуется наличие подмагничивающего поля. В этом случае в интервале магнитных полей, малых по сравнению с подмагничивающим полем, МЭ эффект будет близок к линейному [21]. Таким образом, вместо использования подмагничивающего элемента, постоянное магнитное поле может быть создано путем применения ферромагнитного материала с градиентом намагниченности.

Амплитуда внутреннего постоянного магнитного поля вычисляется по следующей формуле [45]

$$H_i = -\frac{1}{\mu_0} \int_0^L \frac{\partial M}{\partial x} dx \quad (1.4)$$

Приведенные выше выражения (1.3) и (1.4) показывают, что соответствующий выбор градиента поляризации и намагниченности, а также длины образца позволяет создавать электрическое и магнитное поля внутри образца, необходимых для получения максимального пьезоэлектрического и пьезомагнитного коэффициентов. [46] В таком случае не возникает необходимости в предварительной поляризации и подмагничивании образца.

МЭ эффект в композиционных материалах на основе градиентных компонентов прежде был рассмотрен в работах [34] на примере двухслойной структуры состава феррит-цинка никеля - цирконат-титанат свинца (NZFO-ЦТС) с осью изменения свойств, перпендикулярной плоскости образца. Данный материал представляет собой двухслойную структуру, состоящую из сегнетоэлектрика с линейно изменяющимся по толщине пьезоэлектрическим

коэффициентом и диэлектрической проницаемостью, и феррит с линейно меняющимся по толщине пьезомагнитным коэффициентом.

На рис. 1.4 приведены расчетные данные по МЭ эффекту в слоистой структуре состава NZFO-ЦТС, обладающей градиентом намагниченности насыщения, направленным вдоль границы раздела в плоскости образца. Вдоль этой же оси направлено внутреннее магнитное поле, определяемое формулой (1.4). На чертеже приведена расчетная зависимость МЭ коэффициента по напряжению α_E от величины подмагничивающего поля H_0 для равных объемных долей феррита и ЦТС. Переменное магнитное поле полагается направленным параллельно внутреннему подмагничивающему полю, а направление поляризации и переменного магнитного поля - перпендикулярно плоскости образца. Изменение концентрации цинка от 0,3 до 0,5 приводит к градиенту намагниченности в плоскости образца, вследствие чего возникает внутреннее магнитное поле величиной в 44 Э. Теоретически предполагается, что изменение концентрации цинка от 0,2 до 0,5 позволяет увеличить внутреннее магнитное поле до 60 Э. Использование подмагничивающего поля величиной 60 Э приводит к оптимизации МЭ эффекта в структуре NZFO-ЦТС и обеспечивает получение МЭ коэффициента по напряжению величиной 450 мВ/см Э [45].

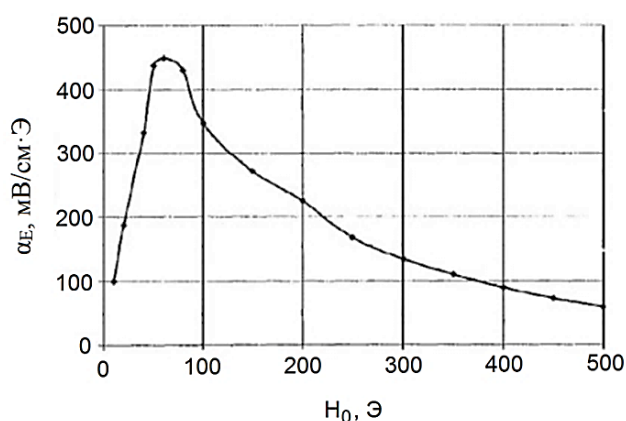


Рисунок 1.4 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от величины подмагничивающего поля для двухслойной градиентной структуры феррит цинка никеля – ЦТС.

Рассмотрим двухслойную структуру, состоящую из никель-цинкового феррита с переменным содержанием цинка и ЦТС переменного состава. Будем считать, что в никель-цинковом феррите пьезомагнитный коэффициент линейно изменяется в зависимости от координаты z следующим образом

$${}^m q_{11} = {}^m q_{110} (1 + 2kz_1/{}^m t) \quad (1.5)$$

$$- {}^m t/2 \leq z_1 \leq {}^m t/2$$

где ${}^m q_0$ – среднее значение пьезомагнитного коэффициента, коэффициент k определяет степень и направление изменение свойств в материале: $k > 0$ и $k < 0$ соответствует “положительному” и “отрицательному” направлению изменения магнитострикции. Пьезомагнитный коэффициент ${}^m q_{11}$ изменяется от - 680 pM/A для чистого феррит-никеля до - 1156 pM/A для феррит-цинка никеля с концентрацией цинка $x = 0.4$. Среднее значение пьезомагнитного коэффициента, используемое для феррита однородного состава, ${}^m q_{11} (z_1=0) = {}^m q_{110} = -918 \text{ } pM/A$, $|k|$ равно 0,26.

Аналогичным образом создан градиент пьезоэлектрического коэффициента и диэлектрической проницаемости в слое ЦТС

$${}^p d_{31} = {}^p d_{310} (1 + 2kz_2/{}^p t), \quad - {}^p t/2 \leq z_2 \leq {}^p t/2 \quad (1.6)$$

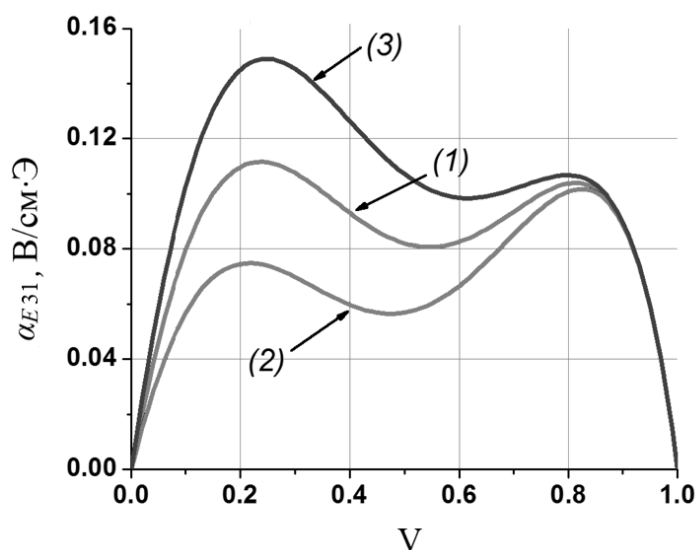
$${}^p \varepsilon_{33} = {}^p \varepsilon_{330} (1 + 2kz_2/{}^p t),$$

где ${}^p d_{310} = -175 \text{ } pM/B$, ${}^p \varepsilon_{330} / \varepsilon_0 = 1750$ и $|k| = 0,35$.

Результаты моделирования низкочастотного МЭ эффекта в структуре NZFO- ЦТС на основе градиентных компонентов приведены на рис. 1.5–1.7.

На рис. 1.5 представлена зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС в структуре состава ЦТС-NZFO для гомогенного слоя ЦТС и феррита цинка никеля с

положительным и отрицательным градиентом, а также гомогенного слоя феррита цинка никеля. В структуре с отрицательным градиентом феррита цинка никеля максимальное значение МЭ коэффициента имеет место для наиболее низких значений V объемной доли ЦТС, в то время как в феррите с положительным градиентом максимум сдвигается в область более высоких значений V . По сравнению с гомогенными структурами, МЭ коэффициент $\alpha_{E,31}$ увеличивается на 50% в случае применения структуры с отрицательным градиентом пьезомагнитного коэффициента в слое феррита цинка никеля. Такая зависимость возникает в результате уменьшения величины вращательного момента в ферритовом слое с отрицательным градиентом пьезомагнитного коэффициента q , а также к увеличению радиуса кривизны и продольной деформации ЦТС. Следует отметить, что МЭ коэффициент по напряжению в соответствии с формулой (2.22) определяется через среднее значение продольной деформации слоя ЦТС.



(1) структура NZFO-ЦТС с однородными компонентами

(2) Ni-Zn феррит с положительным градиентом — однородный ЦТС

(3) Ni-Zn феррит с отрицательным градиентом — однородный ЦТС

Рисунок 1.5 — Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для двухслойной структуры состава ЦТС- Ni-Zn феррит с однородным ЦТС.

На рис. 1.6 показана зависимость МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V в структуре состава NZFO-ЦТС для однородного никель-цинкового феррита и ЦТС с положительным и отрицательным градиентом, а также с однородным слоем ЦТС. Одновременные изменения коэффициентов ${}^p d_{31}$ и ${}^p \varepsilon_{33}$ приводят к постоянному значению отношения этих величин ${}^p d_{31}/{}^p \varepsilon_{33}$, что не влияет на величину МЭ коэффициента по напряжению в соответствии с формулой (2.22). Но градиент пьезоэлектрического коэффициента приводит к дополнительному изменению средней величины напряжения ${}^p T_1$. Таким образом, зависимость ${}^p d_{31}$ от z вызывает дополнительный изгибной момент, что приводит к увеличению МЭ коэффициента по напряжению в структуре с положительным градиентом ЦТС и к снижению МЭ коэффициента по напряжению в случае ЦТС с отрицательным градиентом, как показано на рис.1.6.

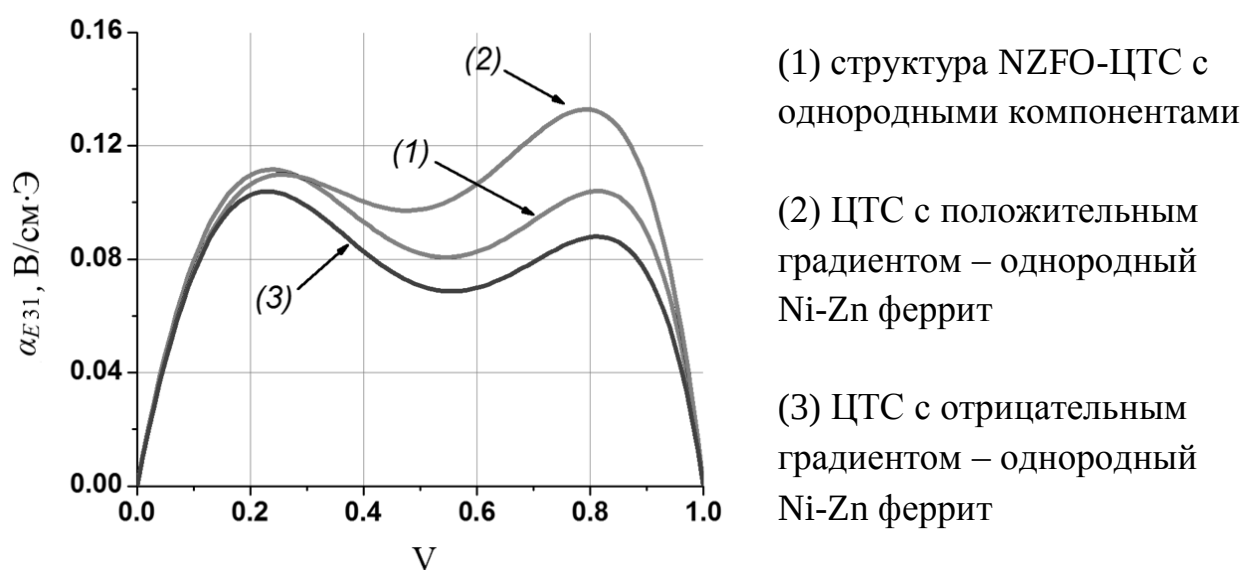
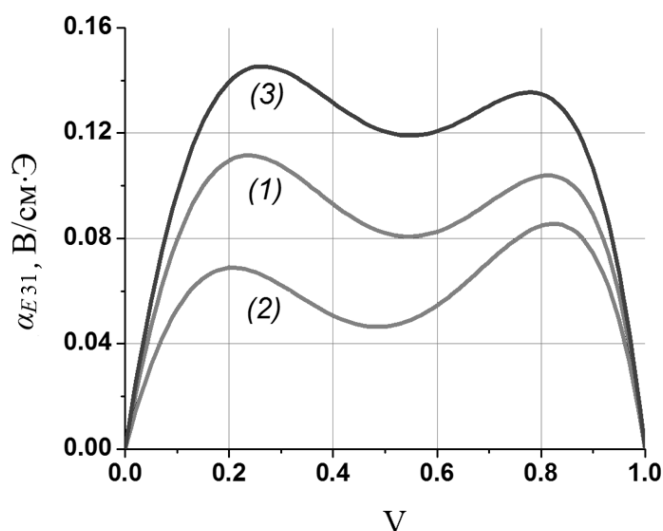


Рисунок 1.6 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для двухслойной структуры состава ЦТС- градиентный Ni-Zn феррит и ЦТС - однородный Ni-Zn феррит

На рис. 1.7 показана зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС в случае применения градиентных

компонентов для обеих фаз. Наиболее высокие значения МЭ коэффициента по напряжению достигаются в структуре, где NZFO имеет отрицательный градиент и ЦТС – положительный.



(1) NZFO-ЦТС с однородными компонентами

(2) NZFO с положительным градиентом и ЦТС с отрицательным градиентом

(3) NZFO с отрицательным градиентом и ЦТС с положительным градиентом

Рисунок 1.7 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для двухслойной структуры: (1) NZFO-ЦТС с однородными компонентами; (2), (3) NZFO-ЦТС на основе градиентных компонентов.

Далее рассмотрим МЭ эффект в двухслойной структуре NZFO-ЦТС на подложке из титаната стронция SrTiO_3 , толщина которой принята равной толщине двухслойной структуры (рис. 1.8). В этом случае зависимость МЭ коэффициента от объемной доли ЦТС имеет один максимум, что связано с уменьшением изгибных деформаций. Усиление МЭ эффекта связано с тем, что подложка вносит механическое напряжение того же знака, что и осевое напряжение в слое ЦТС.

На рис. 1.9 показано изменение МЭ коэффициента в зависимости от толщины подложки для объемной доли ЦТС равной 0.7. Увеличение толщины подложки приводит к уменьшению $\alpha_{E,31}$ вследствие эффекта зажатия. Для слоя NZFO с отрицательным градиентом и слоя ЦТС с положительным градиентом МЭ коэффициент по напряжению на 20% выше, чем в структуре с гомогенными компонентами. Это объясняется увеличением

среднего значения механического напряжения в ЦТС за счет появления дополнительного изгибного момента со стороны подложки.

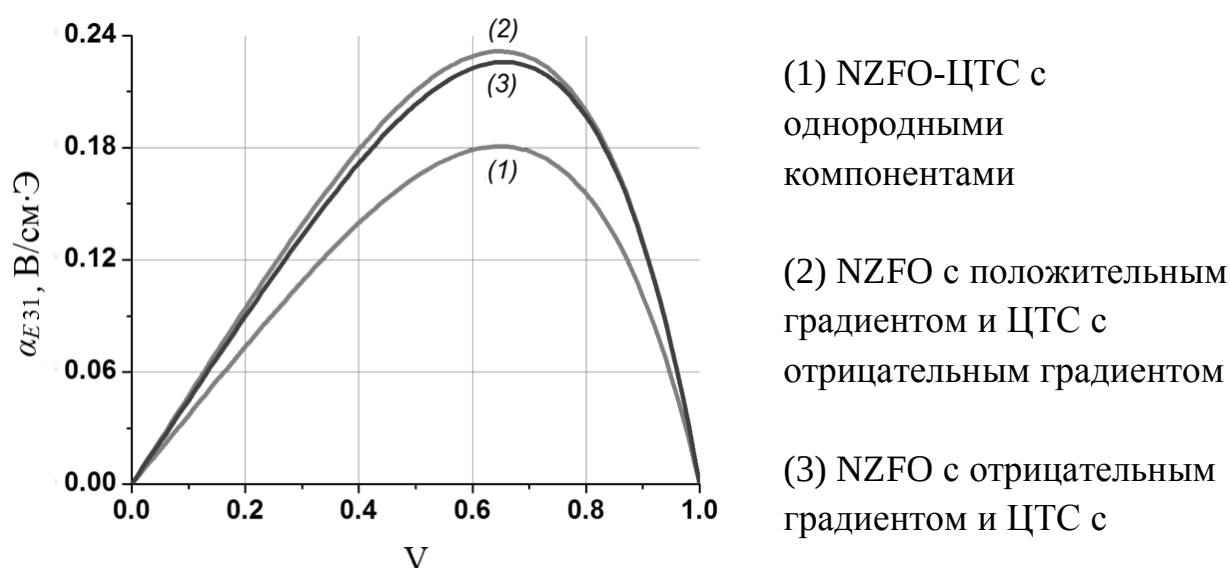
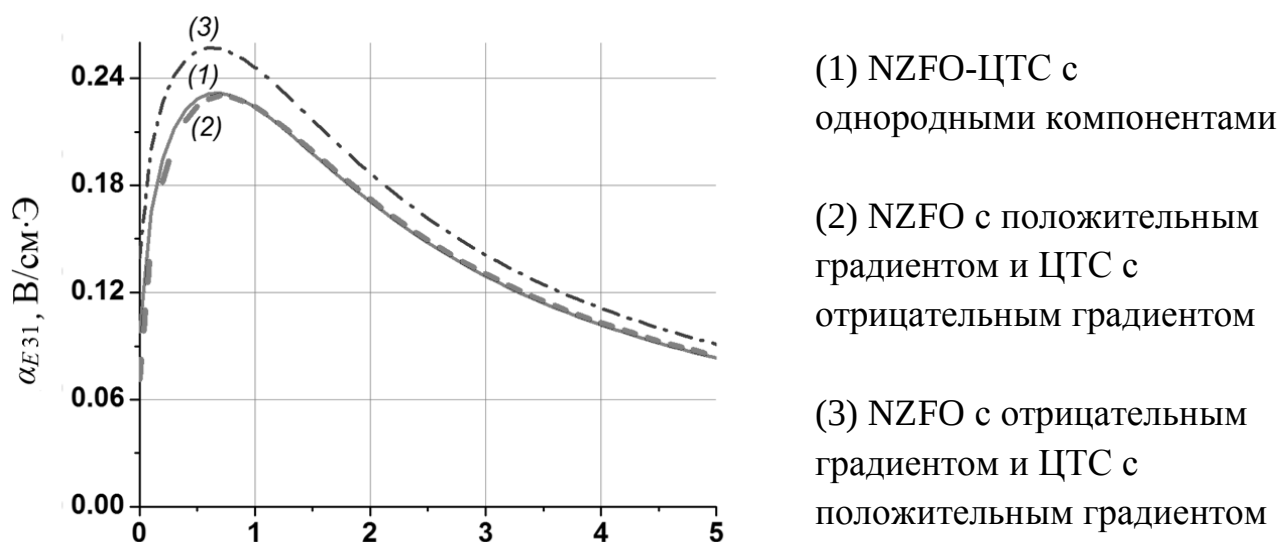


Рисунок 1.8 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для структуры NZFO-ЦТС на подложке из титаната стронция, толщина которой принята равной толщине двухслойной структуры.



Отношение толщин подложки и NZFO-ЦТС структуры

Рис. 1.9 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от соотношения толщины подложки к толщине двухслойной структуры. Численные оценки приводятся для объемной доли ЦТС, равной 0.7.

Далее рассмотрим МЭ эффект в структуре NZFO-ЦТС в области электромеханического резонанса (ЭМР). На рис. 1.10 показана частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для свободно-опертой двухслойной структуры состава градиентный NZFO-гомогенный ЦТС, длиной 12 мм и толщиной 2 мм с объемной долей ЦТС $V=0,3$. На резонансной частоте 5 кГц при возникновении изгибных колебаний в двухслойной структуре NZFO-ЦТС наблюдается пиковое увеличение МЭ коэффициента по напряжению.

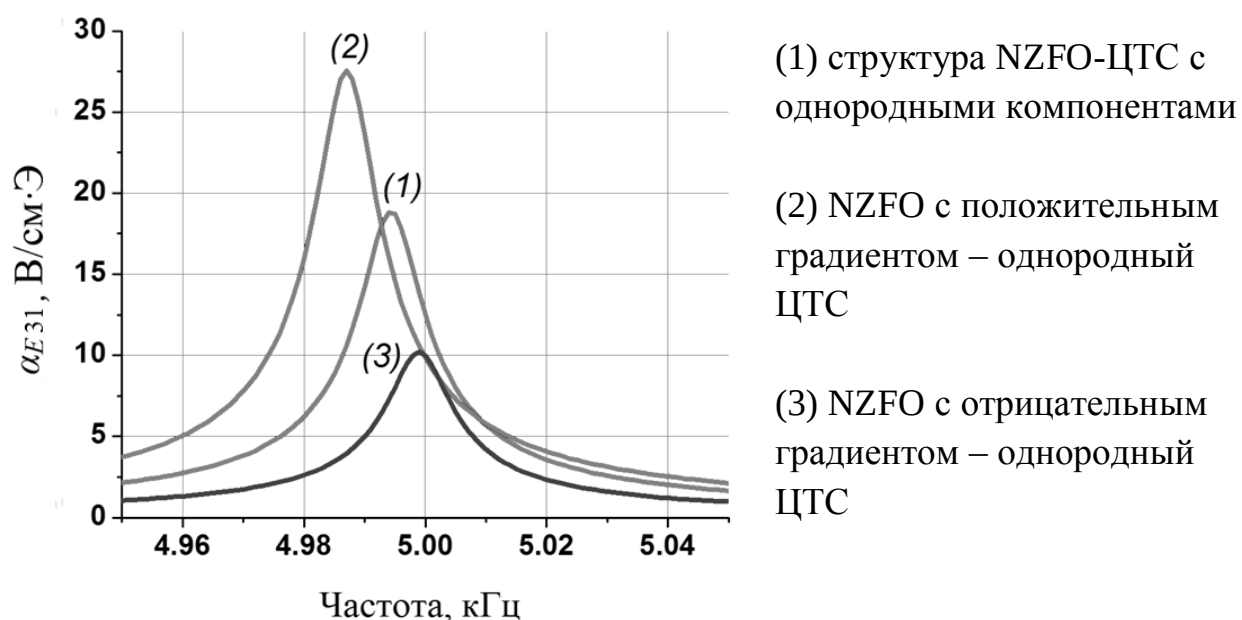


Рисунок 1.10 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты для свободно-опертой структуры состава ЦТС-NZFO с однородным слоем ЦТС.

Применение градиентных компонентов в феррит-пьезоэлектрической структуре приводит к небольшому сдвигу резонансной частоты. Также наблюдается увеличение $\alpha_{E,31}$ на 50% для положительного градиента пьезомагнитного коэффициента, по сравнению с гомогенным составом и 50%-ное снижение в случае отрицательного градиента. Такая зависимость

связана с увеличением изгибного момента в ферритовом слое с положительным градиентом и соответствующим увеличением продольной деформации слоя ЦТС, в результате чего происходит увеличение МЭ коэффициента по напряжению.

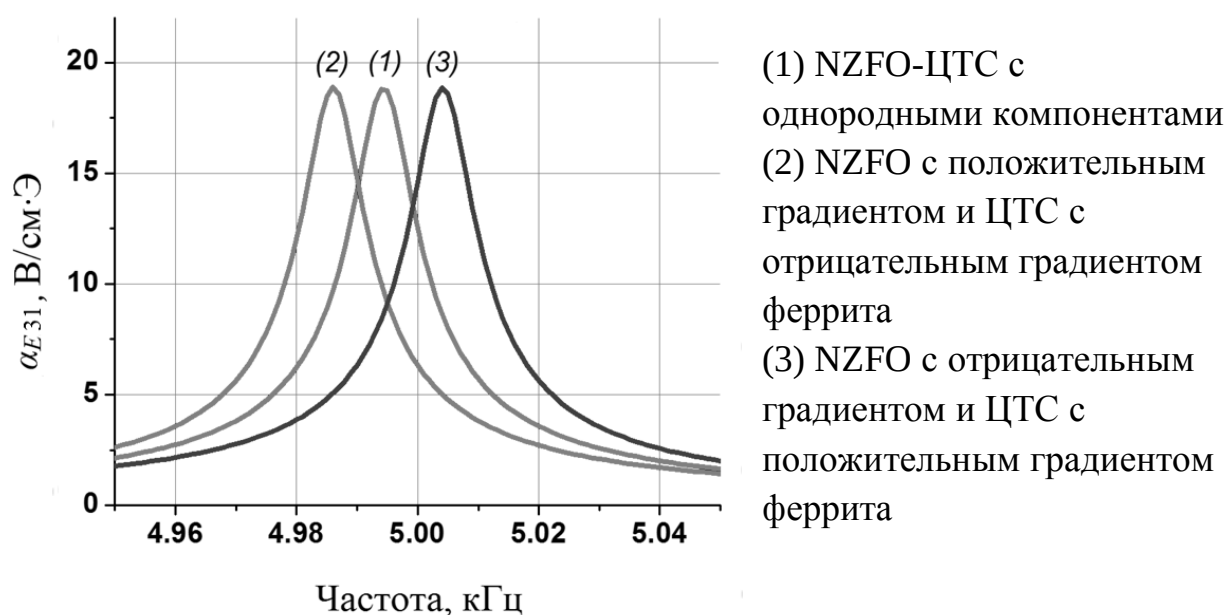


Рисунок 1.11 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты для свободно-опертой двухслойной структуры NZFO-ЦТС с однородным слоем NZFO. Объемная доля ЦТС составляет 0,3.

Аналогичная зависимость $\alpha_{E,31}$ от частоты для двухслойной структуры состава однородный NZFO-градиентный ЦТС показана на рис. 1.11. Видно, что использование градиентного слоя ЦТС приводит к сдвигу резонансной частоты, но без изменения величины $\alpha_{E,31}$. МЭ коэффициент остается без изменения, ввиду того, что пьезоэлектрический коэффициент и диэлектрическая проницаемость имеют одинаковый коэффициент k , определяющий степень и направления изменения свойств в материале, что приводит к постоянному значению величины d_{31}/ϵ_{33} . Основываясь на представленных результатах (рис. 1.11 и 1.12), можно сделать вывод, что

максимальное значение МЭ коэффициента по напряжению имеет место в случае структуры NZFO-ЦТС с положительным градиентом обеих фаз.

На рис. 1.12 представлена зависимость резонансного значения МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для структуры NZFO-ЦТС на основе однородных и градиентных компонентов. Максимальное напряжение наблюдается при объемной доле ЦТС равной приблизительно 0,6. Наиболее высокие значения $\alpha_{E,31}$ при любых значениях V позволяет получать структура, в которой обе фазы имеют положительный градиент. МЭ коэффициент по напряжению стремится к нулю при $V \approx 0,05$ для двухслойной структуры с компонентами гомогенного состава и относится к случаю, когда среднее значение осевого напряжения в ЦТС близко к нулю.

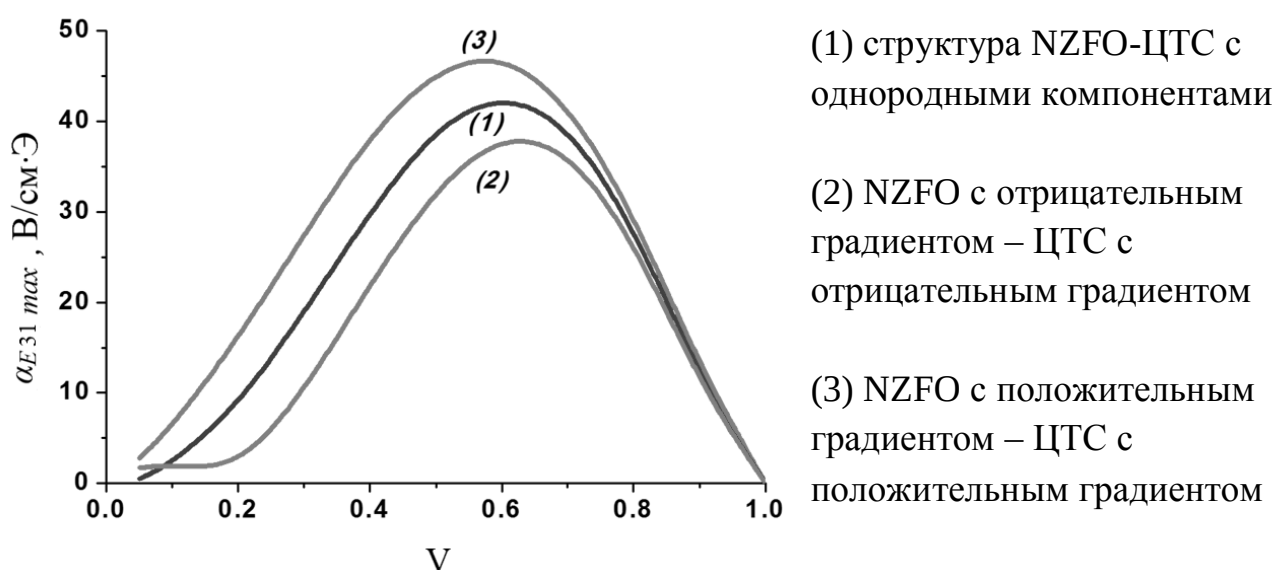


Рисунок 1.12 – Зависимость пикового значения МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС при возникновении резонанса изгибных колебаний для свободно-опертой двухслойной структуры NZFO-ЦТС

Наконец, рассмотрим резонансное увеличение МЭ эффекта в двухслойной структуре на подложке. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от резонансной частоты при возникновении изгибной моды

показаны на рис. 1.13. При увеличении толщины подложки происходит линейное возрастание резонансной частоты. Резонансное значение МЭ коэффициента по напряжению первоначально резко убывает с увеличением толщины подложки, пока не достигнет своего минимума приблизительно в точке 0,3. Минимум соответствует изменению знака среднего осевого напряжения в слое ЦТС. Затем МЭ коэффициент увеличивается до максимума с центром приблизительно в точке 1,8, после чего влияние градиента медленно ослабевает с увеличением толщины подложки.

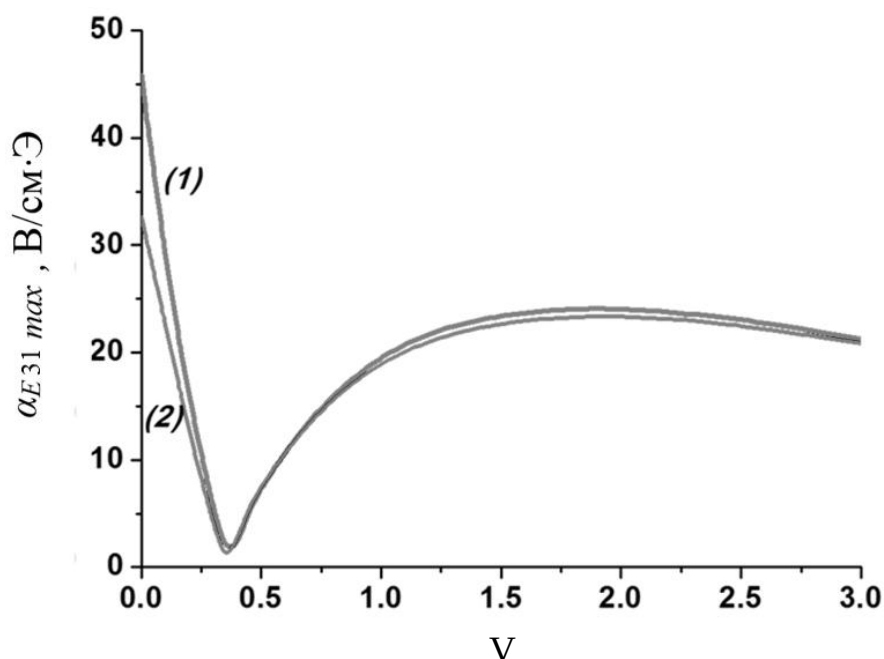


Рисунок 1.13 – Зависимость резонансного значения МЭ коэффициента по напряжению от соотношения толщин подложки и двухслойной структуры ЦТС-NZFO в области ЭМР при объемной доле ЦТС, равной 0.5: (1) NZFO с положительным градиентом – ЦТС с положительным градиентом, (2) NZFO с отрицательным градиентом – ЦТС с отрицательным градиентом

Известны данные измерений МЭ эффекта в трехслойных структурах на основе ЦТС с градиентной магнитной компонентой состава метглас-Ni при нулевом подмагничивающем поле. [35, 37] Низкочастотный МЭ коэффициент по напряжению для структур состава ЦТС-Ni-метглас (ЦТС-метглас-Ni) имеет максимум в пределах 0,4 – 3,4 В/см Э в зависимости от

толщины метгласа и направления градиента – так, в образце ЦТС-Ni-метглас МЭ коэффициент по напряжению α_E выше, чем в образце ЦТС-метглас-Ni, а наиболее эффективным образцом является структура с толщиной метгласа равной 75 мкм, что соответствует 3 слоям ленты толщиной 25 мкм.

Градиент пьезомагнитного коэффициента приводит также к существенному усилению МЭ взаимодействия при возникновении изгибного резонанса. В образцах, зажатых с одного конца, α_E колеблется от 40 до 220 В/см Э на резонансной частоте 170 – 180 Гц. Аналогично, в образцах ЦТС-Ni-метглас α_E выше, чем для образцов ЦТС-метглас-Ni, а наиболее эффективным являются образцы с количеством слоев метгласа равным пяти.

На рис. 1.14 представлены результаты зависимости МЭ коэффициента по напряжению от подмагничивающего поля для структуры метглас-Ni-ЦТС [36].

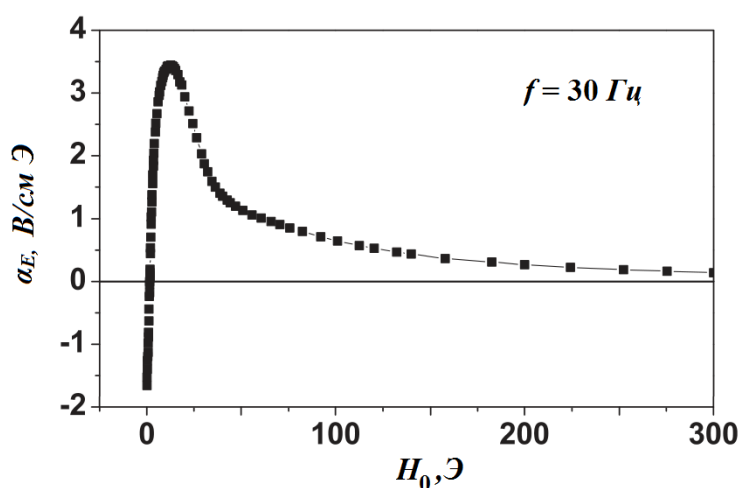


Рисунок 1.14 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от подмагничивающего поля для структуры метглас-Ni-ЦТС. Толщина метгласа равна 75 мкм (что соответствует 3 слоям). Подмагничивающее и переменное магнитные поля направлены параллельно плоскости образца.

На рис. 1.15 и 1.16 приведены частотные зависимости МЭ коэффициента при оптимальном подмагничивании и нулевом подмагничивающем поле.

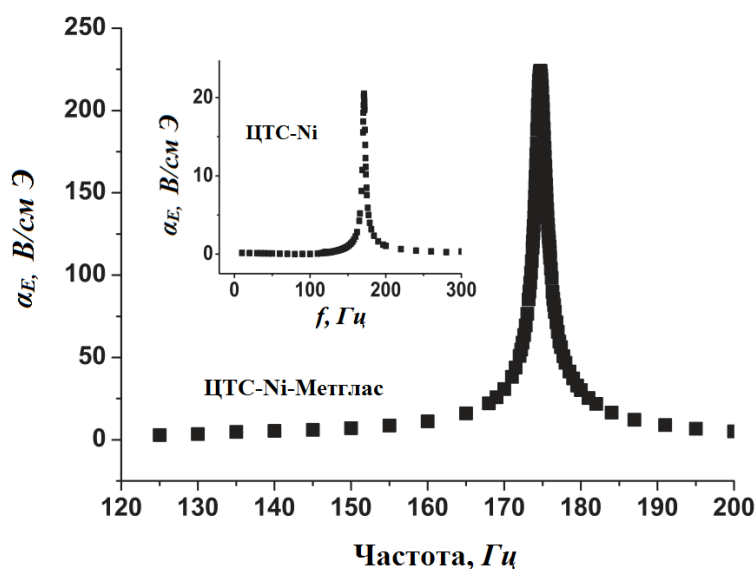


Рисунок 1.15 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты для структуры метглас-Ni-ЦТС. Слой метгласа состоит из 5 слоев ленты толщиной 25 мкм. Величина поля смещения соответствует максимуму МЭ коэффициента. На вставке показаны аналогичные данные для двухслойной структуры ЦТС-Ni.

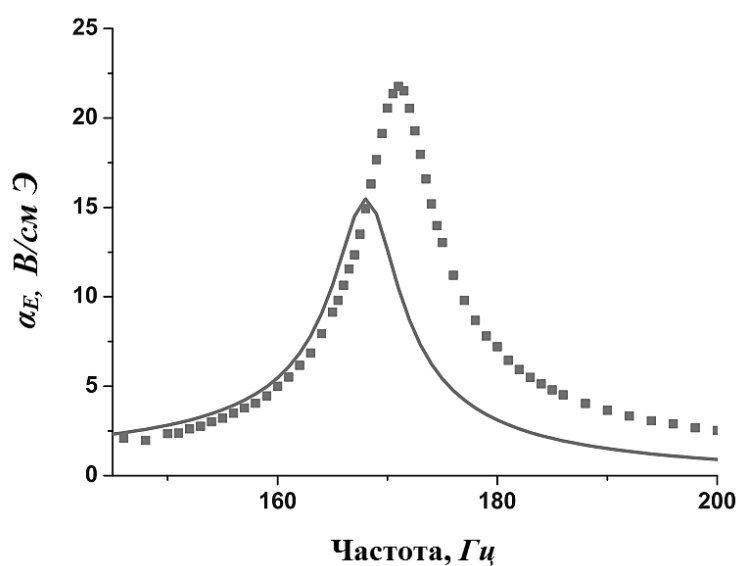


Рисунок 1.16 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты в отсутствии подмагничивающего поля для структуры метглас-Ni-ЦТС при нулевом подмагничивающем поле. Толщина метгласа равна 25 мкм. Сплошной линией обозначены теоретические данные, точками – экспериментальные.

Статья [38] посвящена экспериментальному исследованию МЭ эффекта в структуре пермендюр-Ni-ЦТС. Добавление слоя пермендюра с положительным значением пьезомагнитного коэффициента в 4 раза увеличивает величину максимума МЭ коэффициента по напряжению по сравнению с двухслойной структурой Ni-ЦТС. В области изгибного резонанса максимум МЭ коэффициента по напряжению для образца пермендюр-Ni-ЦТС на 10 % выше, чем в двухслойной структуре Ni-ЦТС.

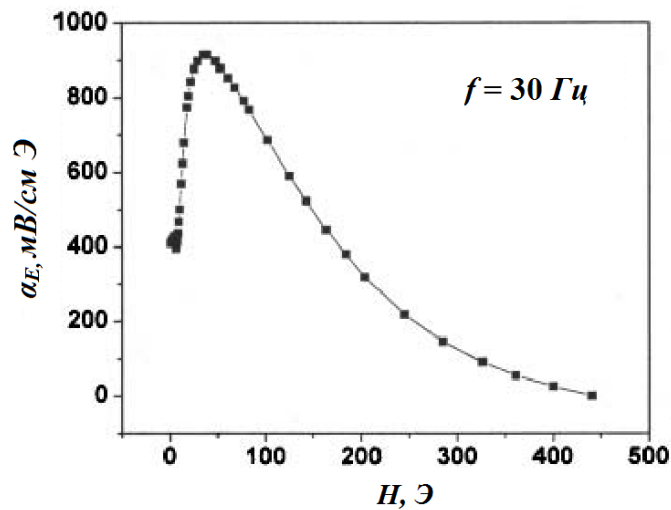


Рисунок 1.17 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от подмагничивающего поля для структуры ЦТС-Ni-пермендюр при нулевом подмагничивающем поле.

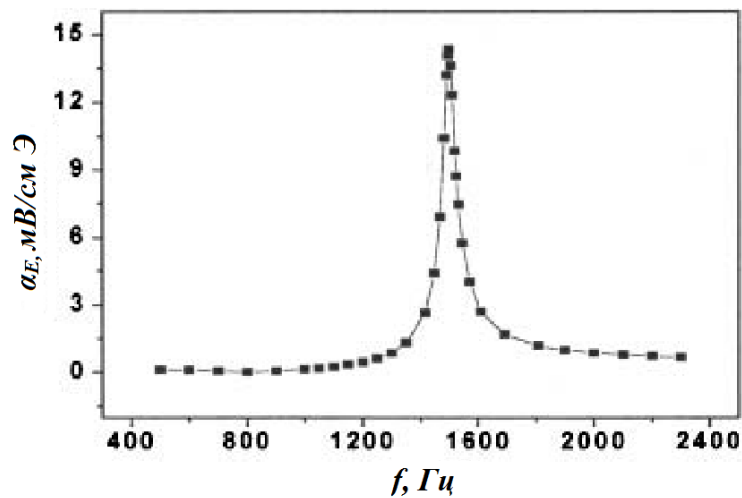


Рисунок 1.18 – Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для образца пермендюр-Ni-ЦТС при нулевом подмагничивающем поле.

1.3 Гистерезис и МЭ эффект в структурах на основе градиентных компонентов в отсутствие подмагничивающего поля

В магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах с градиентным ферромагнетиком наблюдается гистерезисная зависимость МЭ коэффициента по напряжению от внешнего постоянного магнитного поля.

В композиционных материалах с градиентом намагниченности величина МЭ коэффициента по напряжению определяется пьезоэлектрическим и комбинацией пьезомагнитных коэффициентов с учетом внутреннего магнитного поля. Гистерезисная зависимость МЭ коэффициента по напряжению от внешнего постоянного магнитного поля H формируется в виду того, что градиент намагниченности индуцирует внутреннее магнитное поле, которое приводит к отличному от нуля пьезомагнитному коэффициенту ферромагнитной фазы в отсутствии поля смещения и, следовательно, отличному от нуля α_E .

В работе [37] были проведены измерения МЭ коэффициента по напряжению в зависимости от внешнего магнитного поля H в образце, подвергнутому поперечному полю смещения и продольной составляющей переменного магнитного поля. Представленные результаты показаны на рис. 1.19 для образца ЦТС-метглас-Ni. При $|H| > 0$, МЭ связь обусловлена изгибом образца под действием поперечного поля смещения, с увеличением поля МЭ коэффициент по напряжению возрастает до определенного максимума, за которым следует его дальнейшее снижение. При смене направления поля смещения, МЭ коэффициент начинает уменьшаться, и становится равным нулю при $H \approx \pm 60$ Э. При нулевом МЭ коэффициенте средняя намагниченность обращается в нуль.

Приложение постоянного магнитного поля в вертикальном направлении, противоположном направлению внутренней намагниченности, приводит к уменьшению внутреннего магнитного поля в слое Ni и увеличению размагничивающего поля в слое метгласа. Как следствие,

средняя намагниченность стремится к нулю в результате того, что существенная часть доменов ориентируется в противоположных направлениях. Затем слои постепенно намагничиваются, что приводит к росту средней намагниченности. Таким образом, возникает петля гистерезиса с остаточной намагниченностью, равной внутренней намагниченности образца. Как следствие, становится возможным наблюдение МЭ эффекта в отсутствие внешнего подмагничивающего поля. Знак внутреннего поля смещения определяется предшествующим приложению переменного магнитного поля состоянием.

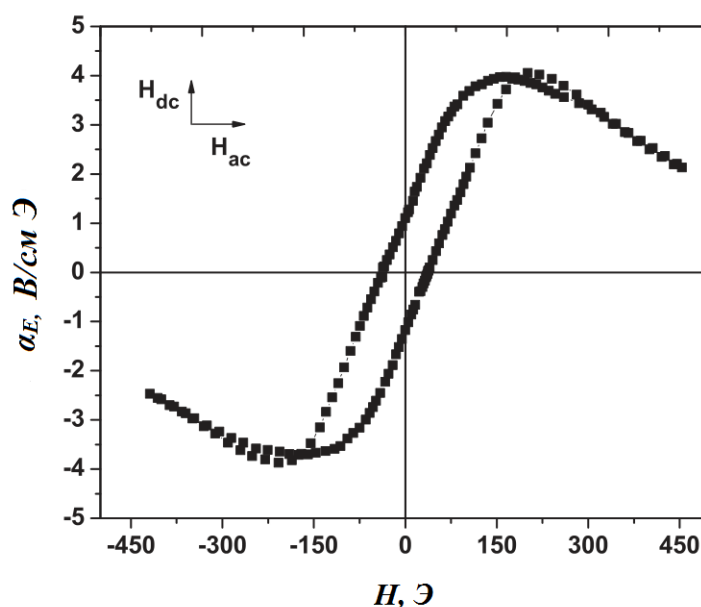


Рисунок 1.19 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от поля смещения для структуры Ni-метглас-ЦТС. Толщина метгласа равна 75 мкм. Подмагничивающее поле приложено перпендикулярно плоскости образца, переменное магнитное поле – параллельно.

Подробнее гистерезис и остаточный МЭ эффект в структурах на основе градиентных компонентов были рассмотрены в работе [39].

В образцах ЦТС-Ni-NZFO, при приложении внешнего постоянного поля H имеет место положительный МЭ коэффициент по напряжению α_E , величина которого увеличивается с ростом соотношения толщин феррита и никеля R до определенного максимума, имеющего место при $R = 1$, а затем уменьшается с увеличением R . Коэрцитивное поле H_c , соответствующее нулевому МЭ коэффициенту, является отрицательным и также увеличивается с ростом R . При обратном градиенте, то есть в образцах ЦТС-NZFO-Ni, и α_E и H_c меняют знак на противоположный: остаточный α_E становится отрицательным, а величина H_c – положительной.

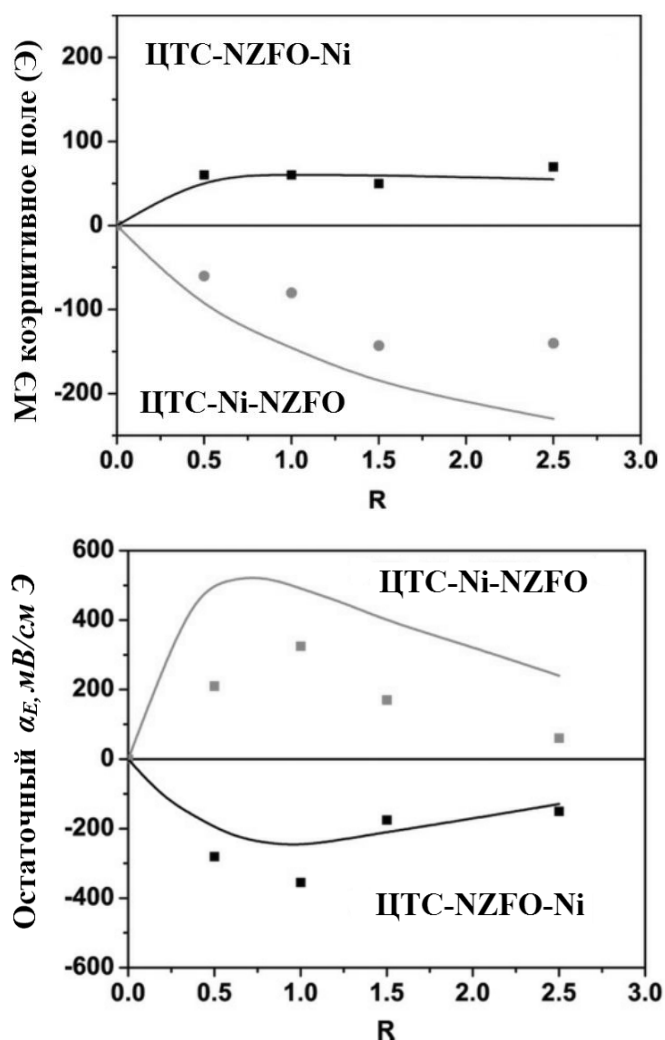


Рисунок 1.20 – Зависимость коэрцитивного поля и остаточного МЭ коэффициента по напряжению от соотношения толщин Ni и NZFO. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошной линией – теоретические.

Таким образом, наиболее сильный гистерезисный эффект и максимальный МЭ эффект в отсутствие подмагничивающего поля наблюдается в структуре с одинаковыми толщинами магнитных слоев, т. к. в данном случае величина индуцируемого внутреннего магнитного поля на границе раздела максимальна.

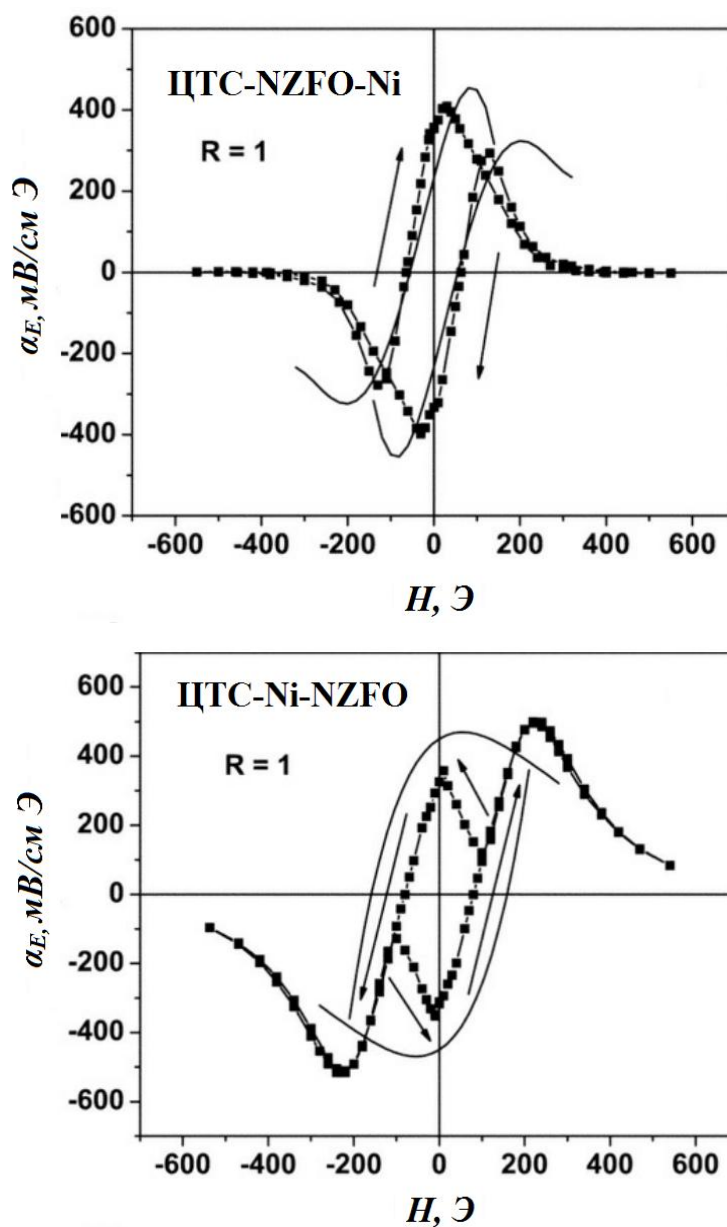


Рисунок 1.21 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от внешнего магнитного поля в структурах ЦТС-NZFO-Ni и ЦТС-Ni-NZFO при $R=1$. Сплошной линией обозначены теоретические данные, пунктирной – экспериментальные.

1.4 Структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя

Значительное внимание в данной работе уделяется исследованию структур на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя. В устройствах, работающих на основе прямого МЭ эффекта, такая конструкция позволит увеличить индуцируемое напряжение и повысить устойчивость к механическим вибрациям (например, в датчиках магнитного поля). В устройствах на основе обратного МЭ эффекта применение пьезоэлектрического биморфного преобразователя позволит увеличить величину развиваемых усилий при неизменной величине управляющего электрического поля.

Биморфный элемент состоит из двух механически связанных пьезоэлектрических пластин. Традиционно эти преобразователи изготавливаются из пластин одинаковых размеров и, что очень важно, одинаковой толщины. Это обеспечивает максимальную чувствительность. На рис. 1.22 показаны разновидности биморфных структур. Биморфный преобразователь, в котором поляризация пластин имеет противоположное направление, называют последовательным преобразователем. Биморфный преобразователь, собранный из двух пластин, направление поляризации которых одинаково, обозначают как параллельный преобразователь [25].

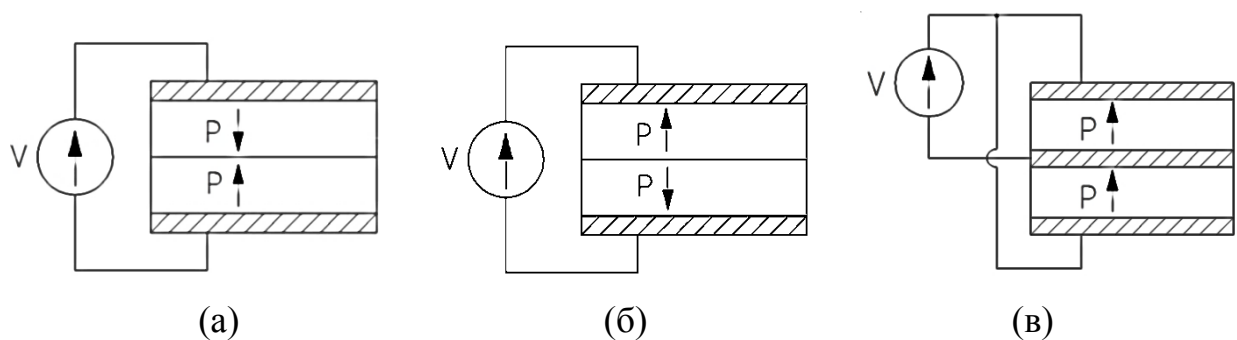


Рисунок 1.22 – разновидности биморфных структур: (а), (б) – последовательный преобразователь, (в) – параллельный преобразователь.

В последовательном биморфном преобразователе пластины соединены по отношению к источнику питания последовательно (рис. 1.22 а, б), а электрическое поле прикладывается ко всему образцу в целом, ввиду отсутствия электрода между верхним и нижним элементами. В этом случае величина управляющего электрического поля равна напряжению источника U , деленного на общее расстояние $2 \cdot P \cdot t$ между внешними электродами. Пластина с положительной полярностью находится под воздействием положительного напряжения и благодаря обратному пьезоэлектрическому эффекту удлиняется, тогда как пластина отрицательной полярности не работает и препятствует этому изменению длины, что приводит к изгибу в преобразователе. Биморфный элемент со встречной поляризацией выгодней использовать для генерации напряжения. При этом электроды пластин соединяются последовательно, а генерируемый сигнал снимается с внешних электродов. По сравнению с одной пластиной электрическая ёмкость такого биморфного преобразователя в два раза уменьшается, электрический заряд остаётся без изменения, а разность потенциалов на внешних электродах в два раза увеличивается. Чувствительность биморфного преобразователя по последовательной схеме и его собственное сопротивление будут в четыре раза выше, чем при параллельном.

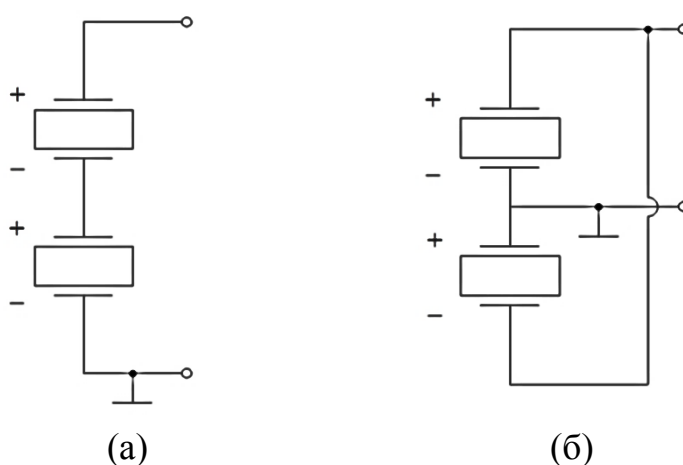


Рисунок 1.23 – Схемы соединения элементов в пьезоэлектрическом биморфном преобразователе – последовательное (а) и параллельное (б).

Способ включения параллельного преобразователя (рис 1.23, б) состоит в подключении двух внешних электродов к одному выводу, другим выводом служит центральный электрод. В этом случае каждый элемент подвергается действию со стороны своего собственного электрического поля, величина которого равна напряжению U , деленному на расстояние между электродами P_t . Таким образом, при параллельном соединении развиваемые усилия, а также результирующий изгибной момент будут в два раза выше, чем при последовательном соединении.

Также важно отметить, что в последовательном биморфном преобразователе одна из пластин всегда будет находиться под напряжением, противоположном напряжению поляризации, что создает опасность деполяризации. Это также справедливо для параллельного биморфного преобразователя, подобного тому, что изображен на рис. 1.22, в., только с векторами поляризации, направленными вниз. Для устранения возможного дефекта деполяризации пластин лучше включать биморфный преобразователь в соответствии со схемой (рис. 1.22, в), где обе пластины возбуждаются в направлении поляризации, а подача напряжения смещения позволяет избежать дрейфа характеристик, вызываемого деполяризацией, повышает чувствительность по входу и увеличивает срок службы.

Различие математического описания между типами (а) и (б) последовательного биморфного преобразователя в знаке пьезоэлектрического коэффициента, в то время как все остальные параметры остаются неизменными. Различие между последовательным и параллельным соединениями в том, что пьезоэлектрические коэффициенты при описании параллельного соединения в два раза выше, а диэлектрическая проницаемость в четыре, по сравнению с последовательным включением.

Приложение электрического поля поперечно пьезоэлектрическому образцу приводит к его деформации. Характер деформации зависит от конкретного материала, но в случае биморфного преобразователя на основе керамики ЦТС деформация такова, что если электрическое поле

прикладывается параллельно поляризации элемента, в соответствии с осью z , элемент, как правило, сжимается в плоскости, перпендикулярной приложенному полю, то есть в xy плоскости, а также растягивается вдоль оси поля, z . И наоборот, если электрическое поле прикладывается антипараллельно поляризации элемента, он будет, растягиваться вдоль плоскости, перпендикулярной приложенному полю, и сжиматься вдоль направления поля.

В случае одного свободного пьезоэлектрического элемента, деформации растяжения – сжатия не ограничены в любом направлении. Тем не менее, если два элемента соединены вдоль одной поверхности, когда один слой при приложении внешнего электрического поля растягивается, а другой сжимается, продольные перемещения вдоль этой поверхности будут ограничены. Вследствие этого возникнут осевые силы и моменты на поверхности раздела, которые приведут к изгибу биморфной структуры [26].

Исследованию МЭ эффекта в структурах на основе градиентных пьезоэлектриков посвящены работы [36, 41-44]. В [42] рассмотрено МЭ взаимодействие в области ферромагнитного резонанса в двухслойных образцах на основе градиентного слоя PMN-PT. В качестве ферритовой фазы используются иттриевый гранат и феррит никеля. В [36] исследован МЭ эффект в структуре в форме диска на основе градиентного ферромагнетика, состоящего из слоя NZFO, а также двух слоев ЦТС. На рис. 1.24 представлена зависимость МЭ коэффициента по напряжению для трехслойной структуры в форме диска состава ЦТС-NZFO-ЦТС от внешнего постоянного магнитного поля. Индуцированный градиентом поляризации изгибной момент в такой структуре приводит к перераспределению механических напряжений и повышает эффективность МЭ взаимодействия. Применение градиентных компонентов в составе структуры NZFO- ЦТС также приводит к ненулевому значению МЭ коэффициента по напряжению в отсутствии подмагничивающего поля.

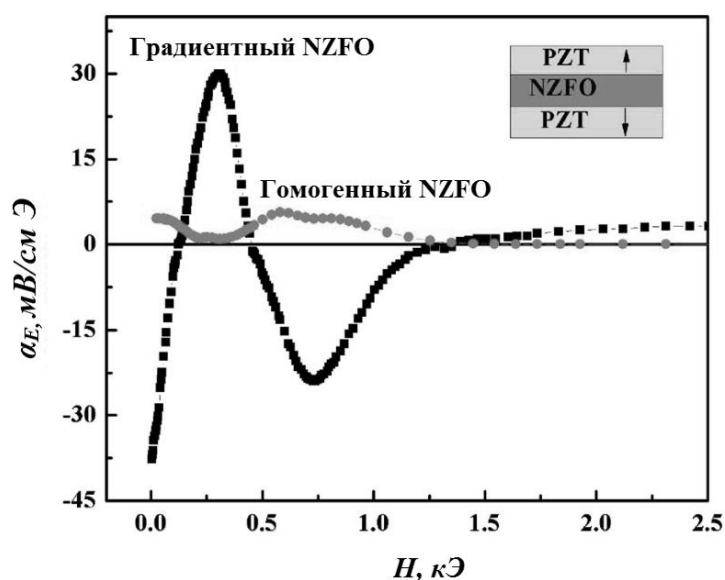


Рисунок 1.24 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от внешнего магнитного поля в структуре ЦТС-NZFO-ЦТС для гомогенного и градиентного слоя NZFO. Последний представляет собой композицию из слоев NZFO с возрастающей концентрацией цинка $x = 0; 0,1; 0,2$ и $0,3$.

В работах [43, 44] исследована биморфная несимметричная структура в условиях резонанса изгибных колебаний. Предложена структура, содержащая два встречно поляризованных слоя ЦТС, расположенных между двумя магнитными слоями из никеля Ni с $\lambda > 0$ и аморфного магнитного сплава с $\lambda < 0$.

1.5 Выводы

В последние годы бурное развитие научных исследований, касающихся МЭ эффекта, потребовало поиска новых решений в вопросе совершенствования структур композиционных магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов. Необходимость создания искусственных магнитоэлектриков возникла в связи с тем, что в монокристаллических материалах МЭ взаимодействие очень слабое и проявляется при температурах значительно ниже комнатной. С применением

композиционных материалов появилась возможность комбинировать состав и соотношение компонентов и таким образом получать материалы с требуемыми свойствами, что существенно расширило возможности их практического использования.

Настоящая работа посвящена исследованию МЭ эффекта в слоистых композитах с неоднородными компонентами. Применение данных материалов в устройствах на основе МЭ эффекта дает следующие преимущества: устраняет необходимость использования дополнительной операции поляризации образца; исключает введение в конструкцию устройств дополнительных элементов, обеспечивающих подмагничивание материала; повышает устойчивость устройств к механическим воздействиям, увеличивает индуцируемое выходное напряжение в устройствах на основе прямого МЭ эффекта; позволяет снизить управляемое напряжение в устройствах на основе обратного МЭ эффекта.

Данная глава направлена на изучение МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрических материалах на основе неоднородных компонентов. Подробно описан механизм и условия возникновения МЭ взаимодействия в данных структурах, а также рассмотрен гистерезис и МЭ эффект в отсутствие подмагничивающего поля. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований МЭ эффекта в структурах, состоящих из сегнетоэлектрика с меняющимся по толщине пьезоэлектрическим коэффициентом и диэлектрической проницаемостью, и ферромагнетика с меняющимся по толщине пьезомагнитным коэффициентом. Рассмотрен как низкочастотный МЭ эффект, так и МЭ эффект в области ЭМР в свободных и зажатых образцах.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В данной главе построена теоретическая модель низкочастотного МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных компонентов со ступенчатым изменением пьезомагнитных (сегнетоэлектрических) свойств по толщине. Предложены и исследованы слоистые структуры на основе пьезоэлектрика и двухслойного ферромагнетика с разными знаками магнитострикции, а также магнитострикционного материала и пьезоэлектрического биморфного преобразователя.

В качестве магнитной компоненты рассматривается структура, состоящая из комбинации слоев пермендюра и никеля. Скачкообразное изменение пьезомагнитного коэффициента по толщине приводит к возникновению градиента намагниченности. Сегнетоэлектрическая компонента рассматривается на примере структуры, состоящей из двух одинаковых слоев пьезокерамического материала (ПКМ) с противоположными направлениями поляризации. В данном случае имеет место пьезоэлектрическая структура с градиентом поляризации.

2.1 Теоретическое моделирование МЭ эффекта в слоистых структурах с неоднородным ферромагнетиком

Рассмотрим МЭ эффект в слоистой магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре с неоднородным по составу ферромагнетиком. По сравнению с двухслойными образцами на основе однородных компонентов, такие структуры позволяют увеличивать индуцируемое напряжение.

Ниже рассмотрена теория низкочастотного МЭ эффекта при возникновении изгиба и ее применение к структурам следующего состава (рис. 2.1): а) никель-ПКМ; б) пермендюр-ПКМ; в) никель-пермендюр-ПКМ; г) пермендюр-никель-ПКМ. В качестве ПКМ используются керамика ЦТС.

МЭ коэффициент по напряжению α_E оценен для ориентации поля, соответствующей минимальному влиянию размагничивающего поля и максимальному значению МЭ коэффициента.

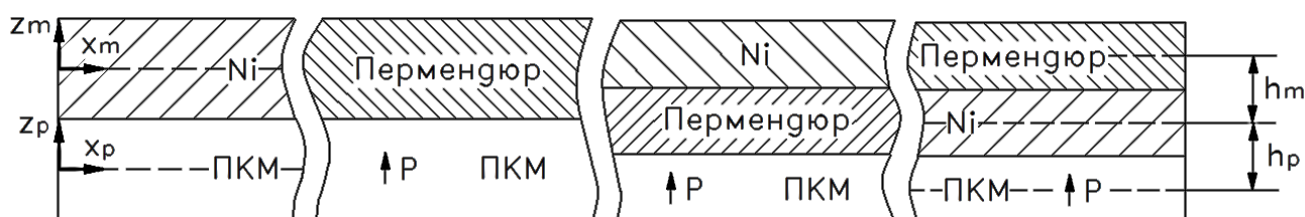


Рисунок 2.1 – Магнитоэлектрическая структура с градиентом намагниченности.

Для достижения пьезомагнитного эффекта и линеаризации МЭ свойств слоистой структуры, к материалу прикладывается подмагничивающее поле H_0 . В этом случае в интервале магнитных полей, малых по сравнению с подмагничивающим полем, магнитоэлектрический эффект проявляется в виде пьезомагнитного эффекта, а МЭ эффект будет близок к линейному.

Магнитное поле смещения H_0 и переменное магнитное поле H_1 параллельны оси x . Пьезоэлектрический слой поляризован вдоль оси z и постоянное электрическое поле E_z направлено перпендикулярно образцу.

Для построения теоретической модели МЭ эффекта используются уравнения упругости и материальные уравнения для пьезоэлектрического и магнитоэлектрического слоев:

$$^pS_i = ^pS_{ij} ^pT_j + ^pd_{ki} ^pE_k;$$

$$^pD_k = ^pd_{ki} ^pT_i + ^p\epsilon_{kn} ^pE_n;$$

$${}^{m1}S_i = {}^{m1}s_{ij} {}^{m1}T_j + {}^{m1}q_{ki} {}^mH_k; \quad (2.1)$$

$${}^{m1}B_k = {}^{m1}q_{ki} {}^{m1}T_i + {}^{m1}\mu_{kn} {}^mH_n;$$

$${}^{m2}S_i = {}^{m2}s_{ij} {}^{m2}T_j + {}^{m2}q_{ki} {}^mH_k;$$

$${}^{m2}B_k = {}^{m2}q_{ki} {}^{m2}T_i + {}^{m2}\mu_{kn} {}^mH_n;$$

где S_i и T_j компоненты тензоров деформации и механического напряжения, E_k и D_k - компоненты векторов электрического поля и электрического смещения, H_k и B_k - компоненты векторов магнитного поля и магнитной индукции, s_{ij} , - податливость; q_{ki} и d_{ki} - пьезомагнитный и пьезоэлектрический коэффициенты, ε_{kn} - диэлектрическая проницаемость и μ_{kn} - магнитная проницаемость. Верхние индексы p , m соответствуют пьезоэлектрической и пьезомагнитной фазам, соответственно, индекс $m1$ относится к верхнему слою магнитной фазы, $m2$ - к нижнему (граничащему с пьезоэлектриком) слою. Предполагается, что симметрия пьезоэлектрической фазы есть ∞m , а пьезомагнитная фаза обладает кубической симметрией.

Структуру, состоящую из n -слоев можно приближенно рассматривать как балку. Однако, особенность состоит в различии геометрических размеров каждого слоя (в данном случае толщин) и их материальных параметров, что как правило приводит к смещению центра тяжести относительно срединной поверхности. Конфигурационная асимметрия слоистой МЭ структуры с переменным составом подразумевает изгиб образца, что теоретически предполагает усиление МЭ эффекта на низких частотах, обусловленное возникновением в поперечных сечениях структуры изгибающих моментов. Поэтому при построении модели МЭ эффекта в структурах на основе градиентных компонентов используются также фундаментальные положения теоретической механики и сопромата.

Согласно гипотезе плоских сечений Бернулли, поперечные сечения, плоские и перпендикулярные к оси балки до деформации, остаются

плоскими и перпендикулярными к изогнутой оси после ее деформации. Таким образом, в момент изгиба плоские сечения только поворачиваются относительно некоторой линии, которая называется нейтральной осью сечения балки или основной осью инерции. Нейтральная ось проходит через центры тяжести поперечных сечений. В момент изгиба волокна балки, лежащие с одной стороны от нейтральной оси, будут растягиваться, а с другой – сжиматься; волокна, лежащие на нейтральной оси, своей длины не изменяют [27, 28].

Также в рамках данной модели полагается, что напряжения, действующие на одинаковом расстоянии от нейтральной оси, постоянны по ширине образца; продольные волокна балки при ее изгибе не надавливают друг на друга и деформация сдвига слоев относительно друг друга не учитывается; единственным напряжением, рассматриваемым в этой теории, является продольное напряжение; и размеры сечения образца предполагаются малыми по сравнению с радиусом кривизны оси балки. [27, 28]

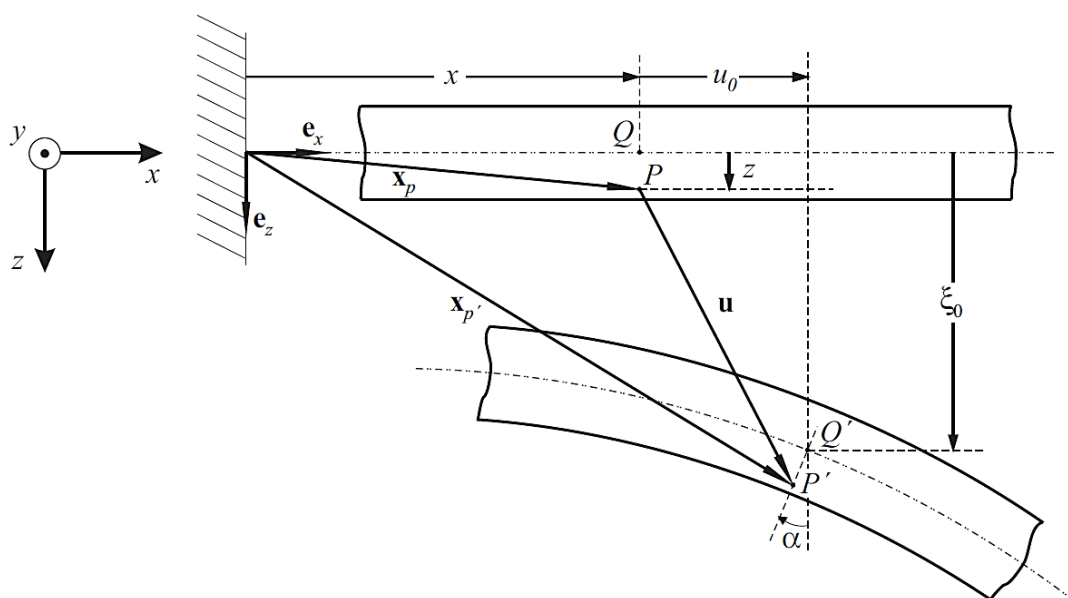


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение перемещений в момент изгиба

На рис. 2.2 изображено перемещение точки P из начального недеформируемого состояния балки в точку P' , принадлежащую балке в момент изгиба. Координатная система выбрана таким образом, что единичный вектор $\mathbf{e}_x$ совпадает с основной осью инерции. u_0 и ξ – это смещения в x и z -направлении, соответственно. $\mathbf{x}_P$ и $\mathbf{x}_{P'}$ – радиусы-векторы точек P и P' .

Полное перемещение $\mathbf{u}$ точки P в точку P' можно представить как разность векторов

$$\mathbf{u} = \mathbf{x}_{P'} - \mathbf{x}_P, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{x}_P = x\mathbf{e}_x + z\mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{x}_{P'} = (x + u_0 - z \sin \alpha) \mathbf{e}_x + (\xi_0 + z \cos \alpha) \mathbf{e}_z \quad (2.3)$$

Для малых значений угла α , с помощью теоремы Тейлора могут быть сделаны следующие упрощения:

$$\sin \alpha \approx \alpha \text{ и } \cos \alpha \approx 1 \quad (2.4)$$

Таким образом, совместно с уравнениями 2.3, 2.4, перемещение $\mathbf{u}$ в выражении (2.2) приводится к следующему виду:

$$\mathbf{u} = (u_0 - z\alpha) \mathbf{e}_x + \xi \mathbf{e}_z \quad (2.5)$$

Компоненты вектора перемещений x - z плоскости (рис. 2.2) и перемещение w в z -направлении берутся прямо из выражения (2.5):

$$u = u_0 - z\alpha \quad (2.6)$$

$$v = 0 \quad (2.7)$$

$$w = \xi \quad (2.8)$$

Запишем компоненты вектора деформации в x - z плоскости в соответствии с выражениями (2.6) - (2.8):

$$S_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (2.9)$$

$$S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

$$2S_{xz} = \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \xi}{\partial x} - \alpha \quad (2.11)$$

Тем не менее, в рамках классической теории изгиба балок Бернулли поперечные деформации в материале балки не рассматриваются. Таким образом, $S_{xz} = 0$, тогда из уравнения (2.11) следует, что

$$\alpha = \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (2.12)$$

После подстановки уравнения 2.12 в 2.9 выражение для деформации S_{xx} плоской балки примет следующий вид

$$S_{xx}(x, z) = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

В соответствии с вышеизложенным, аксиальные деформации каждого слоя структуры можно рассматривать как сумму продольной деформаций и деформации, связанной с изгибом [30]

$$S_I(x, z) = du_0/dx - z \cdot d^2w/dx^2, \quad (2.13)$$

где u_0 – смещение вдоль оси x , w – прогиб структуры (смещение вдоль оси z).

Рассмотрим деформацию образца в процессе изгиба (рис. 2.3). Выделим элемент структуры длиной dx . В результате изгиба поперечные сечения балки повернутся, образовав угол $d\theta$. Верхние слои испытывают сжатие, а нижние – растяжение. Поверхность, разделяющая сжатую зону от растянутой есть нейтральный слой. Линия OO_1 , принадлежащая этому слою, сохранит свое первоначальную длину dx . Радиус кривизны нейтрального слоя обозначим через R .

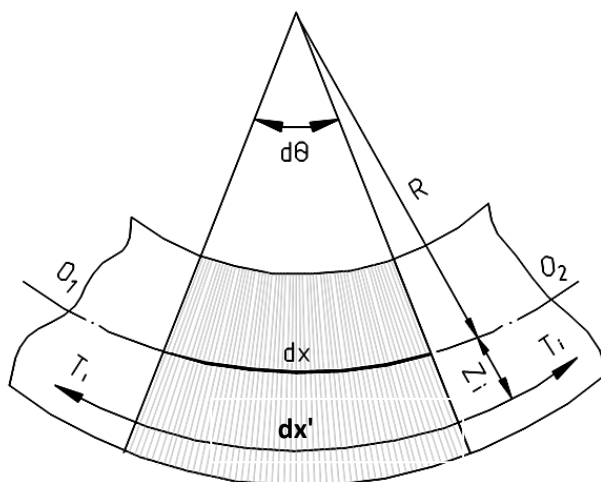


Рисунок 2.3 – Деформация структуры при возникновении изгиба

Рассмотрим деформации слоя, отстоящего на расстоянии z_i от нейтрального слоя и растянутого напряжениями T_j (рис. 2.3). Первоначальная длина этого волокна равна $dx = R d\theta$. После деформации его длина по дуге dx стала $(R+z) d\theta$. Абсолютное удлинение рассматриваемого волокна $\Delta L = (R+z)d\theta - R d\theta = z d\theta$. Относительное удлинение по оси x (или деформация нейтральной оси) запишется следующим образом

$$u_{bend}(x, z) = z d\theta / R d\theta = z_i / R,$$

таким образом, удлинения волокон пропорциональны их расстояниям до нейтрального слоя.

Деформацию, возникающую за счет изгиба, можно представить как линейную функцию от вертикальной координаты z_i , а продольные деформации представить как относительное удлинение нейтральных осей вдоль оси x и y :

$$\begin{aligned}
 {}^mS_1 &= {}^mS_{10} + {}^1z_m/R_1; \\
 {}^mS_2 &= {}^mS_{10} + {}^2z_m/R_1; \\
 {}^pS_1 &= {}^pS_{10} + z_p/R_1; \\
 {}^mS_2 &= {}^mS_{20} + {}^1z_m/R_2; \\
 {}^mS_2 &= {}^mS_{20} + {}^2z_m/R_2; \\
 {}^pS_2 &= {}^pS_{20} + z_p/R_2;
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

где ${}^mS_{10}$, ${}^pS_{10}$, ${}^mS_{20}$ и ${}^pS_{20}$ – деформации нейтральных осей вдоль оси x и оси y при $z_i = 0$, R_1 , R_2 – радиусы кривизны нейтральной оси структуры в x и y направлениях; z_i – расстояние от i -го слоя структуры до нейтрального слоя.

Запишем граничные условия для образца, в соответствии с которыми на границе раздела магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз наблюдается равенство компонент деформаций:

$${}^pS_1 = {}^mS_1, \tag{2.15}$$

$${}^pS_2 = {}^mS_2$$

Решая совместно систему уравнений (2.14) с учетом граничных условий (2.15) запишем следующее выражение для деформаций нейтральной оси:

$${}^{m1}S_{10} - {}^{m2}S_{10} = h_m/R_1, \quad (2.16)$$

$${}^{m2}S_{10} - {}^pS_{10} = h_p/R_1,$$

$${}^{m1}S_{20} - {}^{m2}S_{20} = h_m/R_2,$$

$${}^{m1}S_{20} - {}^pS_{20} = h_p/R_2,$$

где $h_m = (t_p + t_m)/2$ – средняя толщина слоев магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз.

Данная модель ограничивается ориентацией полей (рис.2.1), когда подмагничивающее поле H_0 и переменное магнитное поле H_1 параллельны друг другу и плоскости образца. ЦТС поляризована вдоль оси z и переменное электрическое поле приложено перпендикулярно плоскости образца. Предполагается, что при такой ориентации полей, МЭ коэффициент имеет максимальную величину и влияние размагничивающего поля минимально. В этом случае уравнение (2.14) можно переписать, используя формулы (2.16) и (2.1) следующим образом

$$\begin{aligned} {}^{m1}S_{10} + {}^1z_m/R_1 &= {}^{m1}S_{11} {}^{m1}T_1 + {}^{m1}S_{12} {}^{m1}T_2 + {}^{m1}q_{11} {}^mH_1; \\ {}^{m1}S_{10} + ({}^2z_m - h_m)/R_1 &= {}^{m2}S_{11} {}^{m2}T_1 + {}^{m2}S_{12} {}^{m2}T_2 + {}^{m2}q_{11} {}^mH_1; \\ {}^{m1}S_{10} + ({}^2z_m - h_m - h_p)/R_1 &= {}^pS_{11} {}^pT_1 + {}^pS_{12} {}^pT_2 + {}^pd_{31} {}^pE_3; \\ {}^{m1}S_{20} + {}^1z_m/R_2 &= {}^{m1}S_{12} {}^{m1}T_1 + {}^{m1}S_{11} {}^{m1}T_2 + {}^{m1}q_{11} {}^mH_1; \\ {}^{m1}S_{20} + ({}^2z_m - h_m)/R_2 &= {}^{m2}S_{12} {}^{m2}T_1 + {}^{m2}S_{11} {}^{m2}T_2 + {}^{m2}q_{12} {}^mH_1; \\ {}^{m1}S_{20} + ({}^2z_m - h_m - h_p)/R_2 &= {}^pS_{12} {}^pT_1 + {}^pS_{11} {}^pT_2 + {}^pd_{31} {}^pE_3; \end{aligned} \quad (2.17)$$

Далее из уравнения (2.17) для каждого слоя определяются механические напряжения.

Для выполнения условия равновесия сумма осевых сил в слоях структуры должна в сумме равняться нулю,

$${}^{m1}F_1 + {}^{m2}F_1 + {}^pF_1 = 0, \quad (2.18)$$

$${}^{m1}F_2 + {}^{m2}F_2 + {}^pF_2 = 0,$$

$$\text{где } {}^{m1}F_1 = \int_{-{}^{m1}t/2}^{{}^{m1}t/2} {}^{m1}T_1 dz, \quad {}^{m2}F_1 = \int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} {}^{m2}T_1 dz, \quad {}^pF_1 = \int_{-{}^pt/2}^0 {}^pT_1 dz,$$

$${}^{m2}F_2 = \int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} {}^{m2}T_2 dz, \quad {}^{m2}F_2 = \int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} {}^{m2}T_2 dz, \quad {}^pF_2 = \int_{-{}^pt/2}^{{}^pt/2} {}^pT_2 dz,$$

Решение уравнения (2.18) после подстановки iT_j , выраженного из (2.17) позволяет найти продольные деформации нейтральной оси ${}^mS_{10}$ и ${}^mS_{20}$:

$${}^mS_{10} = \frac{s_1}{t} \left[{}^{m1}Y \int_{-{}^{m1}t/2}^{{}^{m1}t/2} {}^{m1}q_{11} {}^mH_1 dz + {}^{m2}Y \left(\int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} {}^{m2}q_{11} {}^mH_1 dz + \frac{{}^{m2}th_m}{R_1} \right) + \right. \\ \left. + {}^pY \left(\int_{-{}^pt/2}^{{}^pt/2} {}^pd_{31} {}^pE_3 dz + {}^pt \frac{h_m + h_p}{R_1} \right) \right], \quad (2.19)$$

$${}^mS_{20} = \frac{s_1}{t} \left[{}^{m1}Y \int_{-{}^{m1}t/2}^{{}^{m1}t/2} {}^{m1}q_{12} {}^mH_1 dz + {}^{m2}Y \left(\int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} {}^{m2}q_{12} {}^mH_1 dz + \frac{{}^{m2}th_m}{R_2} \right) + \right. \\ \left. + {}^pY \left(\int_{-{}^pt/2}^{{}^pt/2} {}^pd_{31} {}^pE_3 dz + {}^pt \frac{h_m + h_p}{R_2} \right) \right].$$

где $s_1 = t({}^{m1}t {}^{m1}Y + {}^{m2}t {}^{m2}Y + {}^pt {}^pY)^{-1}$, $t = {}^{m1}t + {}^{m1}t + {}^pt$, ${}^{m1}Y$, ${}^{m2}Y$, pY – модули упругости пьезомагнитной и пьезоэлектрической компонент, соответственно.

Также в условиях равновесия сумма моментов осевых сил каждого слоя должна уравниваться результирующим изгибным моментом M_{mj} , M_{pj} , возникающим в пьезоэлектрическом и магнитострикционном слоях в расчете на единицу ширины слоя. Таким образом,

$${}^{m1}F_1 h_m + {}^{m2}F_1 (h_p + h_m) = {}^{m1}M_1 + {}^{m2}M_1 + {}^pM_1, \quad (2.20)$$

$${}^{m1}F_2 h_m + {}^{m2}F_2 (h_p + h_m) = {}^{m1}M_2 + {}^{m2}M_2 + {}^pM_2,$$

$$\text{где } {}^{m1}M_1 = \int_{-{}^{m1}t/2}^{{}^{m1}t/2} {}^1z_m {}^{m1}T_1 dz, \quad {}^{m2}M_1 = \int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} z_m {}^{m2}T_1 dz, \quad {}^pM_1 = \int_{-{}^pt/2}^0 z_p {}^pT_1 dz_p,$$

$${}^{m1}M_2 = \int_{-{}^{m1}t/2}^{{}^{m1}t/2} {}^1z_m {}^{m1}T_2 dz, \quad {}^{m2}M_2 = \int_{-{}^{m2}t/2}^{{}^{m2}t/2} z_m {}^{m2}T_2 dz, \quad {}^pM_2 = \int_{-{}^pt/2}^0 z_p {}^pT_2 dz_p.$$

Из условия равновесия (2.20) после подстановки выражения для механических напряжений из уравнения (2.17) и выражения для продольных деформаций (2.19) можно найти радиус изгиба R . Для вычисления деформаций нейтральной оси, значения радиуса кривизны нужно подставить в уравнение (2.19). После того, как деформации определены, из уравнения (2.17) можно найти осевое напряжение pT_1 для подстановки в конечную формулу.

Чтобы получить выражение для МЭ коэффициента по напряжению, воспользуемся условием разомкнутой цепи на границе раздела слоев:

$$D_3 = 0 \quad (2.21)$$

Поскольку электрическая индукция является бездивергентной и имеет только одну компоненту D_3 , очевидно, что D_3 равно нулю для любого z .

Таким образом, D_3 из уравнения (2.1) приравняется к нулю, после чего уравнение решается относительно E_3 . В итоге, выражение для МЭ коэффициента по напряжению имеет следующий вид

$$\alpha_{E31} = \frac{E_3}{H_1} = - \int_{-p_t/2}^{p_t/2} \frac{{}^p d_{31}({}^p T_1 + {}^p T_2)}{t H_1 {}^p \varepsilon_{33}} dz; \quad (2.22)$$

где E_3 и H_1 – среднее значение электрического поля, индуцируемого поперечно пьезоэлектрическому слою и приложенное переменное магнитное поле, соответственно. ${}^p T_1$ находится из уравнений (2.14) после подстановки в него продольных деформаций и радиуса изгиба.

Используемые материальные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Материальные параметры (коэффициент податливости s , пьезоэлектрический и пьезомагнитный модули d и q , диэлектрическая проницаемость ε) для ЦТС, PMN-РТ, никеля, пермендюра и метгласа

Материал	s_{11} , пм ² /Н	s_{12} , пм ² /Н	d_{31} , пм/В	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	q_{11} , пм/А	q_{12} , пм/А
PMN-РТ	23	-8,3	- 600	5500	–	–
ЦТС	15,3	-5	- 175	1750	–	–
Никель	4,9	-1,7	–	–	-4140	900
Пермендюр	7,8	-5,5			12000	-200
Метглас	10	–			11000	–

На рис. 2.4, 2.5 представлены численные оценки низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС V в двухслойных структурах без градиента (Ni-ЦТС и пермендюр-ЦТС), а также в трехслойных структурах на с градиентом намагниченности (Ni-пермендюр-ЦТС и пермендюр-Ni-ЦТС).

На рис. 2.6, 2.7 приведены зависимости низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли пьезоэлектрика V в двухслойных структурах Ni-PMN-PT, пермендюр-PMN-PT, а также в трехслойных структурах с градиентом намагниченности Ni-пермендюр-PMN-PT и пермендюр-Ni-PMN-PT.

Результаты зависимости МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика демонстрируют двойной максимум в случаях двухслойных структур, вследствие того, что механическое напряжение, индуцируемое в феррите, имеет две составляющие: продольную и изгибную. В отсутствие изгибной деформации, максимальный МЭ коэффициент имеет место при $V = 0,5$ в случае применения в качестве пьезоэлектрической фазы ЦТС и 0,45 в случае применения PMN-PT.

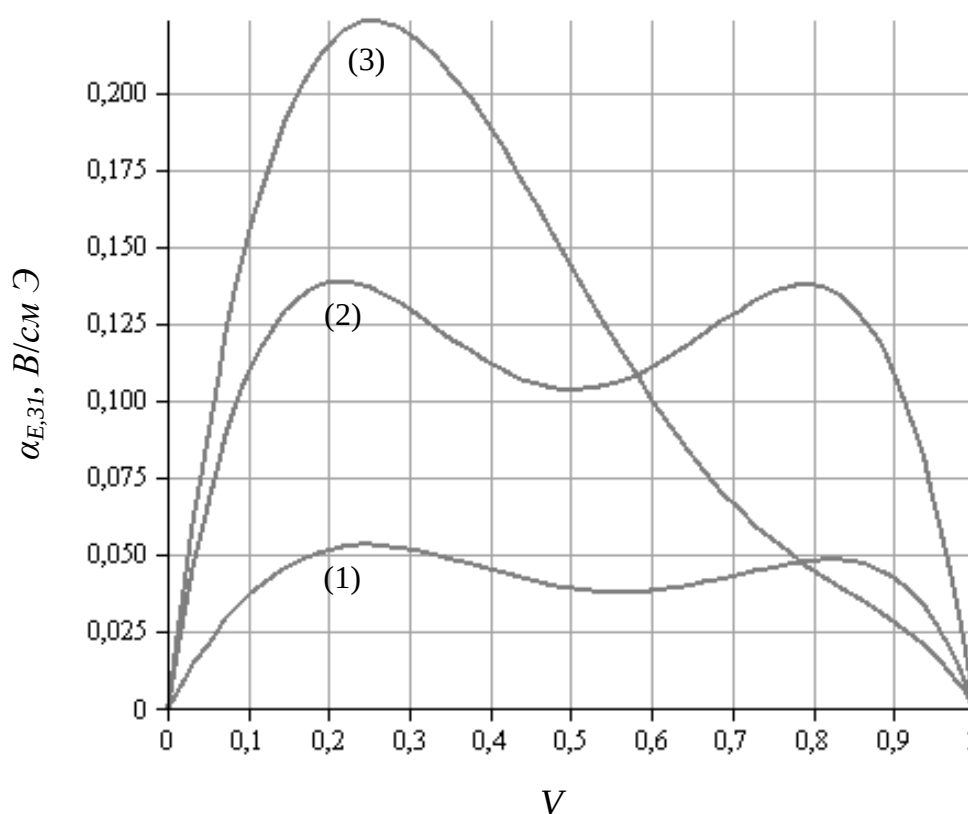


Рисунок 2.4 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V для двухслойных структур Ni-ЦТС (1) и пермендюр-ЦТС (2), а также для трехслойной структуры пермендюр-Ni-ЦТС (3).

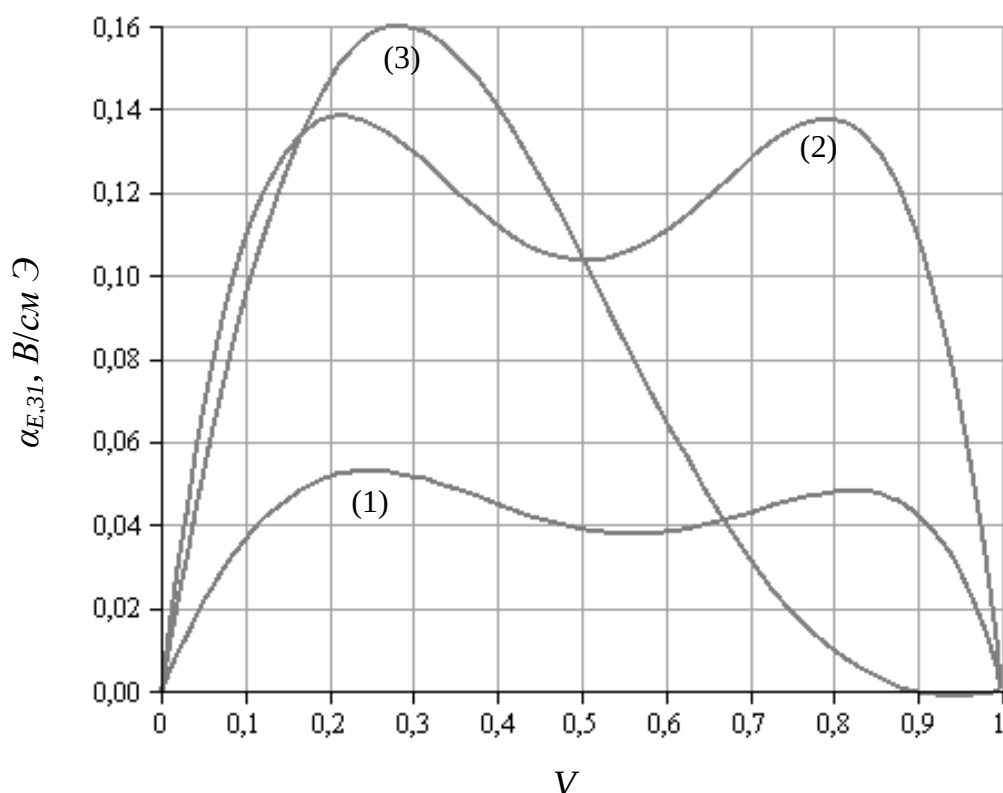


Рисунок. 2.5 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V для двухслойных структур Ni-ЦТС (1) и пермендюр-ЦТС (2), а также для трехслойной структуры с градиентом намагниченности Ni-пермендюр-ЦТС (3).

Поскольку компонента напряжения, обусловленная изгибом образца, противоположна по знаку компоненте напряжения, связанной с продольной деформацией, и достигает своего максимального значения в той же точке, две составляющие напряжений взаимно компенсируются, и таким образом концентрационная зависимость МЭ коэффициента обнаруживает два максимума. Для образцов с неоднородным ферромагнетиком зависимость МЭ коэффициента по напряжению имеет один максимум, вследствие появления дополнительной составляющей изгибного момента, компенсирующего поперечную составляющую деформации за счет асимметрии структуры. При этом наблюдается сдвиг этого максимума в

область более низких значений объемной доли пьезоэлектрика и увеличение величины МЭ взаимодействия.

Использование ферромагнетика с градиентом намагниченности в составе магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры приводит к усилению МЭ взаимодействия. Для достижения наибольшей эффективности МЭ взаимодействия в структуре с неоднородным ферромагнетиком следует располагать слои магнитной фазы таким образом, чтобы намагниченность насыщения внешнего магнитного слоя была выше, чем промежуточного, граничащего с пьезоэлектриком.

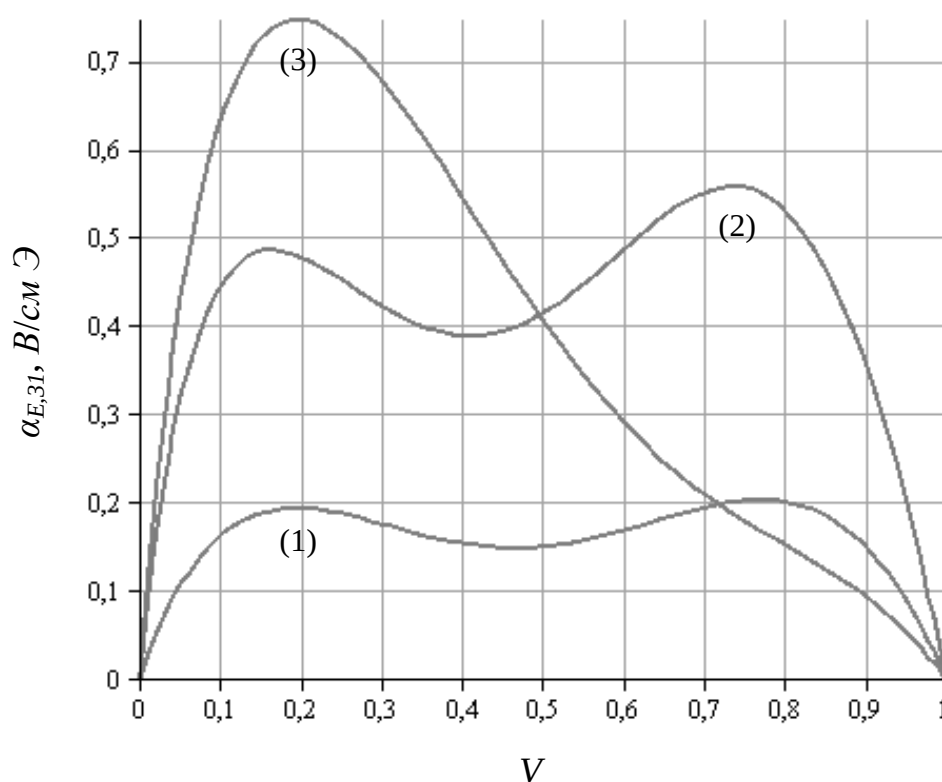


Рисунок. 2.7 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли PMN-РТ V для двухслойных структур Ni-PMN-РТ (1) и пермендюр-PMN-РТ (2), а также для трехслойной структуры с неоднородным ферромагнитным слоем пермендюр-Ni-PMN-РТ (3).

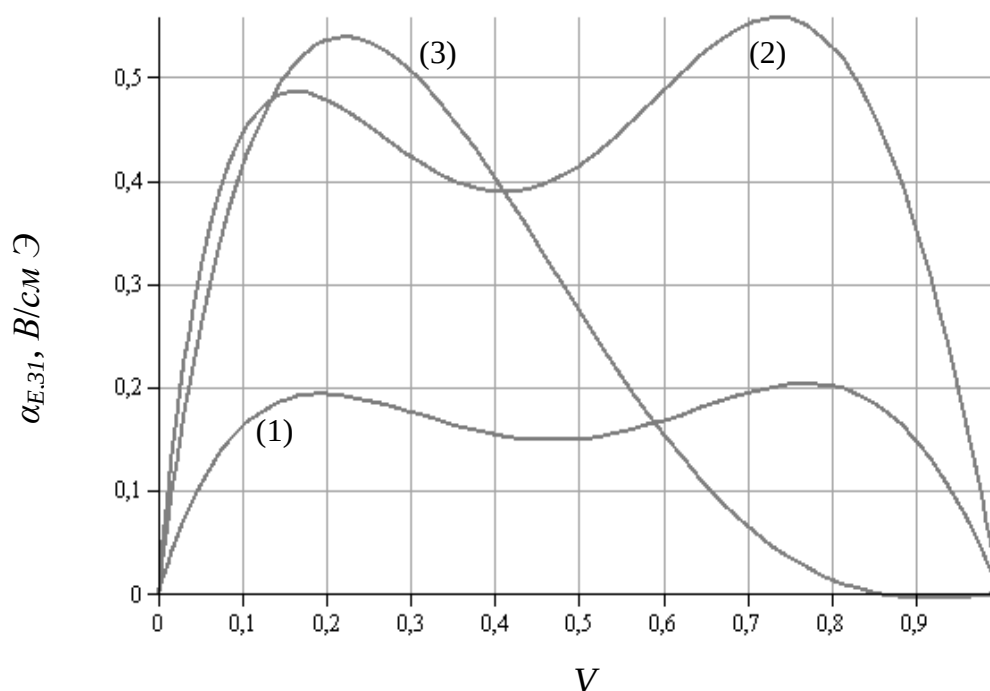


Рисунок. 2.6 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли PMN-PT V для двухслойных структур Ni-PMN-PT (1) и пермендюр-PMN-PT (2), а также для трехслойной структуры Ni-пермендюр- PMN-PT (3).

2.2 Теоретическое моделирование МЭ эффекта в слоистых структурах на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя

Далее рассмотрим МЭ взаимодействие в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя.

Для образцов с одним пьезоэлектрическим слоем индуцируемое напряжение не достигает своего максимально возможного значения в связи с изменением знака механических напряжений по толщине этого слоя - от сжимающих напряжений до растягивающих. Для увеличения индуцируемого напряжения в качестве пьезоэлектрика можно использовать асимметричную биморфную структуру, состоящую из двух одинаковых слоев пьезокерамики, поляризованных в противоположных направлениях.

Также известно, что МЭ датчики обладают повышенной чувствительностью к механическим вибрациям, поскольку МЭ эффект в композитах обусловлен взаимодействием магнитной и электрической подсистем через упругие деформации. Поэтому структура на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя может быть также использована для повышения устойчивости к механическим воздействиям.

На рис. 2.8 представлен образец, состоящий из ферромагнитного материала и двух слоев пьезоэлектрика с противоположными направлениями поляризации.

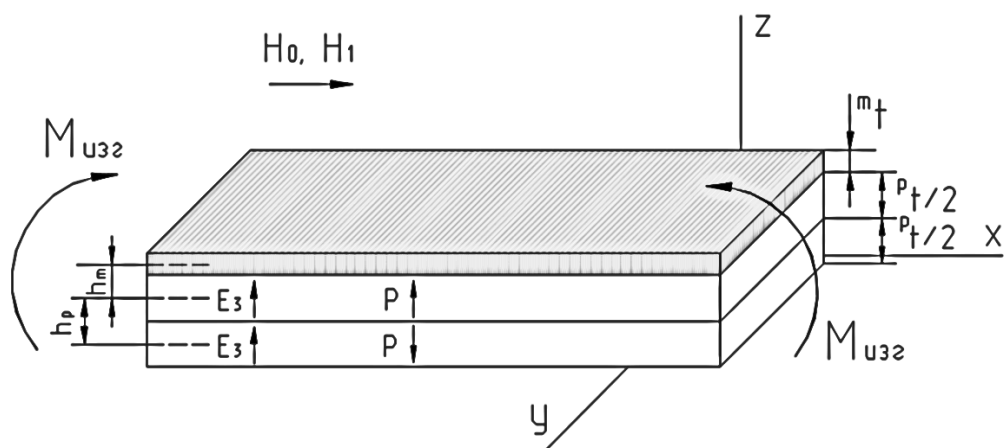


Рисунок 2.8 – Асимметричная слоистая структура состава ферромагнетик - биморфный пьезоэлектрический преобразователь. Образец длиной L расположен в плоскости x, y , ось z направлена вдоль толщины образца. Подмагничивающее поле H_0 и переменное магнитное поле H направлены вдоль оси x . Вектор поляризации пьезоэлектрического слоя направлен вдоль оси z , а переменное электрическое поле E_3 приложено перпендикулярно плоскости образца.

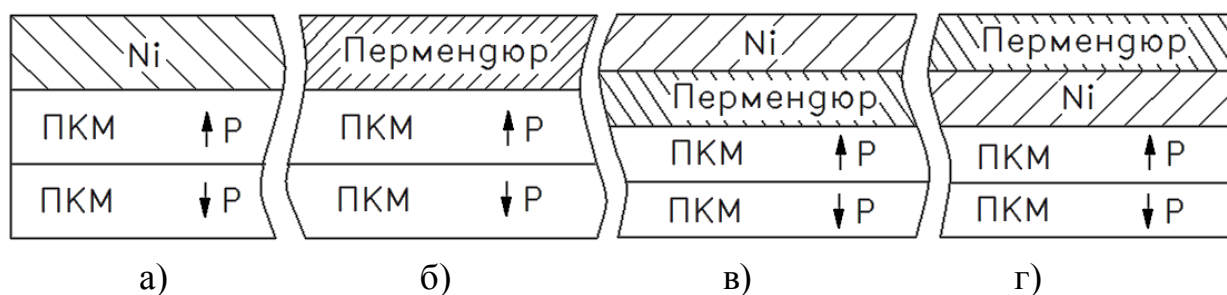


Рисунок 2.9 – Магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура с градиентом поляризации (а, б), а также с градиентом и поляризации и намагниченности (в, г).

Далее рассматривается МЭ взаимодействие в слоистых структурах следующего состава: никель-биморфный слой на основе ЦТС, никель-биморфный слой на основе PMN-РТ, пермендюр-биморфный слой ЦТС, пермендюр-биморфный слой PMN-РТ, а также структуры с градиентом и намагниченности, и поляризации: никель-пермендюр-биморфный ЦТС, никель-пермендюр-биморфный PMN-РТ, пермендюр-никель-биморфный ЦТС, пермендюр-никель-биморфный PMN-РТ.

Для достижения пьезомагнитного эффекта и линеаризации МЭ свойств слоистой структуры, к материалу прикладывается подмагничивающее поле H_0 . Магнитное поле смещения H_0 и переменное магнитное поле H_1 параллельны оси x . Пьезоэлектрический слой поляризован вдоль оси z и постоянное электрическое поле E_3 направлено перпендикулярно образцу. Для удобства построения теоретической модели МЭ эффекта в структуре на основе биморфного преобразователя длина образца выбирается значительно больше остальных геометрических размеров, и рассматривается только одна составляющая тензора механических напряжений и деформаций. Предполагается, что симметрия пьезоэлектрической фазы есть ∞m , а пьезомагнитная фаза обладает кубической симметрией.

Уравнения упругости и материальные уравнения для ферромагнитной фазы, а также нижнего и верхнего слоев пьезоэлектрика запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 {}^{p1}S_1 &= {}^ps_{11} {}^{p1}T_1 - {}^pd_{31} {}^pE_3; \\
 {}^{p2}S_1 &= {}^ps_{11} {}^{p2}T_1 + {}^pd_{31} {}^pE_3; \\
 {}^{p1}D_3 &= - {}^pd_{31} {}^{p1}T_1 + {}^p\varepsilon_{33} {}^pE_3; \\
 {}^{p2}D_3 &= {}^pd_{31} {}^{p2}T_1 + {}^p\varepsilon_{33} {}^pE_3; \\
 {}^mS_1 &= {}^ms_{11} {}^mT_1 + {}^mq_{11} {}^mH_1; \\
 {}^mB_1 &= {}^mq_{11} {}^mT_1 + {}^m\mu_{11} {}^mH_1;
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

где S_1 и T_1 компоненты тензоров деформации и механического напряжения, E_{31} и D_3 - компоненты векторов электрического поля и электрического смещения, H_{11} и B_1 - компоненты векторов магнитного поля и магнитной индукции, s_{11} , - податливость; q_{11} и d_{31} - пьезомагнитный и пьезоэлектрический коэффициенты, ε_{33} - диэлектрическая проницаемость и μ_{11} - магнитная проницаемость. Верхний индекс m соответствует пьезомагнитной фазе, индекс p относится к пьезоэлектрической фазе. Индексы $p1$ и $p2$ относятся к верхнему и нижнему слоям биморфного преобразователя в соответствии с направлением поляризации.

Деформация, возникающая вследствие МЭ эффекта, рассматривается как сумма деформаций, возникающих за счет изгиба и продольных деформаций нейтральной оси:

$$\begin{aligned}
 {}^mS_1 &= {}^mS_{10} + z_m/R; \\
 {}^pS_1 &= {}^pS_{10} + z_p/R
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

где ${}^mS_{10}$, и ${}^pS_{10}$ – деформации нейтральной оси вдоль оси x при $z_i = 0$ для магнитной и пьезоэлектрической фазы, соответственно, R – радиус кривизны нейтральной оси структуры; z_i – расстояние от i -го слоя структуры до срединной плоскости этого слоя.

Решая совместно систему уравнений (2.24) с учетом граничных условий, в соответствии с которыми на границе раздела магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз наблюдается равенство компонент деформаций, запишем следующее выражение для деформаций нейтральной оси:

$${}^mS_{10} - {}^pS_{10} = h_m/R, \quad (2.25)$$

где $h_m = (t_p + t_m)/2$ – средняя толщина магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз.

Уравнение (2) можно переписать, используя формулы (2.25) и (2.23)

$$\begin{aligned} {}^mS_{10} + z_m/R &= {}^mS_{11} {}^mT_1 + {}^mq_{11} {}^mH_1 \\ {}^mS_{10} + (z_m - h_m)/R &= {}^pS_{11} {}^pT_1 + {}^pd_{31} {}^pE_3 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Механические напряжения для каждого слоя представлены в формуле (2.27).

$$\begin{aligned} {}^mT_1 &= \frac{1}{{}^mS_{11}} \left({}^mS_{10} + \frac{z_m}{R} - {}^mq_{11} {}^mH_1 \right) \\ {}^{p1}T_1 &= \frac{1}{{}^pS_{11}} \left({}^mS_{10} + \frac{z_m - h_m}{R} - {}^pd_{31} {}^1E_3 \right) \\ {}^{p2}T_1 &= \frac{1}{{}^pS_{11}} \left({}^mS_{10} + \frac{z_m - h_m}{R} + {}^pd_{31} {}^2E_3 \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Для выполнения условия равновесия осевые силы в слоях структуры должны в сумме равняться нулю,

$${}^m F_1 + {}^p F_1 = 0, \quad (2.28)$$

$$\text{где } {}^m F_1 = \int_{-{}^m t/2}^{{}^m t/2} {}^m T_1 dz, \quad {}^p F_1 = \int_{-{}^p t/2}^0 {}^p T_1 dz + \int_0^{{}^p t/2} {}^p T_1 dz,$$

Решение уравнения (2.28) после подстановки ${}^i T_j$ из выражения (2.27) позволяет найти ${}^m S_{10}$:

$${}^m S_{10} = \frac{s_1}{t} \left[{}^m Y \int_{-{}^m t/2}^{{}^m t/2} {}^m q_{11} {}^m H_1 dz + {}^p Y \left(\int_{-{}^p t/2}^0 \left(-{}^p d_{31} {}^p E_3 + \frac{h_m {}^p t}{R} \right) dz \right) + {}^p Y \left(\int_0^{{}^p t/2} \left({}^p d_{31} {}^p E_3 + \frac{h_m {}^p t}{R} \right) dz \right) \right], \quad (2.29)$$

где $s_1 = t({}^m t {}^m Y + {}^p t {}^p Y)^{-1}$, $t = {}^m t + {}^p t$, ${}^m Y$, ${}^p Y$ – модули упругости пьезомагнитной и пьезоэлектрической компонент, соответственно.

Также в условиях равновесия сумма моментов осевых сил каждого слоя должна уравниваться результирующим изгибным моментом M_{mj} , M_{pj} , возникающих в пьезоэлектрическом и магнитострикционном слоях в расчете на единицу ширины слоя. Таким образом,

$${}^m F_1 h_m = {}^m M_1 + {}^p M_1, \quad (2.30)$$

$$\text{где } {}^m M_1 = \int_{-{}^m t/2}^{{}^m t/2} z_m {}^m T_1 dz_m, \quad {}^p M_1 = \int_{-{}^p t/2}^0 z_p {}^p T_1 dz_p + \int_0^{{}^p t/2} z_p {}^p T_1 dz_p,$$

Из условия равновесия (2.30) после подстановки выражения для механических напряжений (2.27) и выражения (2.29) можно найти радиус изгиба R . Для вычисления деформаций нейтральной оси, значения радиуса

кривизны нужно подставить в уравнение (2.29). После того, как деформации определены, из уравнения (2.27) можно найти осевое напряжение pT_1 для подстановки в конечную формулу.

Чтобы получить выражение для МЭ коэффициента по напряжению, воспользуемся условием разомкнутой цепи на границе раздела слоев. D_3 для верхнего и нижнего слоев из уравнения (2.1) приравнивается к нулю, после чего уравнение решается относительно E_3 .

$$\int_{-p_t/2}^0 (-{}^pd_{31} {}^{p1}T_1 + {}^p\varepsilon_{33} {}^{p1}E_3) dz = 0;$$

$$\int_0^{p_t/2} ({}^pd_{31} {}^{p2}T_1 + {}^p\varepsilon_{33} {}^{p2}E_3) dz = 0;$$
(2.31)

В итоге, выражение для МЭ коэффициента по напряжению имеет вид

$$\alpha_{E31} = \frac{E_3}{H_1} = \int_{-p_t/2}^0 \frac{-{}^pd_{31} {}^{p1}T_1}{{}^pt H_1 {}^p\varepsilon_{33}} dz + \int_0^{p_t/2} \frac{{}^pd_{31} {}^{p2}T_1}{{}^pt H_1 {}^p\varepsilon_{33}} dz;$$
(2.32)

где E_3 и H_1 – среднее значение электрического поля, индуцируемого поперечно пьезоэлектрическому слою и приложенное переменное магнитное поле, pT_1 находится из уравнений (2.27) после подстановки (2.29) и радиуса изгиба R .

Для случая, когда квадрат коэффициента электромеханической связи можно считать малым по сравнению с единицей, т.е. $K_{31} = \frac{{}^pd_{31}}{\sqrt{{}^p\varepsilon_{33} {}^ps_{11}}} \ll 1$,

выражение (2.32) может быть записано в явном виде

$$\alpha_{E31} = \frac{3^m q_{11} {}^ms_{11} (1-V) V^3 {}^pd_{31}}{2\{({}^ms_{11} - {}^ps_{11}) V [({}^ms_{11} - {}^ps_{11}) V^3 + 4{}^ps_{11} (V^2 + 1) - 6{}^ps_{11} V] + {}^ps_{11}^2\} {}^p\varepsilon_{33}}, \quad (2.33)$$

где $V=(p^1t+p^2t)/t$ – объемная доля пьезоэлектрической компоненты, p^1t и p^2t – толщины слоев пьезоэлектрического биморфного преобразователя, t – толщина образца.

Выражение (2.33) показывает, что МЭ коэффициент по напряжению определяется, в основном, пьезоэлектрическим и пьезомагнитным коэффициентами, а также объемными долями компонентов структуры.

МЭ коэффициент по напряжению для традиционной двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры определяется выражением [45]

$$\alpha_{E31} = \frac{(1-V)V^m q_{11}^p d_{31} [(^m s_{11} - ^p s_{11})V^3 + ^p s_{11}(3V^2 - 3V + 1)]}{2\{(^m s_{11} - ^p s_{11})V[(^m s_{11} - ^p s_{11})V^3 + 4^p s_{11}(V^2 + 1) - 6^p s_{11}V] + ^p s_{11}^2\}^p \varepsilon_{33}} \quad (2.34)$$

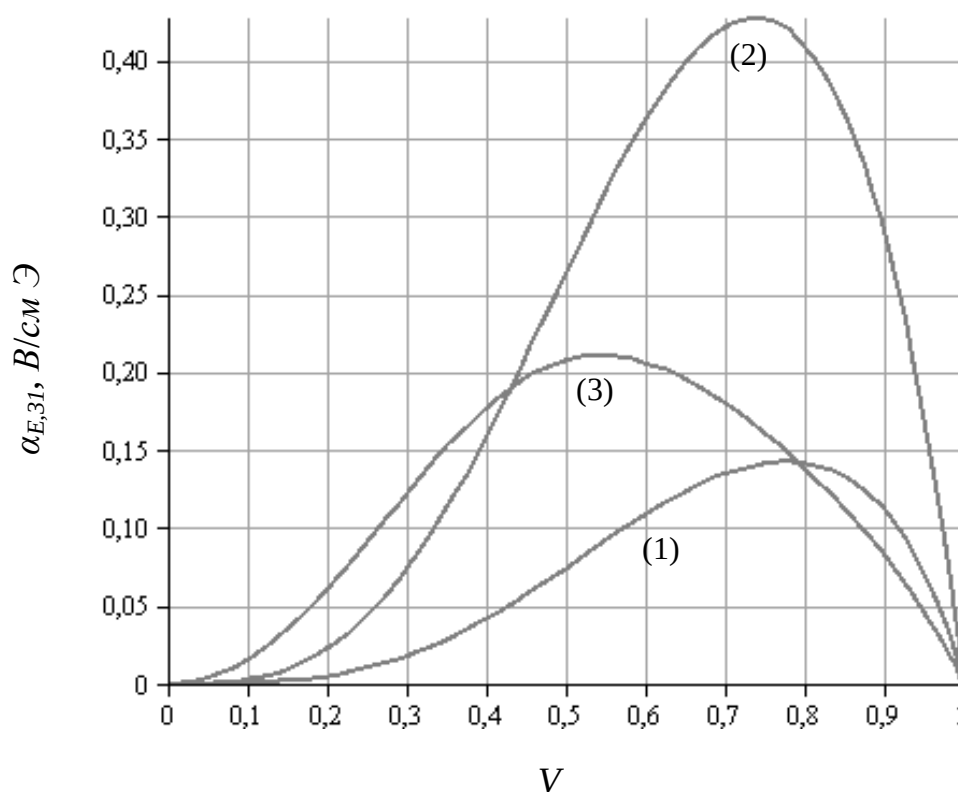


Рисунок. 2.10 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V для структур Ni-биморфный слой ЦТС (1), пермендюр-биморфный слой ЦТС (2), и для Ni-пермендюр-биморфный слой ЦТС (3).

На рис. 2.10, 2.11 приведены зависимости низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V в структурах на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя: Ni - биморфный преобразователь ЦТС, пермендюр - биморфный преобразователь ЦТС, Ni-пермендюр - биморфный ЦТС и пермендюр-Ni-биморфный ЦТС.

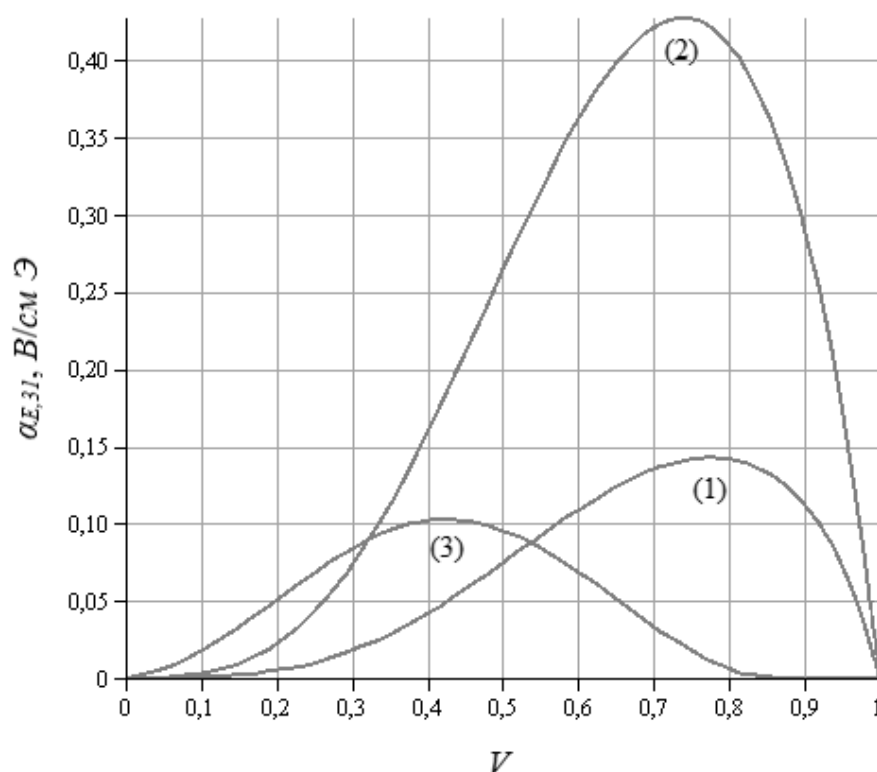


Рисунок. 2.11 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V для структур Ni-биморфный слой на основе ЦТС, пермендюр-биморфный слой на основе ЦТС, и для структуры пермендюр-Ni-биморфный слой ЦТС.

На рис. 2.12, 2.13 приведены зависимости низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли ЦТС V в структурах на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя: Ni-биморфный слой на основе PMN-РТ, пермендюр-биморфный слой на основе PMN-РТ, Ni-пермендюр-биморфный слой PMN-РТ и пермендюр-Ni-биморфный слой PMN-РТ.

Наибольший МЭ коэффициент по напряжению наблюдается в случае использования структуры Ni-пермендюр-биморфный преобразователь PMN-PT. В случае применения биморфной структуры на основе ЦТС совместно с использованием неоднородного магнитного материала максимум МЭ коэффициента ниже, чем в случае структур Ni-биморфный PMN-PT и пермендюр-биморфный PMN-PT, т. к. для структур с неоднородным пьезоэлектриком максимум МЭ коэффициента сдвигается в область более высоких значений объемной доли пьезоэлектрика, тогда как для структур с неоднородным ферромагнетиком максимум МЭ коэффициента сдвигается в область более низких значений объемной доли пьезоэлектрика.

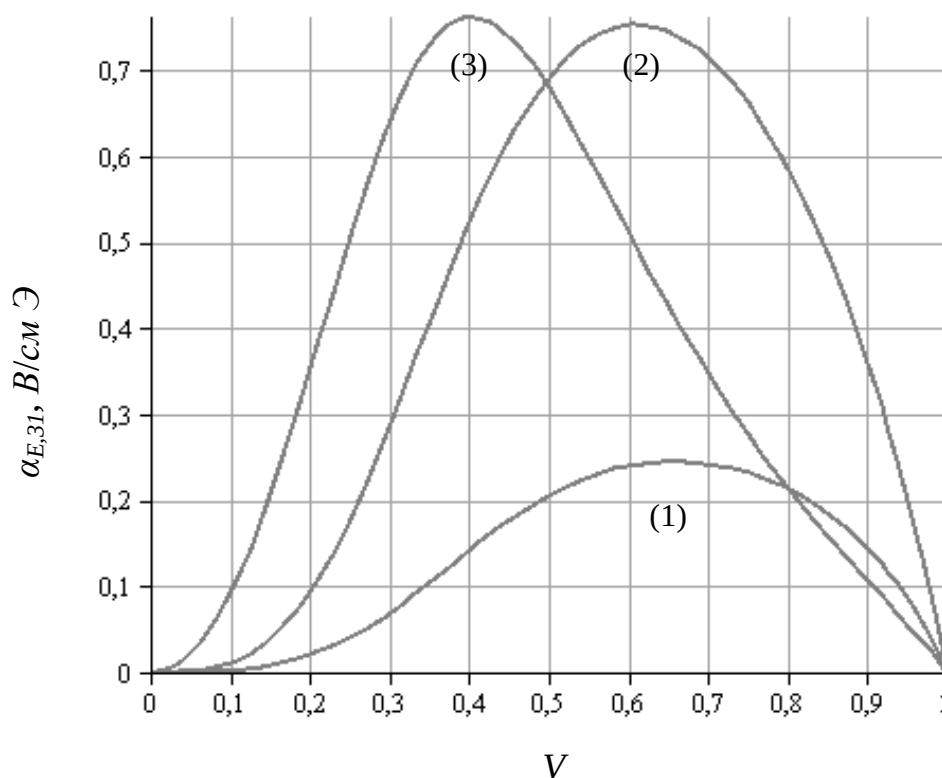


Рисунок. 2.12 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли PMN-PT V для структур Ni-биморфный слой PMN-PT, пермендюр-биморфный слой PMN-PT, и для структуры Ni-пермендюр-биморфный слой на основе PMN-PT.

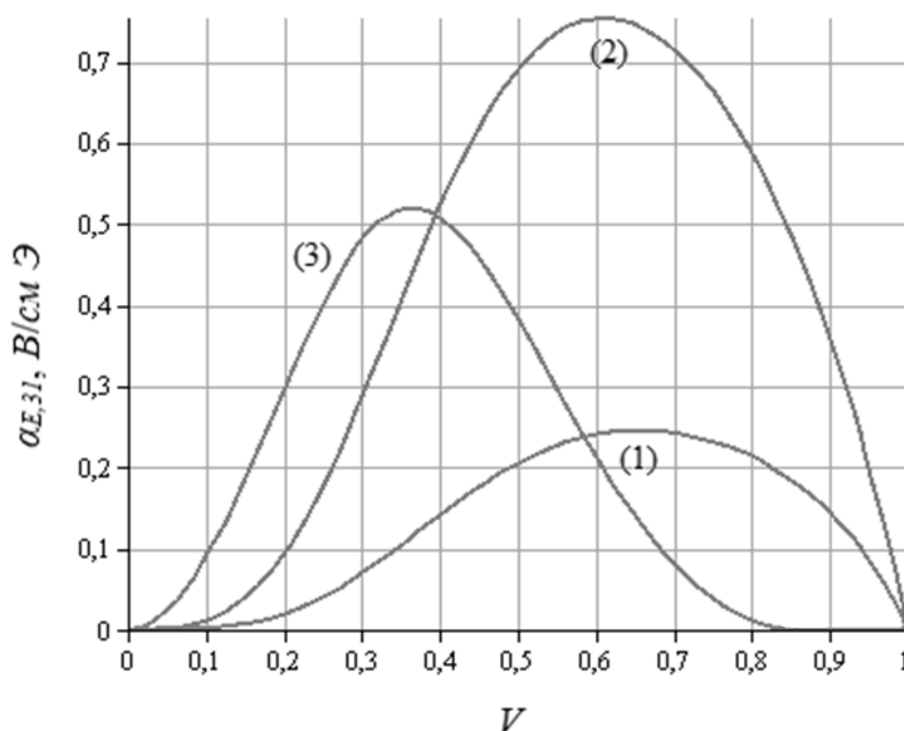


Рисунок. 2.13 – Зависимость низкочастотного МЭ коэффициента по напряжению $\alpha_{E,31}$ от объемной доли PMN-РТ V для структур Ni-биморфный слой на основе PMN-РТ (1), пермендюр-биморфный слой на основе PMN-РТ (2), и для структуры пермендюр-Ni-биморфный слой PMN-РТ (3).

К достоинствам магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя следует отнести устойчивость по отношению к внешним аксиальным механическим напряжениям вследствие компенсации наводимых электрических напряжений в слоях биморфного преобразователя. Поэтому описанную магнитострикционно-пьезоэлектрическую структуру рекомендуется использовать при проектировании помехоустойчивых датчиков магнитного поля.

2.3 Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Для подтверждения теоретических исследований в работе экспериментально исследован МЭ эффект в структуре на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя. Измерения МЭ коэффициента по напряжению были выполнены в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе ЦТС и магнитного аморфного сплава метгласа.

Образцы на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя были получены методом склеивания слоев метгласа и двух пластин ЦТС с противоположными направлениями поляризации. МЭ коэффициент по напряжению измерялся при воздействии на образец переменного магнитного поля.

Установка для измерения МЭ эффекта состоит из постоянного дипольного электромагнита переменного зазора GMW 5403, между сердечниками которого помещались исследуемые образцы, и источника постоянного тока Sorensen DLM 20-30, питающего электромагнит. На пластинку образца с противоположных сторон предварительно были припаяны электроды. С помощью специального зажима к электродам подключался измерительный прибор-осциллограф. Для создания переменного и постоянного магнитного полей использовались катушки Гельмгольца, подключаемые к генератору.

Теоретические и экспериментальные данные МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС показаны на рис 2.14. Приведены сравнения МЭ взаимодействия в слоистой структуры биморфный преобразователь ЦТС – Метглас и в двухслойной структуре ЦТС – Метглас.

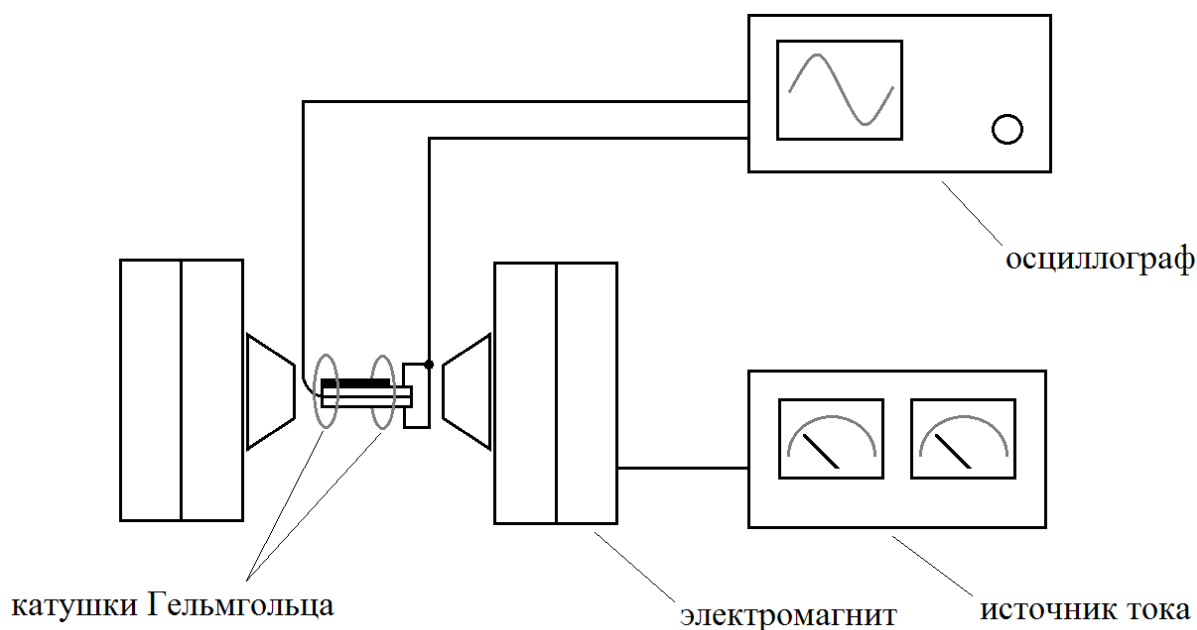


Рисунок 2.14 – Схема измерительной установки

Как видно из рисунка 2.15, теоретическая зависимость МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Зависимость МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика имеет вид кривой с двумя максимумами, что связано с наличием изгибных деформаций двухслойного образца. Использование биморфного пьезоэлектрического преобразователя в составе магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры вместо однородного пьезоэлектрического слоя позволяет увеличить максимальное значение МЭ коэффициента с 80 мВ/(см·Э) до 140 мВ/(см·Э). При этом объемная доля пьезоэлектрика, соответствующая максимуму МЭ коэффициента составляет приблизительно 0.8.

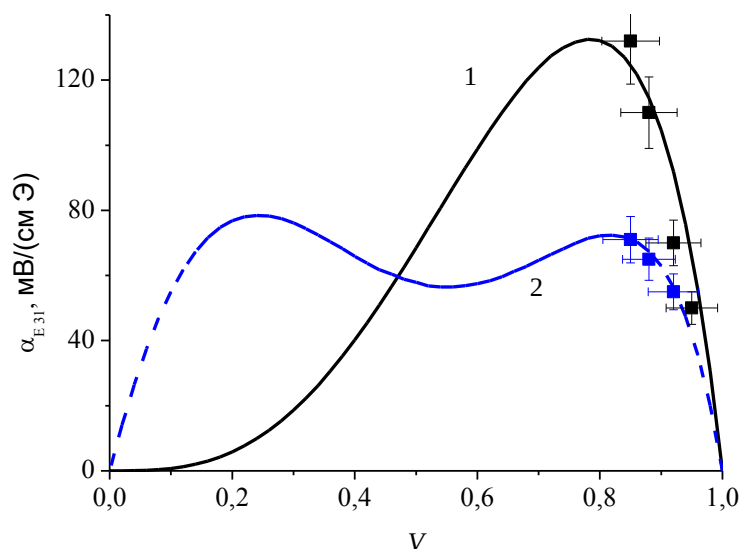


Рисунок 2.15 – Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для слоистой структуры биморфный преобразователь ЦТС – Метглас (1) и двухслойной структуры ЦТС – Метглас. Линии соответствуют теоретическим значениям, точки – экспериментальным данным.

Погрешность теоретических оценок главным образом определяется погрешностью используемых в вычислениях материальных параметров. Основной вклад в величину относительной погрешности вносит пьезомагнитный модуль, при этом разброс его величины для различных образцов составляет не более 5 %. Однако пьезомагнитный модуль образцов метгласа, использованных для экспериментальных исследований, был измерен достаточно точно, поэтому на величину относительной погрешности теоретических оценок он не оказывает существенного влияния. Погрешность измерений МЭ коэффициента составляет не более 5 %.

2.4 Выводы

Построена обобщенная теоретическая модель низкочастотного МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных компонентов со ступенчатым изменением пьезомагнитных (пьезоэлектрических) свойств по толщине. Для построения теоретической модели использовались уравнения упругости и материальные уравнения для пьезоэлектрического и магнитострикционного слоев, а также фундаментальные положения теоретической механики и сопромата.

Получены явные выражения для МЭ коэффициента по напряжению в слоистых структурах на основе неоднородного ферромагнетика, а также для структуры на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя.

Построены зависимости МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрика: для МЭ структур на основе ферромагнетика с градиентом намагниченности, состоящего из слоев пермендюра и никеля; для структур на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя; для магнитострикционно-пьезоэлектрических структур с применением градиента в обеих фазах.

Для сравнения представлены зависимости МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрической фазы для двухслойных структур состава феррит-пьезоэлектрик и для исследуемых структур на основе неоднородных компонентов.

В случае использования двухслойных структур зависимость МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика демонстрирует двойной максимум, вследствие того, что механическое напряжение, индуцируемое в магнитной фазе, имеет две составляющие: продольную и изгибную.

Эффективность МЭ взаимодействия увеличивается при использовании образцов с неоднородными по составу фазами, при этом зависимость МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрика в данном случае имеет один максимум, вследствие появления дополнительного

вращающего момента, компенсирующего изгиб образца. Также следует отметить, что наблюдается сдвиг этого максимума в область более низких значений объемной доли пьезоэлектрика в случае использования структуры с неоднородным ферромагнетиком, и сдвиг в область более высоких значений объемной доли пьезоэлектрика для структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя.

МЭ коэффициент по напряжению в слоистой структуре с неоднородным ферромагнетиком ЦТС-никель-пермендюр на 75 % выше, чем в структуре никель-ЦТС и на 40 % превышает МЭ коэффициент в структуре пермендюр-ЦТС. Использование пьезоэлектрического биморфного преобразователя на основе ЦТС вместо однородного пьезоэлектрического слоя в структурах никель-ЦТС и пермендюр-ЦТС позволяет практически в 3 раза увеличить МЭ коэффициент по напряжению.

Сравнивая теоретические и экспериментальные зависимости МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрика в структуре метглас-биморфный пьезоэлектрический преобразователь на основе ЦТС, следует отметить, что измеренные значения МЭ коэффициента по напряжению и характер его зависимости от объемной доли ЦТС находится в хорошем соответствии с теоретическими данными.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

Как уже упоминалось, в феррит-пьезоэлектрических структурах МЭ эффект обусловлен механическим взаимодействием магнитной и электрической подсистем, поэтому в области ЭМР наблюдается значительное увеличение МЭ коэффициентов. В работах [61-62] проведено исследование частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению в области продольной и радиальной мод ЭМР для образцов композита на основе никелевой феррошпинели - ЦТС. В указанной работе получено выражение для МЭ коэффициента по напряжению при поперечной и продольной ориентациях электрического и магнитного полей. Показано, что на частоте антирезонанса наблюдается возрастание МЭ коэффициента более чем на порядок. Резонансная частота для изгибных колебаний сравнительно меньше, чем для продольных акустических мод, что представляет интерес с точки зрения практического использования МЭ эффекта. Экспериментальные исследования показали наличие в слоистых структурах гигантского МЭ эффекта при использовании изгибных колебаний [63-64]. Теоретическое моделирование МЭ эффекта в области изгибной моды выполнено в [42].

В настоящей работе исследуется МЭ эффект в области изгибных мод ЭМР в слоистых структурах на основе (1) магнитострикционного материала и пьезоэлектрического биморфного преобразователя, а также (2) пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции.

3.1 Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах на основе магнитострикционного материала и двух пьезоэлектрических слоев с разными направлениями поляризации

Рассмотрим изгибные колебания трехслойной структуры, состоящей из магнитострикционного слоя и биморфного пьезоэлектрического преобразователя в виде двух одинаковых сегнетоэлектрических слоев с противоположным направлением поляризации. Будем считать, что образец имеет форму тонкой пластинки, для которой толщина значительно меньше остальных геометрических размеров, а ширина – значительно меньше длины. В этом случае мы можем рассматривать только одну составляющую тензора напряжений и деформаций. Изгибные колебания тонкой пластинки описываются известным уравнением [51]

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{\rho t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} = 0, \quad (3.1)$$

где $\nabla^2 \nabla^2$ – бигармонический оператор, w – прогиб (смещение в направлении z), t и ρ – толщина и средняя плотность образца, а τ – время. Для рассматриваемой структуры толщина $t = {}^{p1}t + {}^{p2}t + {}^m t$, $\rho = ({}^{p1}\rho {}^{p1}t + {}^{p2}\rho {}^{p2}t + {}^m \rho {}^m t)/t$, где ${}^p \rho$, и ${}^m \rho$, – плотность пьезоэлектрического и магнитного слоев, ${}^{p1}t$, ${}^{p2}t$ и ${}^m t$ толщина пьезоэлектрических и магнитострикционного слоев.

Уравнение (3.1) описывает изгибные колебания срединной плоскости образца, каждая точка которой движется только в направлении Z , перпендикулярном плоскости образца. Положение срединной плоскости определяется из условия равенства нулю суммы сил, действующих вдоль оси X . Эта сила определяется напряжениями в слоях структуры, которые могут быть выражены через деформации в соответствии с законом Гука. Расстояние от срединной плоскости до поверхности раздела слоистой структуры z_0 определяется выражением:

$$z_0 = \frac{1}{2} \frac{{}^pY^E \cdot ({}^{p1}t + {}^{p2}t)^2 - {}^mY^B \cdot {}^mt^2}{{}^{p1}Y^E \cdot {}^{p1}t + {}^{p2}Y^E \cdot {}^{p2}t + {}^mY^B \cdot {}^mt}, \quad (3.2)$$

где ${}^pY^E$ и ${}^mY^B$ - модули упругости пьезоэлектрической компоненты при постоянном электрическом поле и магнитострикционной компоненты при постоянной магнитной индукции. Продольная компонента деформации слоев образца связана с прогибом w вдоль направления z соотношением ${}^{p,m}S_1 = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$. Деформации слоев и механические напряжения связаны обобщенным законом Гука (2.1). В диссертации рассматривается поперечная ориентация магнитных и электрических полей, для которой постоянное и переменное магнитные поля направлены вдоль длины образца, а направление поляризации и переменное электрическое поле перпендикулярны плоскости образца. Указанная ориентация магнитных полей обеспечивает наименьшее влияние размагничивающих полей.

Магнитоэлектрический коэффициент по напряжению вычисляется как отношение индуцированного электрического поля E к приложенному магнитному полю H : $\alpha_E = \frac{E}{H}$. Для вычисления МЭ коэффициента необходимо в условие разомкнутой электрической цепи подставить выражение для механического напряжения, полученное из решения уравнения (3.1). Для этого найдем сначала вращающий момент относительно оси y , который описывается следующим выражением:

$$M_x = \int_{z_0 - {}^{p1}t - {}^{p2}t}^{z_0 - {}^{p1}t} z \cdot {}^{p2}T_1 dz + \int_{z_0 - {}^{p1}t}^{z_0} z \cdot {}^{p1}T_1 dz + \int_{z_0}^{z_0 + {}^mt} z \cdot {}^mT_1 dz. \quad (3.3)$$

Поперечная сила определяется как

$$V_x = \frac{\partial M_x}{\partial x}. \quad (3.4)$$

Для расчета среднего значения напряженности индуцированного электрического поля E следует использовать формулу

$$E = \frac{1}{t} \int_{z_0 - p^1 t - p^2 t}^{z_0 - p^1 t} p^2 E_3 dz + \frac{1}{t} \int_{z_0 - p^1 t}^{z_0} p^1 E_3 dz. \quad (3.5)$$

Для определения внутреннего электрического поля в пьезоэлектрической компоненте $p^{1,2}E_3$ следует воспользоваться условием разомкнутой цепи:

$$\int_0^L {}^p D_3 dx = 0. \quad (3.6)$$

Электрическую индукцию ${}^p D_3$ можно выразить из совместного решения уравнений (3.6) и (3.3). При этом выражение для ${}^p E_3$ приобретает вид:

$$p^{1,2}E_3 = \frac{{}^p d_{31} \cdot {}^p Y^E}{L \cdot {}^p \varepsilon_{33} \cdot (1 - {}^p K_{31}^2)} \int_0^L \frac{d^2}{dx^2} w(x) dx, \quad (3.7)$$

Напряженность внешнего и внутреннего магнитного полей в данной структуре связаны следующим выражением:

$$H = \frac{1}{m t} \int_{z_0}^{z_0 + m t} {}^m H_1 dz. \quad (3.8)$$

где ${}^m H_1$ определяется из совместного решения уравнений (3.6) и (3.1) с учетом того, что магнитная индукция имеет нулевую дивергенцию, т.е. $\partial {}^m B_1 / \partial x = 0$.

Выражение для магнитной индукции, полученное из соответствующего материального уравнения, имеет вид:

$${}^m B_1 = \frac{(1 - {}^m K_{11}^2)}{L} (-{}^m q_{11} \cdot {}^m Y^B \cdot z \cdot \int_0^L \frac{d^2}{dx^2} w(x) dx + H \cdot L \cdot {}^m \mu_{33}), \quad (3.9)$$

где ${}^m K_{11}$ - коэффициент магнитомеханической связи.

Уравнение (3.9) используется для определения вращающего момента и осевой силы. Ограничимся рассмотрением гармонических колебаний, тогда прогиб как функция x и τ определяется выражением

$$w(x, \tau) = w(x) \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad (3.10)$$

где ω – круговая частота.

Если выражение (3.10) подставить в уравнение (3.1), то общее решение этого уравнения может быть записано следующим образом:

$$w(x) = C_1 \cdot \sinh(kx) + C_2 \cdot \cosh(kx) + C_3 \cdot \sin(kx) + C_4 \cdot \cos(kx), \quad (3.11)$$

где волновое число k определяется выражением

$$k^4 = \frac{\omega^2 \rho t}{D}, \quad (3.12)$$

Если в уравнение (3.7) подставить (3.11) и использовать обозначения $\cosh(kL) = r_1$, $\sinh(kL) = r_2$, $\cos(kL) = r_3$ и $\sin(kL) = r_4$, то мы получим выражение для индуцированного электрического поля:

$${}^p E_3 = \frac{{}^p d_{31} \cdot {}^p Y^E}{L \cdot {}^p \varepsilon_{33} \cdot (1 - {}^p K_{31}^2)} \cdot (-C_1 \cdot k - C_3 \cdot k + C_1 \cdot k \cdot r_1 + C_2 \cdot k \cdot r_2 + C_3 \cdot k \cdot r_3 - C_4 \cdot k \cdot r_4). \quad (3.14)$$

Для определения постоянных интегрирования C_1 , C_2 , C_3 , C_4 следует использовать граничные условия на концах образца. Граничные условия определяются значениями вращающего момента M_x , осевой силы V_x , прогиба w и производной от прогиба $\partial w / \partial x$. В качестве примера далее рассматривается образец с консольным закреплением, для которого резонансная частота является наименьшей по сравнению с другими видами закреплений. При этом $w=0$ и $\partial w / \partial x=0$ при $x=0$, $M_x=0$ и $V_x=0$ при $x=L$.

Для определения M_x согласно выражению (3.3) используем механические напряжения, выраженные через прогиб. Затем в полученные

выражения подставляем pE_3 и mB_1 согласно (3.7) и (3.9). После преобразований получаем

$$M_x = \frac{a_1}{L} \int_0^L \frac{d^2}{dx^2} w(x) dx + D \cdot \frac{d^2}{dx^2} w(x) - \frac{1}{2} \cdot {}^mY^H \cdot {}^m q_{11} \cdot {}^m t \cdot (2 \cdot z_0 + {}^m t) \cdot H, \quad (3.15)$$

где

$$a_1 = \frac{{}^p K_{31}^2 \cdot {}^p Y \cdot ((z_0 - {}^p t)^3 - z_0^3)}{3 \cdot D \cdot (1 - {}^p K_{31}^2)} + \frac{{}^m K_{31}^2 \cdot {}^m Y \cdot ((z_0 + {}^m t)^3 - z_0^3)}{3 \cdot D} \quad (3.16)$$

D – цилиндрическая жесткость, которая записывается в виде

$$D = \frac{1}{3} \cdot {}^p Y^E \cdot [(z_0 - {}^p t)^3 - (z_0 - {}^p t - {}^p t^2)^3] + \frac{1}{3} \cdot {}^p Y^E \cdot [z_0^3 - (z_0 - {}^p t)^3] + \frac{1}{3} \cdot {}^m Y^B \cdot [(z_0 + {}^m t)^3 - z_0^3]. \quad (3.17)$$

Подстановка (3.15) в граничные условия приводит к системе уравнений относительно постоянных интегрирования. Далее найденные выражения для постоянных интегрирования следует подставить в (3.14), а затем в (3.5) для нахождения индуцированного электрического поля. В результате получаем выражение для МЭ коэффициента по напряжению. Однако ввиду громоздкости точное выражение для МЭ коэффициента не приводится. Это выражение существенно упрощается в предположении малости коэффициентов электромеханической и пьезоэлектрической связи (${}^m K_{11}^2 \ll 1$, ${}^p K_{31}^2 \ll 1$) и приобретает вид

$$\alpha_{E31} = \frac{{}^m Y^p Y^p d_{31} {}^m q_{11} t_m (2z_0 + t_m) [2z_0 (t_{p2} - t_{p1}) - 2t_{p1} t_{p2} - t_{p2}^2 + t_{p1}^2] (r_1 r_4 + r_2 r_3)}{4^p \varepsilon_{33} D k L (t_{p1} + t_{p2} + t_m) (1 + r_1 r_3)} \quad (3.18)$$

Выражение (3.18) показывает, что величина МЭ коэффициента определяется произведением пьезоэлектрического и пьезомагнитного коэффициентов слоев и их толщинами. Резонансные частоты определяются

выражением $\cos(kL)\cosh(kL) = -1$, что совпадает с выражением для резонансной частоты тонкой пластинки с консольным закреплением. Учет квадратов коэффициентов электромеханической и пьезоэлектрической связи ведет к небольшому смещению резонансных частот.

При численных оценках резонансные потери учитываются с помощью комплексной частотой $\omega + i\omega'$ при $\omega'/\omega = 10^{-2}$.

Результаты вычислений частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-ЦТС-пермендюр с равными толщинами пьезоэлектрических слоев приведены на рис. 3.1. Предполагается, что к магнитострикционному слою приложено подмагничивающее поле, обеспечивающее максимум пьезомагнитного коэффициента. Расчеты выполнены для образца длиной $L = 6.8$ см, толщина магнитного и пьезоэлектрических слоев равна 0.2 мм.

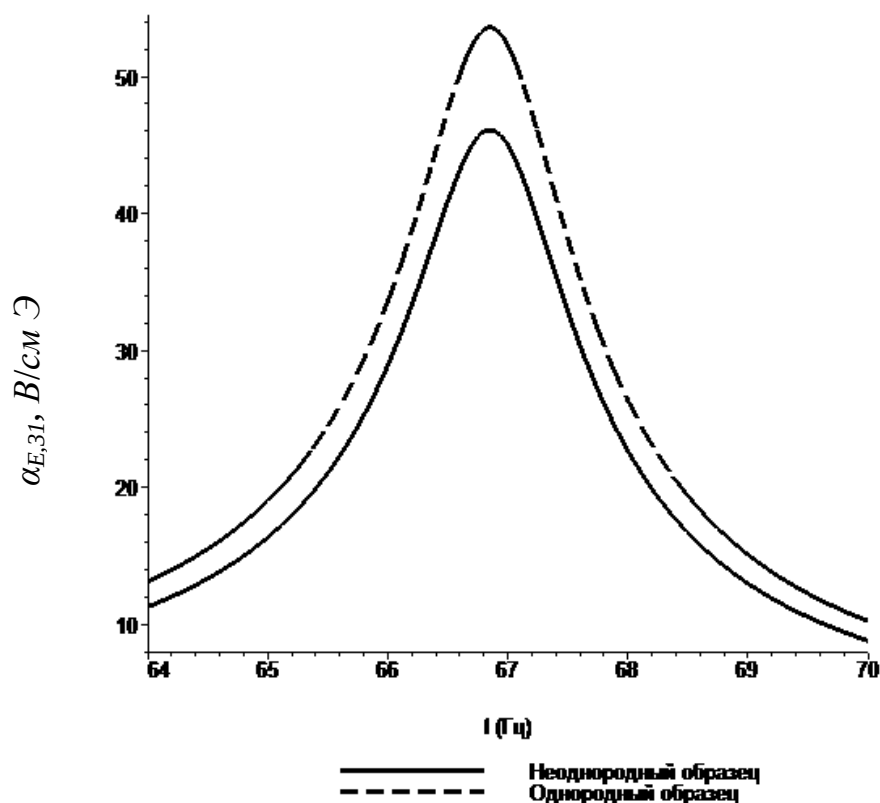


Рис. 3.1 – Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-ЦТС-пермендюр для параллельно (однородный образец) и встречно поляризованных слоев ЦТС. Толщина каждого слоя ЦТС равна 0.2 мм.

Из рис. 3.1 следует, что использование биморфного пьезопреобразователя в составе слоистой структуры не ведет к увеличению МЭ коэффициента. Однако использование пьезоэлектрических слоев с противоположными направлениями поляризации и разными толщинами позволяет усилить МЭ эффект, что показано на рис. 3.2. Следует отметить, что в оценках, приведенных на рис. 3.2, использованы оптимальные значения толщин пьезоэлектрических слоев при выбранной толщине магнитного слоя.

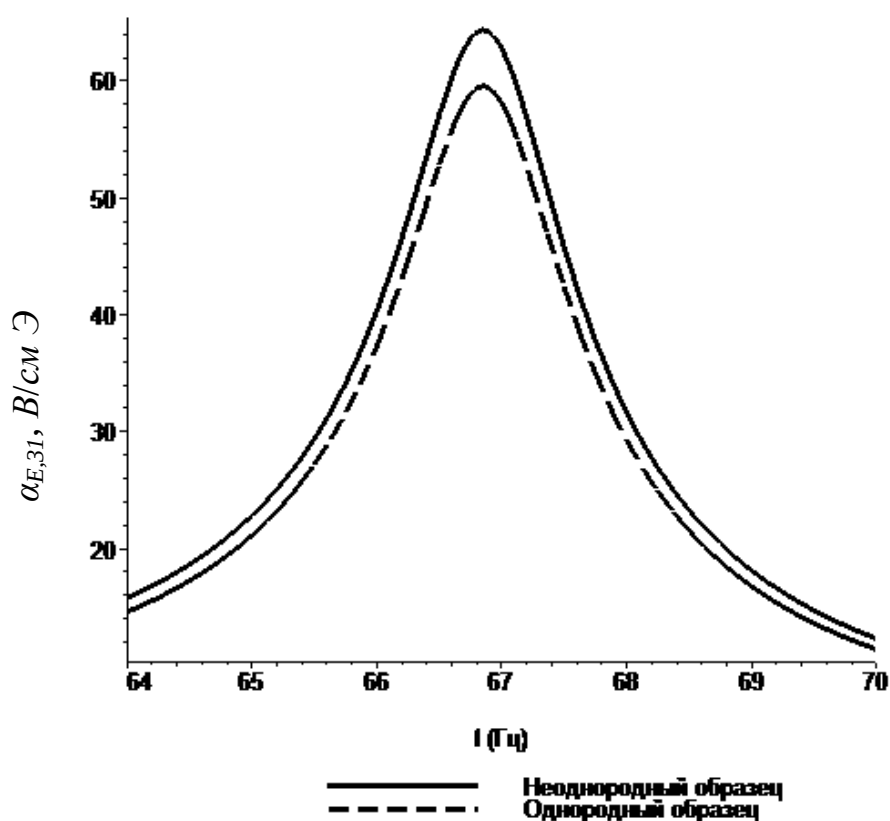


Рис. 3.2 – Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-ЦТС-пермендюр для параллельно (однородный образец) и встречно поляризованных слоев ЦТС. Толщина слоев ЦТС равна 0.1 и 0.3 мм.

Данные вычислений на рис. 3.2 показывают, что увеличение МЭ коэффициента по напряжению составляет приблизительно 10 % для оптимальных толщин слоев.

3.2 Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах на основе пьезоэлектрического материала и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции

Далее рассмотрим изгибные колебания трехслойной структуры, состоящей из пьезоэлектрического слоя и двух магнитострикционных слоев с разными знаками магнитострикции. Аналогично предыдущему параграфу будем считать, что образец имеет форму тонкой пластинки, для которой толщина значительно меньше остальных геометрических размеров, а ширина – значительно меньше длины. В этом случае изгибные колебания образца описываются уравнением (3.1). При этом для рассматриваемой структуры толщина образца $t = {}^p t + {}^{m1} t + {}^{m2} t$, где ${}^{m1} t$ и ${}^{m2} t$ – толщины двух магнитострикционных слоев. Расстояние от срединной плоскости до поверхности раздела слоистой структуры z_0 определяется выражением:

$$z_0 = \frac{1}{2} \frac{{}^p Y^E \cdot {}^p t^2 - {}^{m1} Y^B \cdot {}^{m1} t^2 - {}^{m2} Y^B \cdot {}^{m2} t (2 {}^{m1} t + {}^{m2} t)}{{}^p Y^E \cdot {}^p t + {}^{m1} Y^B \cdot {}^{m1} t + {}^{m2} Y^B \cdot {}^{m2} t}, \quad (3.19)$$

Вращающий момент относительно оси y для рассматриваемой структуры описывается следующим выражением:

$$M_x = \int_{z_0 - {}^p t}^{z_0} z \cdot {}^p T_1 dz + \int_{z_0}^{z_0 + {}^{m1} t} z \cdot {}^{m1} T_1 dz + \int_{z_0 + {}^{m1} t}^{z_0 + {}^{m1} t + {}^{m2} t} z \cdot {}^{m2} T_1 dz. \quad (3.20)$$

Поперечная сила определяется выражением (3.4).

Для расчета среднего значения напряженности индуцированного электрического поля E следует использовать формулу

$$E = \frac{1}{t} \int_{z_0 - {}^p t}^{z_0} {}^p E_3 dz. \quad (3.21)$$

Условие разомкнутой цепи, которое используется для определения внутреннего электрического поля в пьезоэлектрической компоненте pE_3 имеет вид (3.6), а выражение для pE_3 приобретает вид:

$${}^pE_3 = \frac{{}^pd_{31} \cdot {}^pY^E}{L \cdot {}^p\varepsilon_{33} \cdot (1 - {}^pK_{31}^2)} \int_0^L \frac{d^2}{dx^2} w(x) dx, \quad (3.22)$$

Напряженность внешнего и внутреннего магнитного полей в слое j в данной структуре связаны следующим выражением:

$$H = \frac{1}{m_j t} \int_{z_0}^{z_0 + m_j t} H_1 dz, \quad (3.23)$$

где $j=1, 2$.

Выражение для магнитной индукции аналогично (3.9). Для гармонических колебаний прогиб как функция x и τ определяется выражением (3.10), при этом общее решение уравнения (3.1) имеет вид (3.11). Вычисления, аналогичные предыдущему параграфу, позволяет получить выражение для МЭ коэффициента по напряжению. В предположении малости коэффициентов электромеханической и пьезоэлектрической связи (${}^mK_{11}^2 \ll 1$, ${}^pK_{31}^2 \ll 1$) это выражение существенно упрощается и приобретает вид

$$\alpha_{E31} = \frac{{}^pY {}^pd_{31} (a_1 {}^{m1}q_{11} + a_2 {}^{m2}q_{11})(r_1 r_4 + r_2 r_3)}{2 {}^p\varepsilon_{33} kL(1 + r_1 r_3)}, \quad (3.24)$$

где $a_1 = \frac{1}{2D} {}^{m1}Y[(z_0 - {}^{m1}t)^2 - z_0^2](t_p - 2z_0)$,

$$a_2 = \frac{1}{2D} {}^{m2}Y[(z_0 + {}^{m1}t + {}^{m2}t)^2 - (z_0 + {}^{m1}t)^2](t_p - 2z_0),$$

$$D = \frac{1}{3} {}^pY^E \cdot [z_0^3 - (z_0 - {}^pt)^3] + \frac{1}{3} {}^{m1}Y^B \cdot [(z_0 + {}^{m1}t)^3 - z_0^3] + \frac{1}{3} {}^{m2}Y^B \cdot [(z_0 + {}^{m1}t + {}^{m2}t)^3 - (z_0 + {}^{m1}t)^3].$$

Выражение (3.24) показывает, что величина МЭ коэффициента определяется произведением пьезоэлектрического модуля и линейной комбинацией пьезомагнитных коэффициентов слоев. При этом коэффициенты при пьезомагнитных модулях слоев определяются упругими свойствами слоев и их толщинами. Резонансные частоты определяются выражением $\cos(kL)\cosh(kL) = -1$, что совпадает с выражением для резонансной частоты тонкой пластинки с консольным закреплением. Учет квадратов коэффициентов электромеханической и пьезоэлектрической связи ведет к небольшому смещению резонансных частот.

При численных оценках резонансные потери учитываются с помощью комплексной частотой $\omega + i\omega'$ при $\omega'/\omega = 10^{-2}$.

Численные оценки по предложенной модели проведены для слоистой структуры на основе ЦТС, никеля и пермендюра. Расчеты по формуле (3.24) показали, что наибольший МЭ эффект достигается для структуры с отношением толщин первого и второго магнитных слоев, равным 0.5. Результаты вычислений частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-пермендюр-никель приведены на рис. 3.1. Расчеты выполнены для образца длиной $L = 6.8$ см и суммарной толщиной 0.5 мм.

Для сравнения на рис. 3.4 приведены зависимости максимального значения МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли пьезоэлектрика для структур ЦТС-пермендюр и ЦТС-никель.

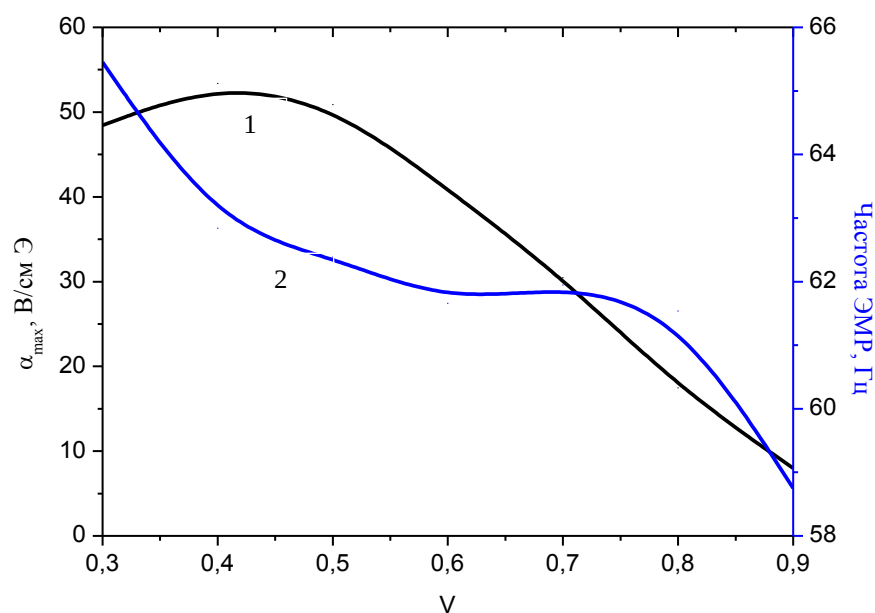


Рис. 3.3. Зависимость максимального значения МЭ коэффициента по напряжению (1) и частоты ЭМР (2) от объемной доли пьезоэлектрика для структуры ЦТС-пермендюр-никель для образца длиной $L=6.8$ см и суммарной толщиной 0.5 мм.

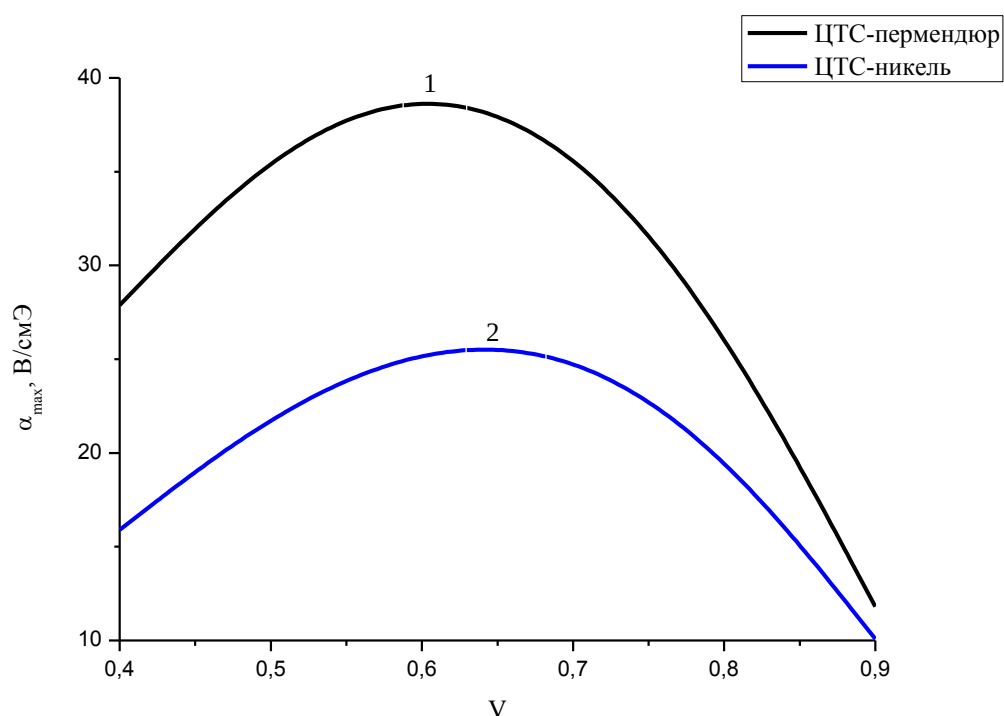


Рис. 3.4. Зависимость максимального значения МЭ коэффициента по напряжению от объемной доли ЦТС для структур ЦТС-пермендюр (1) и ЦТС-никель (2) для образца длиной $L=6.8$ см и суммарной толщиной 0.5 мм.

Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структур ЦТС-пермендюр-никель, ЦТС-пермендюр и ЦТС-никель для образца с суммарной толщиной 0.5 мм для объемной доли пьезоэлектрика 0.4 приведена на рис. 3.5.

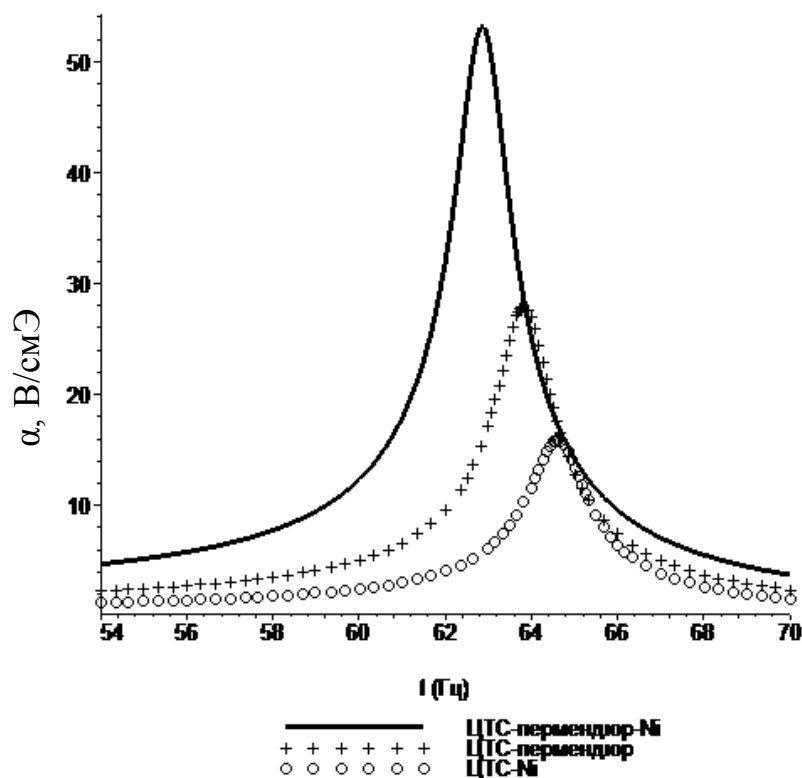


Рис. 3.5. Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структур ЦТС-пермендюр-никель, ЦТС-пермендюр и ЦТС-никель для образца длиной $L=6.8$ см, суммарной толщиной 0.5 мм для объемной доли пьезоэлектрика 0.4.

Как следует из рис. 3.5, максимальное значение МЭ коэффициента для структуры ЦТС-пермендюр-никель превышает значение этого коэффициента для структур ЦТС-пермендюр и ЦТС-никель в 2 и 3 раза соответственно.

Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными на рис. 3.6 приведены результаты расчета частотной зависимости МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-никель-пермендюр. Здесь же приведены данные измерений [38] для изгибной моды.

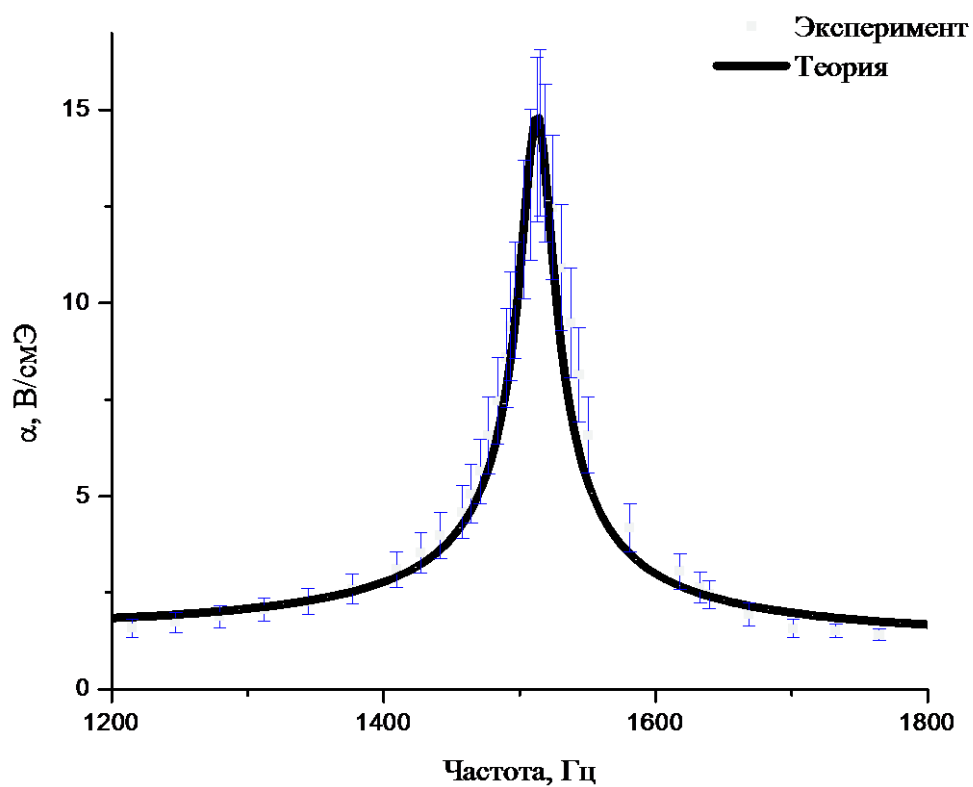


Рис. 3.6. Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для структуры ЦТС-никель-пермендюр длиной $L=20$ мм, толщиной слоя ЦТС $t=0.2$ мм и толщинами магнитострикционных слоев $t^1=t^2=0.16$ мм.

3.3 Выводы

В данной главе рассмотрена теоретическая модель МЭ эффекта в области изгибной моды для слоистых структур со ступенчатым изменением пьезоэлектрических и магнитострикционных свойств. Асимметрия структуры дает возможность эффективного возбуждения изгибных колебаний посредством магнитострикционных деформаций магнитного слоя во внешнем магнитном поле.

Частотная зависимость для поперечного МЭ коэффициента по напряжению получена в результате совместного решения уравнений электростатики, магнитостатики и эластодинамики. Рассмотрен изгибной резонанс в структуре с консольным закреплением, позволяющий получить наиболее низкую резонансную частоту.

Получены явные выражения для МЭ коэффициента по напряжению через материальные параметры исходных компонентов (пьезоэлектрические коэффициенты, пьезомагнитные коэффициенты, упругие податливости и др.). Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными для слоистых структур со ступенчатым изменением пьезоэлектрических и магнитострикционных свойств, состоящих из ЦТС пермендюра и никеля.

В слоистой структуре ЦТС-ЦТС-пермендюр использование пьезоэлектрических слоев с противоположными направлениями поляризации позволяет увеличить МЭ эффект на 10 %.

Для структуры ЦТС-пермендюр-никель максимальное значение МЭ коэффициента на 30 % больше по сравнению со структурой ЦТС-пермендюр. При этом объемная доля ЦТС в структуре состава ЦТС-пермендюр-никель, соответствующая максимальному значению МЭ коэффициента, смещается в сторону меньших значений по сравнению со структурами ЦТС-пермендюр и ЦТС-никель.

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В настоящей главе рассмотрена возможность практического использования слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структур с неоднородными компонентами в устройствах функциональной электроники на основе МЭ эффекта. В качестве таких устройств можно выделить:

- датчики переменного электромагнитного и постоянного магнитного полей, датчики тока, датчики мощности;
- СВЧ-устройства с электрическим управлением: модуляторы, переключатели, фильтры, фазовращатели и невзаимные устройства (вентили, циркуляторы, аттенюаторы);
- многофункциональные компоненты;
- индуктивный элемент на основе МЭ эффекта.

Одним из перспективных направлений использования композиционных магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов является создание датчиков физических величин с широким частотным диапазоном [21].

Датчики на основе МЭ материалов, фиксирующие наличие переменного электромагнитного и постоянного магнитного полей, могут найти широкое применение в научных, медицинских и промышленных приборах. Изученные сенсоры позволяют анализировать постоянные и переменные магнитные поля с высокой чувствительностью.

Основу датчиков переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля составляет диск или пластинка из многослойного композиционного МЭ материала, на торцы которого нанесены токопроводящие обкладки, служащие для измерения напряжения, индуцированного в результате МЭ взаимодействия. Также для линеаризации свойств МЭ материалов датчики переменного магнитного поля дополнительно снабжаются подмагничивающей катушкой, а датчики

постоянного магнитного поля – постоянным магнитом. Конструкция МЭ датчиков постоянного магнитного поля и переменного электромагнитного поля представлены в работах [21, 66-73].

МЭ датчики тока подробно рассмотрены в статьях [74-76]. Режим работы МЭ элемента таких датчиков может быть как резонансный, так и нерезонансный. Также возможна реализация проходных МЭ датчиков тока и поверхностно-монтируемых датчиков.

Разработке датчиков СВЧ мощности посвящена работа [77]. В ней подробно рассмотрены конструкции резонансного микрополоскового датчика СВЧ мощности, резонансного волноводного датчика СВЧ мощности и тороидального датчика СВЧ мощности на основе многослойных и объемных композиционных МЭ материалов. Рассмотрены варианты включения датчиков мощности в СВЧ тракт. Преимущество разработанных датчиков заключается в широком диапазоне измерений СВЧ мощности величиной до 10 Вт, а также в высокой чувствительности этих датчиков, которая сравнима с чувствительностью терморезисторных и болометрических измерителей мощности.

Еще одной перспективной областью применения МЭ взаимодействия является создание СВЧ устройств на его основе. Сдвиг линий магнитного резонанса под действием электрического поля, может быть использован для построения электрически управляемых модуляторов, переключателей, фильтров, датчиков мощности, фазовращателей и невзаимных устройств (вентилей, циркуляторов). Приборы и техника СВЧ на основе МЭ эффекта могут найти широкое применение в разнообразных областях науки и техники – радиолокации, навигации, связи, медицине и биологии. Данные устройства подробно рассмотрены в работах [21, 78-94]. Важно отметить, что в конструкции каждого из таких устройств в качестве подмагничивающего элемента используется постоянный магнит.

Особый интерес представляет возможность построения на основе МЭ композитов многофункциональных устройств, таких как вентиль -

переключатель, фазовращатель – модулятор и др. В современной электронике использование высокоинтегрированной схемотехники и технологии поверхностного монтажа позволяет устройства более компактными. Однако изготовление этих перспективных устройств затруднено наличием сильной электромагнитной связи, обусловленной малым расстоянием между компонентами. Одним из подходов для уменьшения электромагнитной связи является схемотехнический, при этом могут быть использованы фильтрующие устройства, имеющие высокие функциональные возможности и малые габаритные размеры. Подробно данные устройства описаны в работах [21, 93, 94].

Как было отмечено выше, основным недостатком функциональных устройств на основе МЭ эффекта является то, что для оптимизации величины МЭ взаимодействия необходимо использовать предварительную электрическую поляризацию образца и подмагничивание внешним постоянным магнитным полем. Применение ферромагнитного материала с градиентом намагниченности создает внутреннее магнитное поле в материале, поэтому не возникает необходимости в использовании подмагничивающего элемента, а применение пьезоэлектрика с градиентом поляризации за счет появления внутреннего электрического поля может исключить предварительную поляризацию пьезоэлектрического материала.

Таким образом, применение магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов на основе неоднородных компонентов может существенно упростить технологический процесс и конструкцию известных устройств и приборов на основе МЭ эффекта, снизить их стоимость и уменьшить габаритные размеры. Также, следует отметить, что использование данных материалов приводит к снижению энергопотребления электрически управляемых устройств на основе МЭ эффекта за счет усиления МЭ взаимодействия, и к повышению индуцируемого напряжения датчиков на основе МЭ материалов за счет увеличения развиваемых механических усилий.

4.1 Использование слоистой структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя в управляемом индуктивном элементе

Слоистые магнитострикционно-пьезоэлектрические структуры с неоднородными компонентами могут быть использованы в устройстве электрически управляемого индуктивного элемента [73, 95-97].

Сердечник элемента представляет собой слоистую магнитострикционно-пьезоэлектрическую структуру, свойства которой изменяются под воздействием прикладываемого напряжения, оказывая при этом влияние на индуктивность. В материале сердечника наблюдается обратный МЭ эффект, который заключается в возникновении намагниченности в материале под действием внешнего электрического поля.

Использование композиционных МЭ материалов в составе управляемого индуктивного элемента позволяет плавно управлять величиной индуктивности при помощи напряжения, при этом предполагается, что устройство будет обладать рядом преимуществ перед разрабатываемыми ранее аналогами, в частности, иметь высокую добротность, миниатюрные размеры и сравнительно простую конструкцию. Также предполагается, что индуктивность такого типа будет обладать высокой температурной стабильностью и радиационной стойкостью.

4.1.1 Функциональное назначение устройства и сравнительный анализ аналогов

Переменные индуктивности находят широчайшее применение в различных устройствах электроники и, как правило, используются в радиопередающих и радиоприемных устройствах для настройки колебательных контуров на резонансную частоту. В частности: в колебательных контурах генераторов для стабилизации частоты передатчика;

как модулятор частоты для управления колебаниями в радиопередающем устройстве; для настройки антенных усилителей в резонанс; для плавной регулировки связи между двумя контурами в качестве вариометра связи; в согласующих антенных устройствах (в том числе в П-контурах); в преселекторах радиоприемников с высокими требованиями по избирательности и линейности; в измерительной аппаратуре; в фильтрах устройств различного назначения (в том числе в фильтрах передающих и приемных устройств); как подстроечный элемент в устройствах, где требуется точное значение индуктивности; в схемах частотно-избирательных усилителей ВЧ-диапазона.

В настоящее время в сфере практического применения, наиболее известными аналогами управляемого индуктивного элемента на основе МЭ эффекта являются вариометры (катушки переменной индуктивности с механическим управлением). Такие устройства, хотя и позволяют осуществлять настройку контуров в пределах широкого диапазона, имеют существенный недостаток – изменение значения индуктивности в них возможно только механическим способом, что в свою очередь дает большие потери, высокую потребляемую мощность, сложность конструкции и относительно большие габаритные размеры. Все это сильно ограничивает их применение в современной аппаратуре. [98, 99]

Также существуют схемотехнические гираторы, имитирующие переменную индуктивность в схемах. Такие устройства представляют собой активные схемы электронных усилителей с выраженными частотно-зависимыми характеристиками. Но они используются в диапазоне сравнительно низких частот и применяются в основном в частотно-избирательных схемах различных фильтров.

Важным назначением переменных индуктивностей является настройка колебательных контуров на нужную частоту, что, как известно, осуществляется либо за счет включения в цепь колебательного контура переменной емкости (что, как правило, проще реализуется), либо за счет

применения переменной индуктивности. Поэтому, если говорить об индуктивности как об элементе, меняющем частоту колебательных контуров, появляется еще три аналога в соответствии с этим назначением: конденсатор переменной емкости (КПЕ), вариконд и варикап. Но использование переменной емкости также ограничено. КПЕ не используется в портативной аппаратуре, в том числе в автомобильных приемниках, вследствие их неустойчивости к вибрациям; использование вариконда не всегда возможно из-за его нестабильной емкости, ограниченного диапазона температур и частот, высоких диэлектрических потерь; применение варикапа также, несмотря на все его преимущества, связано с определенными трудностями, т. к. он имеет сильно выраженную нелинейность вблизи ВЧ.

В представленном в данной работе устройстве указанные недостатки могут быть сведены к минимуму путем использования в конструкции устройства композиционного МЭ материала.

4.1.2 Теоретическая модель устройства

В качестве модели рассматривается образец, представляющий собой сердечник из композиционного МЭ материала с намотанной на него катушкой индуктивности (рис. 3.1, 3.2). Теоретические оценки представлены для образцов на основе керамики ЦТС и магнитного аморфного материала метгласа.

На рис. 3.1 приведен управляемый индуктивный элемент на основе пьезоэлемента с деформаций растяжения-сжатия. Сердечник в этом случае представляет собой слоистую структуру из механически связанных полос метгласа и пьезоэлектрической пластины ЦТС между ними, поляризованной по нормали к плоскости образца. На рис. 3.2 приведен индуктивный элемент, работающий на изгиб. В качестве сердечника в данном случае используется асимметричная структура на основе биморфного пьезоэлектрического

преобразователя, состоящая из двух слоев ЦТС с противоположными направлениями поляризации и метгласа.

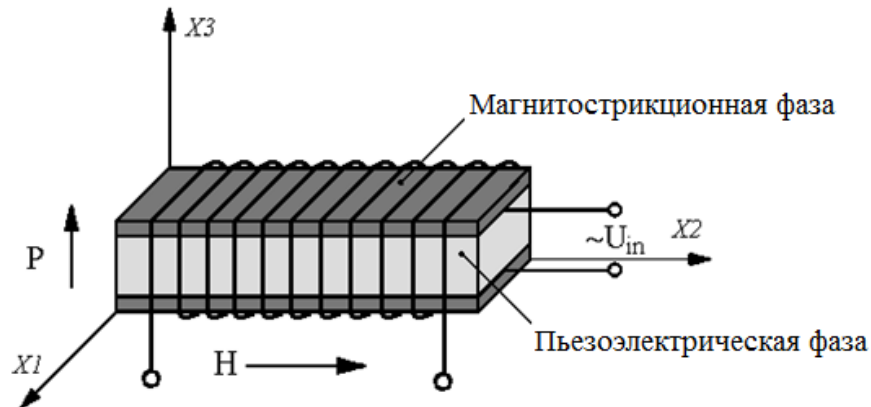


Рисунок 4.1 – Схематическое представление управляемого индуктивного элемента на основе пьезоэлемента с деформаций растяжения-сжатия

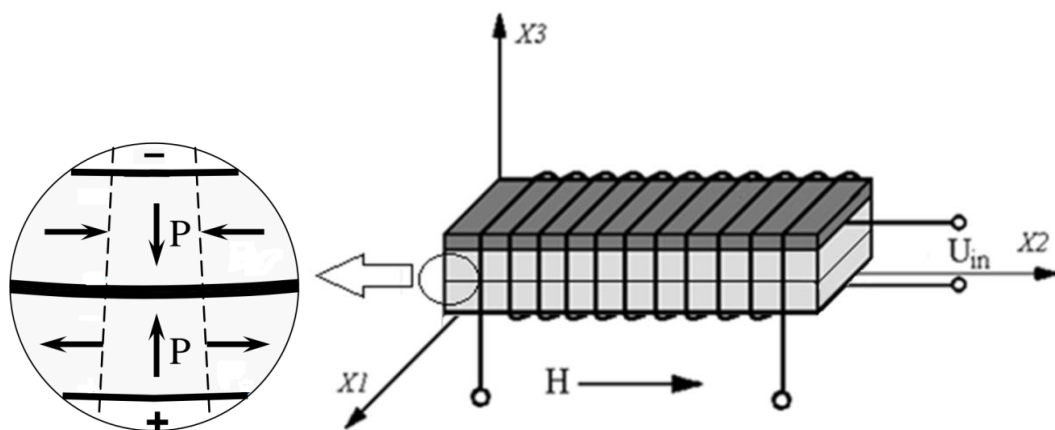


Рисунок 4.2 – Схематическое представление управляемого индуктивного элемента на основе биморфного пьезоэлемента с деформаций изгиба

Будем считать, что сердечник имеет симметричную и протяженную структуру, при которой длина сердечника много больше, чем ширина и толщина. Пусть слои композита расположены в плоскости ($X1$, $X2$), а направление $X3$ – перпендикуляр к плоскости образца. Направление поляризации образца совпадает с осью $X3$. Прикладываемое электрическое поле также параллельно оси $X3$. В данном случае происходит поперечный МЭ эффект.

Подача постоянного электрического напряжения на электроды приводит к тому, что пьезоэлектрическая пластина под действием поля E поляризуется и деформируется. Деформация пьезоэлектрика PS в виде механических напряжений передается в магнитострикционную фазу. В магнитострикционной фазе при возникновении механических напряжений mT , изменяется магнитная проницаемость μ , следовательно, и магнитное сопротивление сердечника R_M , а также индуктивность катушки L . Формула преобразований имеет вид

$$U \rightarrow E \rightarrow P \rightarrow ^PS \rightarrow ^mT \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow L \quad (4.1)$$

В случае одного свободного пьезоэлектрического элемента, деформации растяжения – сжатия не ограничены в любом направлении. Тем не менее, если два элемента соединены вдоль одной поверхности, когда один слой при приложении внешнего электрического поля растягивается, а другой сжимается, продольные перемещения вдоль этой поверхности будут ограничены. Вследствие этого возникнут осевые силы и моменты на поверхности раздела, которые приведут к изгибу биморфной структуры.

Механические напряжения в магнитострикционном материале приводят к изменению магнитного состояния вещества (Эффект Виллари или магнитоупругий эффект).

При воздействии на кристаллы ферромагнетика механических усилий на кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая анизотропия, вызванная дополнительным магнитным взаимодействием атомов вследствие искажения атомной решетки кристалла. Если на намагниченный образец ферромагнитного тела воздействовать внешней механической силой, то тело деформируется, домены изменяют свою ориентацию и индукция в материале изменяется. Явление имеет упругий характер. Если силу снять, то индукция примет прежнее значение.

Энергия магнитоупругой анизотропии зависит от вектора намагниченности насыщения в кристалле и создает дополнительные выгодные энергетические направления областей в решетке. Упругие напряжения, действующие на ферромагнетик, приводят к изменению ориентации магнитных моментов доменов в решетке (без изменения абсолютного значения вектора намагниченности насыщения). Это приводит к изменению намагниченности ферромагнетика. Магнитоупругая энергия непосредственно связана с магнитострикцией. [22, 23]

Устойчивые направления областей в ферромагнетике определяются минимальным значением магнитной энергии кристалла, включающей в себя три составляющие: 1) энергию магнитной анизотропии; 2) магнитоупругую энергию; 3) энергию внешнего магнитного поля. Поэтому при оценке общего энергетического состояния вещества необходимо учитывать магнитоупругую энергию. [100]

$$W_{MV} = -\frac{3}{2} \lambda_s^m T_1 \cos^2 \varphi \quad (4.2)$$

где $^m T_1$ – механическое напряжение в магнитострикционной фазе,

φ – угол между вектором механического напряжения и вектором намагниченности,

λ_s – константа магнитострикции насыщения,

$$W_{My} = -\frac{3}{2} \lambda_s^m T_1 \frac{M_x^2}{M_s^2} \quad (4.3)$$

где M_s – намагниченность насыщения метгласа.

Магнитное поле анизотропии в полосках метгласа как обратный магнитоупругий эффект может быть выражено следующим образом:

$$H_{MV} = -\frac{\partial W_{MV}}{\partial M_x} = \frac{3}{2} \lambda_s \frac{2M_x^m T_1}{\mu_0 M_s^2} \approx \frac{3\lambda_s^m T_1}{\mu_0 M_s} (M_x \approx M_s) \quad (4.4)$$

Магнитная индукция в ферромагнетиках вычисляется по следующей формуле:

$$B = \mu_0 (H_{eff} + M_s) \quad (4.5)$$

Записав магнитную индукцию через эффективную магнитную проницаемость метгласа как $B = \mu_0 \mu_{eff} H$ получим следующее:

$$\mu_{eff} = \frac{M_s}{H_{eff}} + 1 \quad (4.6)$$

Эффективное магнитное поле можно представить как сумму внешнего магнитного поля $H_{вн}$, которое появляется вследствие протекания тока в обмотке и зависит от параметров катушки, и магнитного поля анизотропии H_{MV} , возникающего вследствие магнитоупругого эффекта

$$H_{eff} = H_{вн} + H_{MV} = \frac{NI}{l} + \frac{3\lambda_s^m T_1}{\mu_0 M_s} \quad (4.7)$$

где $H_{вн}$ – магнитное поле катушки,

H_{ME} – магнитное поле анизотропии, возникающее в магнитоэлектрическом сердечнике при управлении электрическим полем,

μ_0 – магнитная постоянная,

I – ток в катушке,

N – число витков катушки,

l – длина катушки,

Эффективная магнитная проницаемость на низкой частоте может быть вычислена по следующей формуле

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 M_s}{\frac{3\lambda_s^m T_1}{\mu_0 M_s} + \frac{IN}{l}} + 1 \quad (4.8)$$

Индуктивность на низкой частоте (с учетом того, что катушка имеет прямоугольное поперечное сечение, и величиной зазора между намоткой и сердечником можно пренебречь) вычисляется по следующей формуле

$$L = \frac{(\mu_{eff} t_m + t_p) \mu_0 d N^2}{l} \quad (4.9)$$

где t_m – толщина магнитострикционной фазы,

t_p – толщина пьезоэлектрической фазы,

d – ширина сердечника.

Относительная перестройка индуктивности равна

$$\delta L = \frac{\Delta L}{L_{\max}} = \frac{L_{\text{нач.}} - L_U}{L_{\text{нач.}}} \quad (4.10)$$

где $L_{\text{нач.}}$ – значение индуктивности при $U = 0$,

L_U – значение индуктивности при управлении электрическим полем.

В данном случае в соответствии с формулой (4.10), диапазон перестройки индуктивности запишем следующим образом

$$\delta L = \frac{t_m (\mu_{U=0} - \mu_{eff})}{t_m \mu_{U=0} + t_p} \cdot 100\% \quad (4.11)$$

где $\mu_{U=0}$ – величина магнитной проницаемости метгласа при $U=0$.

Будем считать, что поверхности пластинки свободные. В этом случае нормальные составляющие тензора напряжений на них равны нулю, т. е. ${}^m T_1 = {}^m T_2 = {}^m T_3 = 0$ на поверхностях пластинки. Так как пластинка тонкая и узкая,

то можно считать, что ${}^mT_2 = {}^mT_3 = 0$ не только на поверхности, но и во всем объеме пластинки, и отличной от нуля компонентой тензора напряжений в объеме пластинки будет только mT_1 .

В соответствии с уравнениями для компонент тензора деформаций S_i согласно обобщенному закону Гука и индукции магнитного поля B_i

$${}^mS_1 = {}^m s_{11} {}^mT_1 + {}^m q_{11} {}^mH_1, \quad (4.12)$$

$${}^pS_1 = {}^p s_{11} {}^pT_1 + {}^p d_{31} {}^pE_3;$$

$${}^mB_1 = \mu_{11} H_1 + q_{11} {}^mT_1 \quad (4.13)$$

где ${}^m, {}^pS_1$ — компоненты тензора деформации для пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз, соответственно,

${}^m, {}^p s_{11}$ — коэффициенты податливости для пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз, соответственно,

μ_{11} — компонента тензора магнитной проницаемости,

d_{31}, q_{11} — пьезоэлектрический и пьезомагнитный коэффициенты,

E_3 — электрическое поле, подаваемое на обкладки образца,

H_1 — напряженность магнитного поля,

mB_1 — компонента вектора магнитной индукции.

А также с граничными условиями на концах образца при $x = 0$ и $x = L$:

$${}^pT_1 \cdot {}^p t + {}^mT_1 \cdot {}^m t = 0, \quad (4.14)$$

$${}^pS_1 = {}^mS_1$$

Выражение для механических напряжений в магнитострикционной фазе в случае возникновения деформаций растяжения-сжатия в сердечнике устройства имеет вид

$${}^mT_1 = \frac{d_{31}U - q_{11}H_1 {}^p t}{{}^p S_{11} {}^m t + {}^m S_{11} {}^p t}, \quad (4.15)$$

Выражение для механических напряжений в магнитострикционной фазе в случае возникновения деформаций изгиба в структуре на основе биморфного пьезопреобразователя запишется следующем образом

$${}^mT_1 = \frac{1}{{}^m S_{11}} \left({}^m S_{10} + \frac{{}^m t}{R} - {}^m q_{11} H_1 \right) \quad (4.16)$$

$$\text{где } {}^m S_{10} = \frac{S_1}{t} \left[{}^m Y \int_{-{}^m t/2}^{m t/2} {}^m q_{11} {}^m H_1 dz_m + {}^p Y \int_{-{}^p t/2}^0 \left(-{}^p d_{31} {}^p E_3 + \frac{h_m {}^p t}{R} \right) dz_p + {}^p Y \int_0^{p t/2} \left({}^p d_{31} {}^p E_3 + \frac{h_m {}^p t}{R} \right) dz_p \right] -$$

продольные деформации нейтральной оси магнитострикционного слоя,

R – радиус кривизны нейтральной оси структуры,

$h_m = (t_p + t_m)/2$ – средняя толщина магнитной и пьезоэлектрической компонент, соответственно,

$s_1 = t {}^m t {}^m Y + {}^p t {}^p Y$, $t = {}^m t + {}^p t$, ${}^m Y$, ${}^p Y$ – модули упругости пьезомагнитной и пьезоэлектрической компонент, соответственно,

z_m – расстояние от i -го слоя структуры до нейтрального слоя.

R находится из условия равновесия, согласно которому сумма моментов осевых сил каждого слоя уравнивается результирующими изгибными моментами, возникающими в пьезоэлектрическом и магнитострикционном слоях в расчете на единицу ширины слоя.

Далее запишем выражение для коэффициента МЭ восприимчивости α_B , который определяется как отношение индуцируемой магнитной индукции за счет МЭ эффекта dB к управляющему напряжению dU

$$\alpha_B = \frac{dB}{dU} = \frac{q_{11} {}^m T_1}{E_3 t_p}, \quad (4.17)$$

В случае возникновения МЭ эффекта при деформациях растяжения-сжатия в симметричной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре коэффициент МЭ восприимчивости имеет вид

$$\alpha_B = \frac{d_{31}q_{11}}{{}^p s_{11}^m t + {}^m s_{11}^p t}, \quad (4.18)$$

В случае возникновения МЭ эффекта при деформациях изгиба в магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя выражение для коэффициента МЭ восприимчивости примет более сложный вид

$$\alpha_B = \frac{3d_{31}q_{11}t_p(t_p h_1^m s_{11} + t_m g / 2)}{12 {}^p s_{11}^m s_{11}^m t_p h_1 + t_m^3 g {}^p s_{11} + t_p^3 g {}^m s_{11}}, \quad (4.19)$$

где $g = {}^p s_{11}^m t + {}^m s_{11}^p t$

На рис. 4.3, 4.4 представлены графики зависимости индуктивности L и ее перестройки $\Delta L/L_{нач.}$ от напряжения U в диапазоне от 0 до 25 В, приложенного на электроды пьезоэлектрической пластины для образцов 1) на основе симметричной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры метглас-ЦТС-метглас с деформациями растяжения-сжатия, 2) на основе асимметричной структуры метглас-ЦТС с деформациями изгиба, 3) на основе асимметричной структуры метглас-биморфный преобразователь на основе ЦТС с деформациями изгиба. Результаты представлены для ЦТС толщиной 0,2 мм и метгласа толщиной 40 мкм.

При приложении напряжения на электроды пьезоэлектрической пластины наблюдается снижение индуктивности. Так, начальная величина индуктивности (без внешнего электрического поля) равна 1,27 мГн, а при подаче напряжения 25 В, индуктивность снижается приблизительно до 0,83 мГн, 0,55 мГн, 0,29 мГн для образцов на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя, на основе структуры метглас-ЦТС-метглас и

структуры метглас-ЦТС, соответственно. Снижение индуктивности с увеличением подаваемого напряжения продолжается до тех пор, пока метглас не достигнет насыщения, при котором эффективная магнитная проницаемость становится равной 1, а индуктивность становится равной индуктивности катушки без сердечника (в данном случае 0,012 мГн). Ясно, что для образца на основе биморфной пьезоэлектрической структуры диапазон перестройки индуктивности будет выше, чем для остальных структур при том же значении управляющего напряжения.

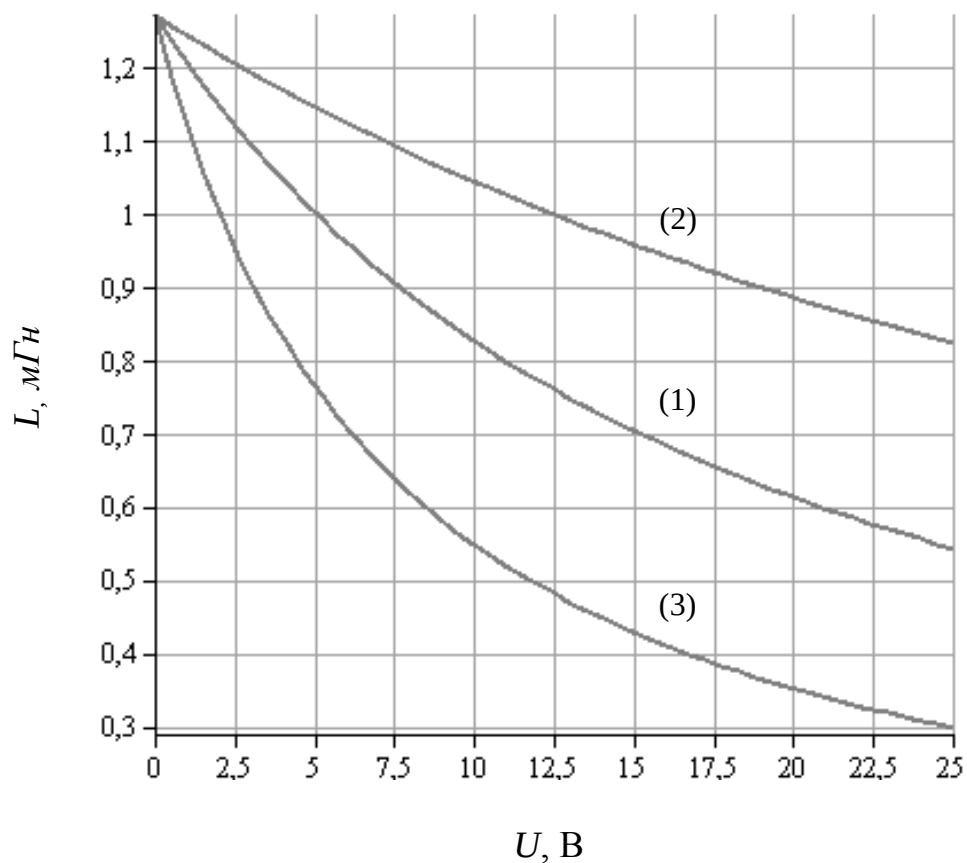


Рисунок 4.3 – Зависимость индуктивности от прикладываемого напряжения для образцов на основе симметричной структуры метглас-ЦТС-метглас (1), а также для асимметричных структур метглас-ЦТС (2) и метглас-биморфный преобразователь на основе ЦТС (3).

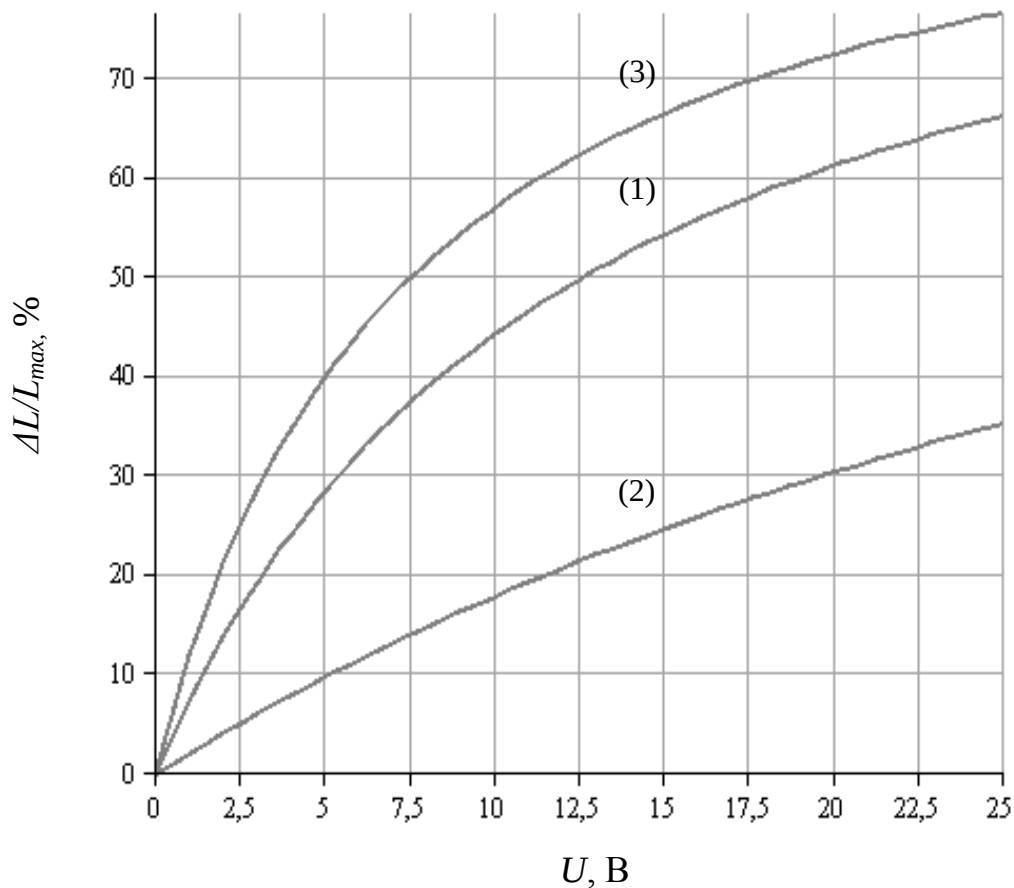


Рисунок 4.4 – Зависимость перестройки индуктивности от прикладываемого напряжения для образцов на основе структуры метглас-ЦТС-метглас (1), а также для асимметричных структур метглас-ЦТС (2) и метглас-биморфный слой на основе ЦТС (3).

На рис. 4.5 приведен график зависимости перестройки индуктивности от толщины ЦТС при различных толщинах метгласа для индуктивного элемента на основе биморфной пьезоэлектрической структуры.

Согласно графику, величина перестройки индуктивности с увеличением толщины ЦТС сначала возрастает до определенного максимума, после чего медленно идет на спад. Причем чем тоньше толщина метгласа, тем выше этот максимум и соответствует более тонкому слою ЦТС. На рисунке видно, что перестройка индуктивности максимальна при толщине ЦТС равной приблизительно 0,02 мм и толщине метгласа 20 мкм. Например, при толщине ЦТС 0,2 мм, значения перестройки индуктивности равны 82 %, 70 % и 58 % для метгласа толщиной 20 мкм, 60 мкм и 120 мкм,

соответственно. Из этого следует, что при неизменной толщине пьезоэлектрического слоя и геометрических параметров катушки, индуктивность будет сильнее перестраиваться при относительно тонком слое метгласа.

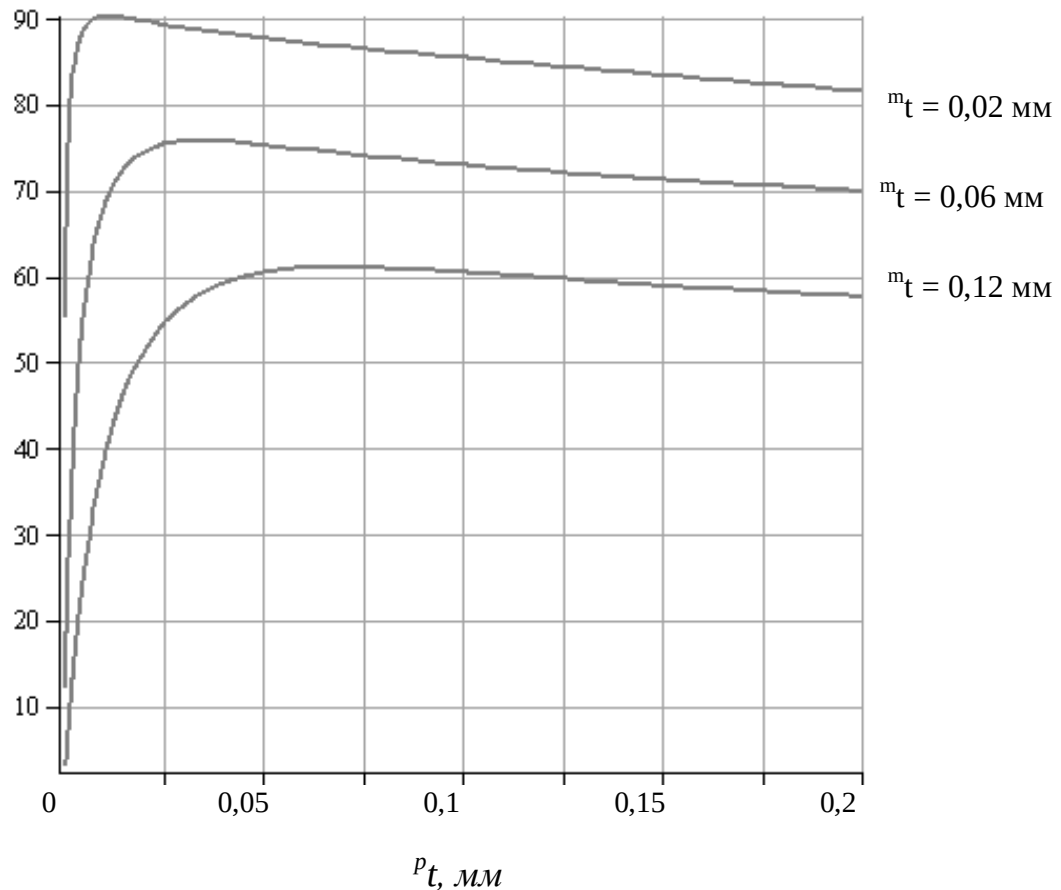


Рисунок 4.5 – Зависимость перестройки индуктивности от толщины ЦТС при различных толщинах метгласа для индуктивного элемента на основе биморфной пьезоэлектрической структуры.

При неизменной толщине пьезоэлектрического слоя начальное значение индуктивности сильно зависит от толщины магнитострикционной фазы. При этом, очевидно, что начальное значение индуктивности будет расти с увеличением толщины метгласа.

На рис. 4.6 представлена зависимость коэффициента МЭ восприимчивости от толщины ЦТС. Здесь также наблюдаются максимумы МЭ восприимчивости при определенных толщинах пьезоэлектрической и магнитной фаз, чем тоньше толщина метгласа, тем выше этот максимум, при этом он соответствует более тонкому слою ЦТС.

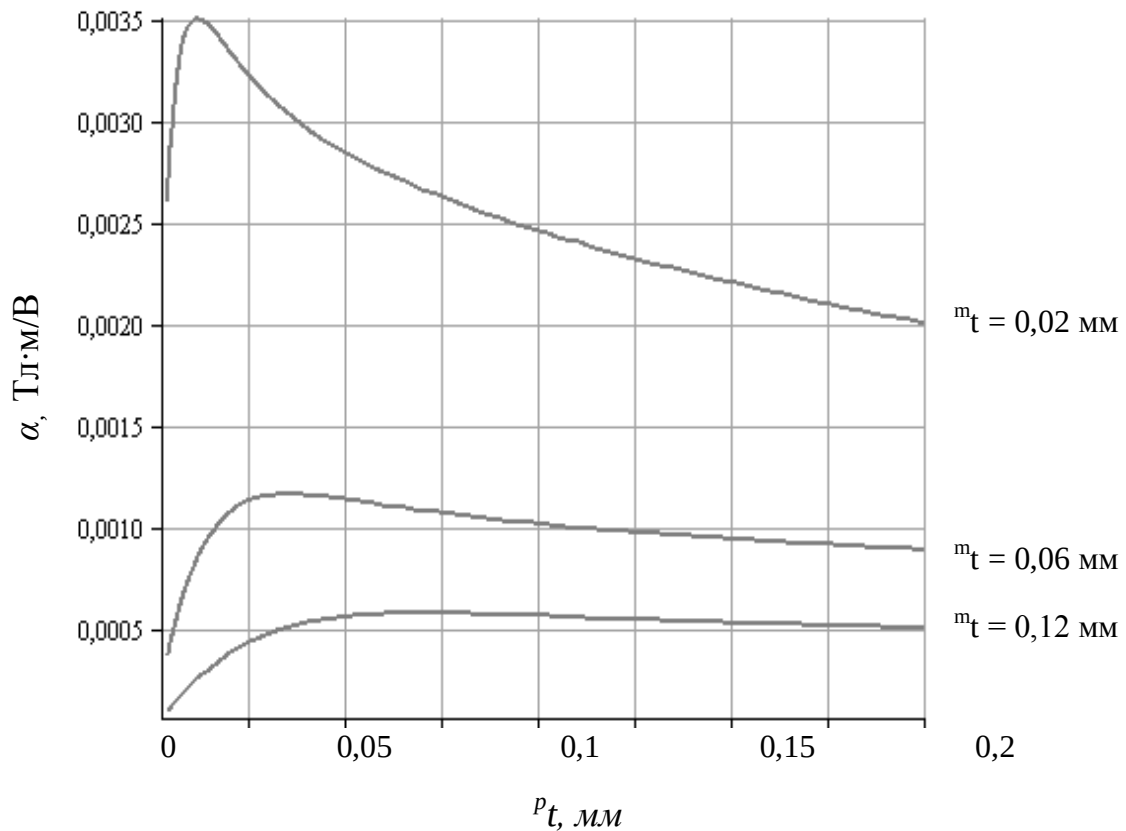


Рисунок 4.6 – Зависимость МЭ восприимчивости от толщины ЦТС при различных толщинах метгласа для индуктивного элемента на основе биморфной пьезоэлектрической структуры.

При построении графиков использовались следующие значения: $q_{11} = 11000 \cdot 10^{-12} \text{ м/А}$; $d_{31} = -175 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$; $N = 3000$; $p_{s_{11}} = 15,3 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$; $m_{s_{11}} = 10 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$; $l = 0,01 \text{ м}$; $\mu = 290000$, $\lambda_s = 35 \cdot 10^{-6}$, $Y = 100 \text{ ГПа}$, $4\pi M_s = 18 \text{ кГс}$, $d = 175 \text{ пКл/Н}$, $\rho = 123 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$.

4.2 Сравнение теоретических и экспериментальных данных

4.2.1 Подготовка образцов

Технология изготовления управляемого индуктивного элемента на основе МЭ эффекта состоит из следующих этапов:

1. Изготовление слоистой магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры, представляющей собой сердечник данного устройства.

Для изготовления сердечника используются пьезоэлектрические поляризованные пластины стандартной толщины и длины и ленты магнитного аморфного сплава метгласа АМАГ 170, вырезаемые по размеру пьезокерамики. Важнейшим этапом изготовления сердечника является обеспечение надлежащей механической связи между слоями, которая, как известно, напрямую влияет на величину МЭ взаимодействия. По сравнению с эпоксидным компаундом и клеем БФ-19 наилучшим образом показал себя однокомпонентный гелеобразный клей на основе цианакрилата «Супер Момент Идеал», который обеспечивает, с одной стороны, плотное прилегание слоев и надежное механическое сцепление, с другой стороны, не дает эффекта зажатия образца. Перед клеейкой слои в обязательном порядке предварительно обезжиривались в растворителе, затем после нанесения клея обеспечивалось прижимное усилие, контролирующее толщину клеевого шва.

2. Изготовление и присоединение электродов к сердечнику.

Присоединение электродов к пьезоэлектрическому слою осуществлялось при помощи пайки. Т. к. пьезоэлектрические пластины металлизированы серебром, для более качественного соединения использовался активный флюс на основе паяльной кислоты.

3. Изготовление катушки.

Т. к. по предварительным оценкам начальная величина индуктивности не влияет на ее относительную перестройку, в ходе эксперимента использовалась катушка с однослойной намоткой, ввиду того, что они

обладают достаточно высокими характеристиками, надежны в эксплуатации, отличаются простотой и технологичностью конструкции. Многослойные катушки рядовой намотки по своим качествам значительно хуже однослойных, так как они обладают сравнительно большой величиной собственной емкости. Каркасы катушек имели прямоугольное сечение в соответствии с размерами сердечника. Толщина стенок каркаса составляла не более 0,5 мм, т. к. для наиболее плотного распределения линий магнитной индукции в метгласе следует, чтобы сечение катушки имело минимальный воздушный зазор.

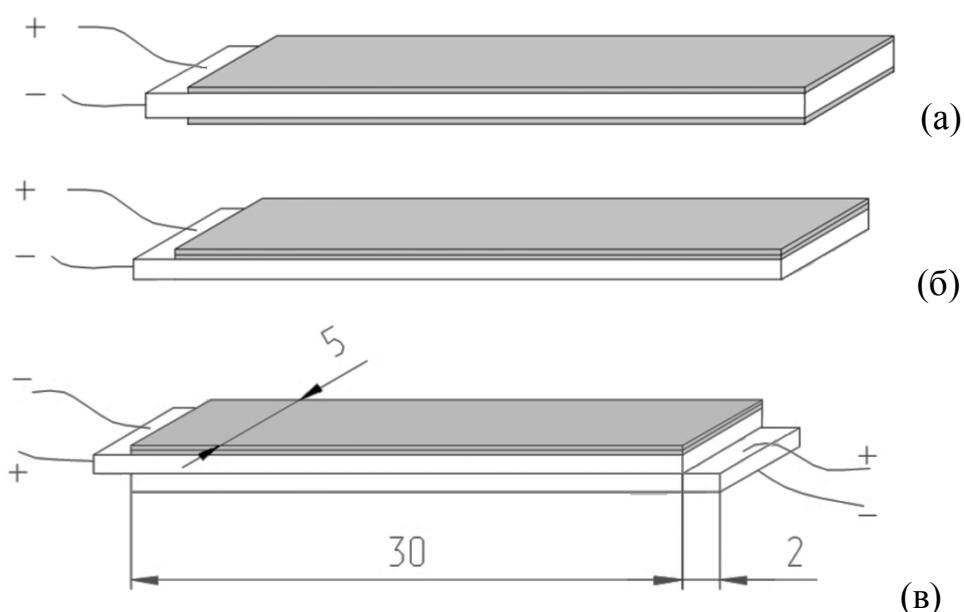


Рисунок 4.7 – Схематическое изображение сердечника устройства (а) на основе структуры метглас-ЦТС-метглас, (б) на основе структуры метглас-ЦТС и (б) на основе пьезоэлектрического биморфного преобразователя.

В ходе теоретического и экспериментального исследования найдена оптимальная ширина индуктивного элемента с точки зрения эффективного распределения магнитного поля в сердечнике. При ширине образца 5 мм краевые эффекты меньше влияют на искажение картины магнитного поля, чем при ширине 1 мм. Следует также отметить, что домены в

ферромагнетике ориентируются в направлении длины образца, поэтому длина образца выбирается в несколько раз больше ширины. В данном случае намагниченность достигает больших значений.

Также в ходе эксперимента выявлено, что на высокой частоте происходит снижение индуктивности, которое объясняется сильным размагничивающим действием вихревых токов в полосках метгласа, ослабляющим их эффективную магнитную проницаемость на высоких частотах. Т. е. значение индуктивности с ростом величины внешнего электрического поля на низких частотах заметно уменьшается, а на высоких частотах индуктивность практически не перестраивается. Поэтому экспериментальные исследования проводились на частоте 1 кГц.

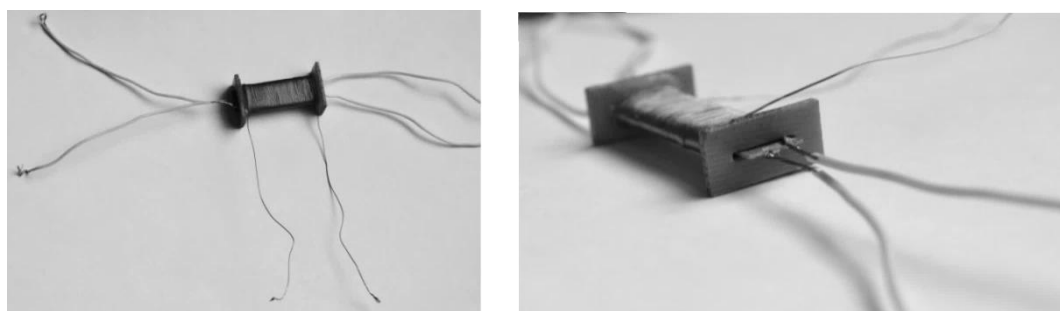


Рисунок 4.8 – Внешний вид устройства (ширина образца 5 мм).

4.2.2 Описание измерительного стенда

Для подачи постоянного напряжения на электроды пьезоэлектрической пластины использовался источник постоянного напряжения Laboratory DC Power Supply GPR-50H15D .

Значения индуктивности снимались с помощью измерительного моста Programmable LCR bridge HM-118.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 4.9.

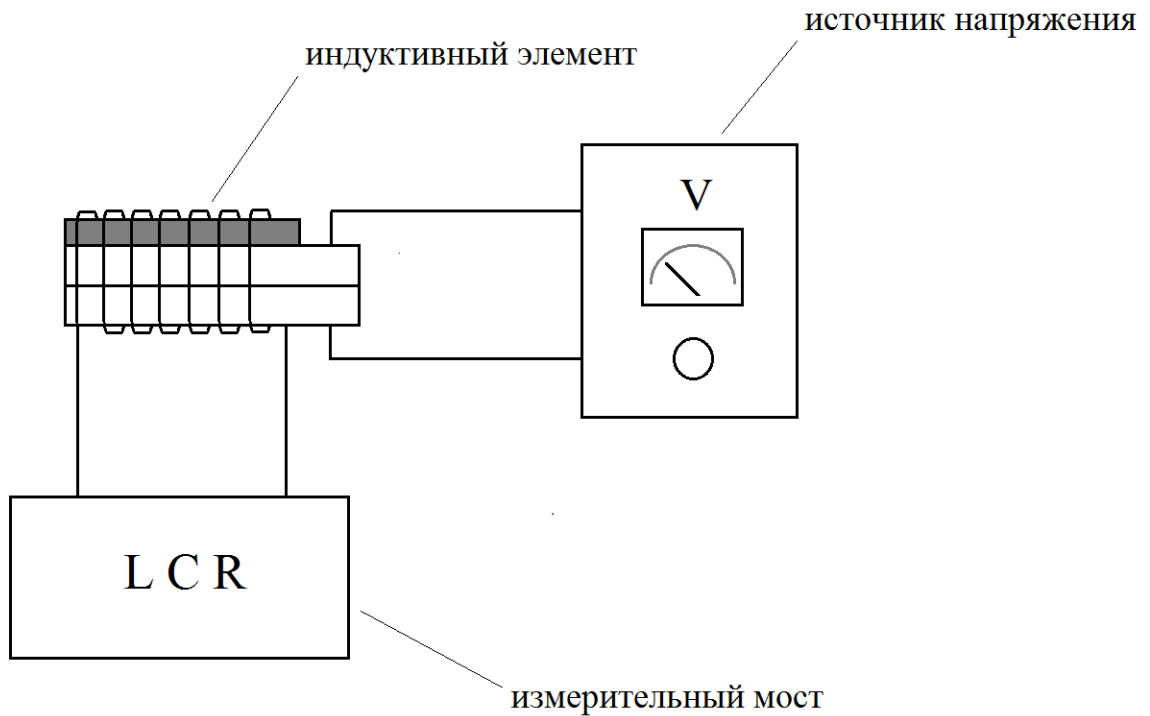


Рисунок 4.9 – Экспериментальная установка

4.2.3 Обработка результатов измерений

На данном этапе представлены результаты измерения индуктивности и ее перестройки при различных значениях подаваемого напряжения для образцов с толщиной пьезоэлектрического слоя 1 мм при толщинах магнитострикционного слоя 40 мкм (что соответствует 2 слоям метгласа) для образцов на основе структуры метглас-ЦТС-метглас, а также для образцов на основе структур метглас-ЦТС и метглас-биморфный ЦТС.

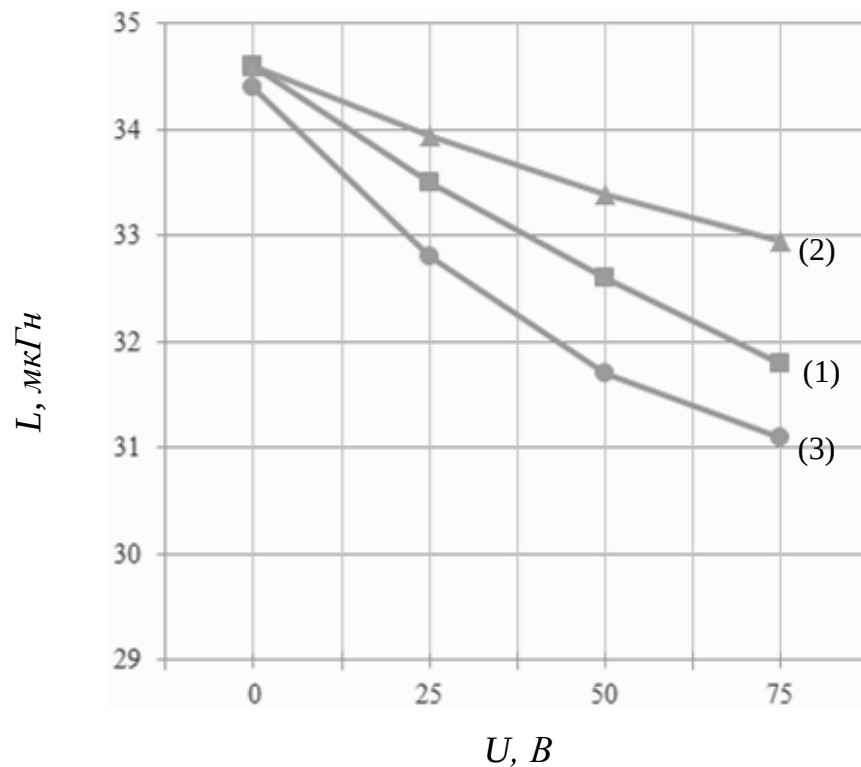


Рисунок 4.10 – Экспериментальная зависимость величины индуктивности от прикладываемого напряжения для образцов на основе структуры метглас-ЦТС-метглас (1), а также для асимметричных структур метглас-ЦТС (2) и метглас-биморфный ЦТС (3)

В соответствии с графиком (рис. 4.10), без воздействия электрического поля, значение индуктивности составляло приблизительно 34,5 мкГн для каждого из трех образцов. При подаче напряжения на электроды пьезоэлектрической пластины 75 В величина индуктивности снижалась до 31 мкГн, 31,8 мкГн, 32,95 мкГн для образцов на основе структуры метглас-биморфный ЦТС, метглас-ЦТС-метглас и метглас-ЦТС, соответственно.

Согласно приведенным графикам (рис. 4.10, 4.11) наиболее эффективным является образец на основе биморфной пьезоэлектрической структуры, что подтверждает результаты теоретического исследования.

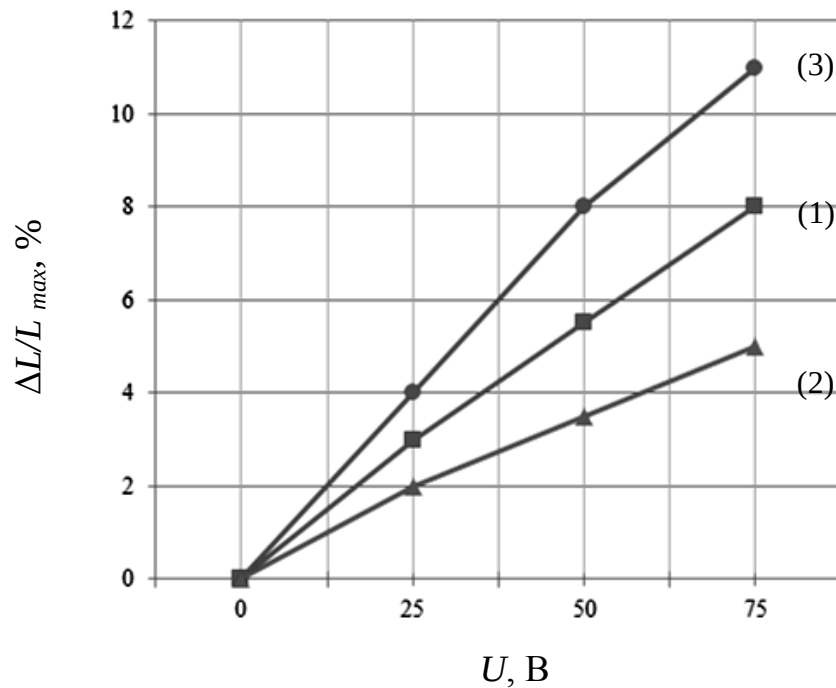


Рисунок 4. 11 – Экспериментальная зависимость перестройки индуктивности от прикладываемого напряжения для образцов на основе структуры метглас-ЦТС-метглас (1), метглас-ЦТС (2) и метглас-биморфный ЦТС (3).

Ниже представлены результаты измерения перестройки индуктивности при подаче напряжения на электроды 75 В для образца на основе биморфной пьезоэлектрической структуры в зависимости от количества слоев метгласа.

Согласно приведенному графику (рис. 4.12) наиболее эффективным является образец на основе биморфной пьезоэлектрической структуры с толщиной магнитострикционной фазы 20 мкм (что соответствует 1 слою метгласа). Данные опыта подтверждают результаты теоретического исследования. Но, важно отметить, что на перестройку индуктивности сильно влияет наличие клеевого соединения между слоями, а, следовательно, при увеличении количества слоев метгласа, сильно ухудшается МЭ связь в целом. Таким образом, достоверность данного исследования не может полностью подтверждать данные теоретического моделирования. Также важно подчеркнуть, что измеренные значения относительной перестройки индуктивности оказались значительно меньше теоретических значений, что также объясняется слабой межслоевой связью.

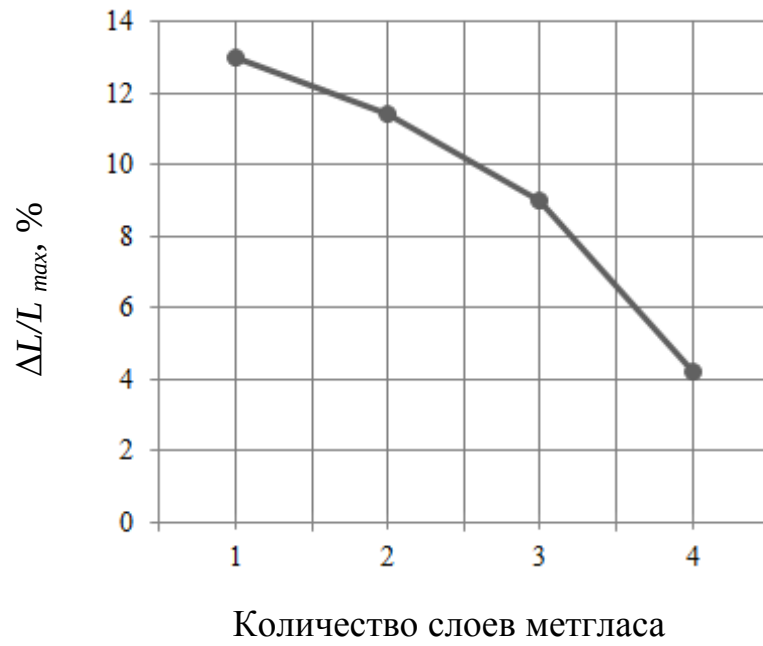


Рисунок 4.12 – Экспериментальная зависимость перестройки индуктивности от количества слоев метгласа для образца на основе биморфной пьезоэлектрической структуры при подаче напряжения 75 В.

4.3 Выводы

В данной главе рассмотрены возможные применения слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов на основе неоднородных компонентов в известных устройствах на основе МЭ эффекта.

Рассматриваемые в данной работе материалы могут существенно упростить конструкцию устройств на основе МЭ эффекта, таких как: датчики переменного электромагнитного поля и постоянного магнитных поля, датчики мощности, СВЧ-устройства с электрическим управлением: модуляторы, переключатели, фильтры, фазовращатели и невзаимные устройства (вентили, циркуляторы, аттенюаторы), многофункциональные компоненты, индуктивный элемент на основе МЭ эффекта.

Представлен ряд работ, посвященных исследованию и разработке устройств и приборов на основе МЭ эффекта. Подробно описан принцип действия управляемого индуктивного элемента на основе МЭ эффекта, даны рекомендации по его использованию в современной электронной аппаратуре, проведен сравнительный анализ известных аналогов.

Разработана теоретическая модель, позволяющая определять основные параметры индуктивного элемента, такие как: индуктивность и ее относительная перестройка, коэффициент МЭ восприимчивости, эффективная магнитная проницаемость. Получены выражения основных параметров индуктивного элемента на основе симметричной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры с деформацией растяжения-сжатия, а также для индуктивного элемента на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя, работающего на изгиб.

Приведены численные оценки индуктивности и ее перестройки от управляющего напряжения и их сравнение для индуктивного элемента на основе симметричной структуры метглас-ЦТС-метглас, а также для ассиметричных структур с деформацией изгиба: метглас-биморфная структура на основе ЦТС и метглас-ЦТС. Так, при приложении напряжения

на электроды пьезоэлектрической пластины наблюдается снижение индуктивности. Обнаружено, что для образца на основе биморфной пьезоэлектрической структуры диапазон перестройки индуктивности будет выше, чем для остальных структур при том же значении управляющего напряжения.

Для индуктивного элемента на основе биморфной пьезоэлектрической структуры приведены численные оценки перестройки индуктивности и МЭ восприимчивости от толщины ЦТС при различных толщинах метгласа. Согласно приведенным графикам, зависимость в обоих случаях имеет вид кривой, возрастающей до определенного максимума, после чего медленно идущей на снижение. Причем, чем тоньше толщина метгласа, тем выше этот максимум. При этом он соответствует более тонкому слою ЦТС. Из этого можно сделать вывод, что при неизменных геометрических параметрах катушки и толщине пьезоэлектрического слоя индуктивность будет сильнее перестраиваться при относительно тонком слое метгласа.

Для подтверждения теоретических исследований, были изготовлены опытные образцы индуктивных элементов на основе МЭ эффекта и проведены измерения значений индуктивности при приложении управляющего напряжения. Представлены результаты измерения индуктивности и ее перестройки при различных значениях подаваемого напряжения для образцов с толщиной пьезоэлектрического слоя 1 мм при толщинах магнитострикционного слоя 40 мкм (что соответствует 2 слоям метгласа) для образцов на основе структуры метглас-ЦТС-метглас, а также структур метглас-ЦТС и метглас-биморфная структура на основе ЦТС.

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что наиболее эффективным является образец на основе биморфной пьезоэлектрической структуры. Также выявлено, что в образце на основе пьезоэлектрической биморфной структуры с толщиной магнитострикционной фазы 20 мкм значение перестройки индуктивности выше, чем в образцах с большей толщиной метгласа. В целом эксперимент

успешно согласуется с теорией, но следует отметить, что реальные значения относительной перестройки индуктивности существенно ниже расчетных. Несовпадение объясняется тем, что технология изготовления образцов не имеет должной технологической проработки и оснастки по части обеспечения надежной механической связи слоев метгаса и пьезокерамики. Сам же характер теоретической зависимости индуктивности и ее относительной перестройки находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложено использование композиционных магнитострикционно-пьезоэлектрических структур с неоднородными компонентами в качестве наиболее перспективных материалов для устройств на основе МЭ эффекта. В процессе исследования были изучены свойства магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов на основе неоднородных компонентов и механизм возникновения в них МЭ взаимодействия. Проведен литературный обзор, включающий в себя обобщение результатов предыдущих исследований по данной тематике.

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Построена теоретическая модель низкочастотного МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных компонентов со ступенчатым изменением свойств по толщине. Показано, что замена исходных однородных магнитострикционных (пьезоэлектрических) слоев на два слоя с разными знаками пьезокоэффициентов приводит к росту величины МЭ эффекта на низких частотах, что обусловлено изменением вклада изгибных деформаций при неизменных аксиальных деформациях и связано с дополнительными изгибающими моментами. МЭ коэффициент по напряжению слоистой структуры ЦТС-никель-пермендюр на 75 и 40 % превышает МЭ коэффициент в структурах никель-ЦТС и пермендюр-ЦТС, соответственно. Использование пьезоэлектрического биморфного преобразователя ЦТС вместо однородного пьезоэлектрического слоя в структурах никель-ЦТС и пермендюр-ЦТС позволяет на 60 % увеличить МЭ коэффициент по напряжению.

2. Построена теоретическая модель МЭ эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах на основе неоднородных компонентов со ступенчатым изменением свойств по толщине

при возникновении в структуре электромеханического резонанса. Показано, что замена исходных однородных магнитострикционных (пьезоэлектрических) слоев на два слоя с разными знаками пьезокоэффициентов приводит к дополнительному росту МЭ эффекта, что объясняется изменением изгибных деформаций в пренебрежении аксиальными деформациями, обусловленным возникновением дополнительных изгибающих моментов в структуре. В структуре ЦТС-ЦТС-пермендюр использование пьезоэлектрических слоев с противоположными направлениями поляризации позволяет увеличить МЭ эффект на 10 %. Для структуры ЦТС-пермендюр-никель максимальное значение МЭ коэффициента на 30 % больше по сравнению со структурой ЦТС-пермендюр.

3. Даны рекомендации по практическому применению слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов с неоднородными компонентами. В качестве примера рассмотрено использование слоистой структуры на основе биморфного пьезоэлектрического преобразователя в управляемом индуктивном элементе.

4. Построена теоретическая модель, учитывающая влияние МЭ эффекта на параметры управляемого индуктивного элемента. Приведены численные оценки индуктивности и ее перестройки как функций управляющего напряжения и их сравнение для индуктивного элемента на основе симметричной и асимметричных слоистых структур. Показано, что использование биморфной пьезоэлектрической структуры в составе индуктивного элемента позволяет достичь наибольшего диапазона перестройки индуктивности.

5. Результаты теоретических исследований МЭ эффекта в слоистых структурах на основе неоднородных компонентов, а также его применение в составе электрически управляемого индуктивного элемента, подтверждены экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред: М. Гостехиздат. – 1957. –532с.
2. Дзялошинский И.Б. К вопросу о магнитоэлектрическом эффекте в антиферромагнетиках // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 881-882.
3. Астров Д.Н. Магнитоэлектрический эффект в окиси хрома. ЖЭТФ // 1961. Т. 40. С. 1035-1041.
4. Folen V.J., Rado G.T., Stalder E.W. Anysotropy of the magnetoelectric effect in Cr₂O₃ // Phys. Rev. Lett. 1961. V.6. №11. P. 607-608.
5. Asher E. The interaction between magnetization and polarization: Phenomenological symmetry consideration. // J. Phys. Soc. J. 1969 V.28. P.7-16.
6. Santoro R.P. and Newnham R.E. Survy of Magnetoelectric Materials, Teahnnical Report AFML TR-66-327, Air Force Materials Lab., Ohio, 1966/
7. Yatom H. and Englman R. Theoretical Methods in Magnetoelectric Effect // Pphys. Rev. B, 1969, V. 188, с. 793-802.
8. Spaldin N. A., Fiebig M. The Renaissance of Magnetoelectric Multiferroics // Science, 2005.Vol. 309, Issue 5733. Pp. 391-392.
9. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Калгин А.В., Григорьев Е.С. Прямой магнитоэлектрический эффект в трехслойных композитах Fe_{0.45}Co_{0.45}Zr_{0.1}–PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O₃–Fe_{0.45}Co_{0.45}Zr_{0.1} // Физика твердого тела, 2015. Т. 57. Вып. 7. С. 1349-1353.
10. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 352 с.
11. Opechovski W. Magnetoelectric Symmetry // Proc. of Symposium on Magnetoelectric Interaction in Crystals, USA, 1973 /Ed Freeman A and Schmid A. Gordon and Breach Sci. Publ., N.-Y, 1975, p. 47-58.

12. O'Dell T.H. The electrodynamics of magnetoelectric media. Amsterdam: North-Holland Publ. Company, 1970. 304p.
13. Fuchs R. Wave Propagation in a Magnetoelectric Medium // *Phyl Mag.*, 1965, V. 11, p. 647-658.
14. Aubert G. A Novel Approach of the Magnetoelectric Effect in Antiferromagnets // *J. Appl. Phys.*, 1982, V. 53, p. 8125-8129.
15. Шавров В. Г. О магнитоэлектрическом эффекте // *ЖЭТФ*. 1965. Т. 48, N5. С. 1419 - 1426.
16. Карпенков Д.Ю., Богомолов А.А., Солнышкин А.В., Головнин В.А., Карпенков А.Ю., Пастушенков Ю.Г. Магнитоэлектрический эффект в толсто пленочных гетероструктурах из ЦТС и Ni-Zn-ферритов // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. № 11. С. 1396-1401.
17. Богомолов А.А., Солнышкин А.В., Карпенков Д.Ю., Карпенков А.Ю., Головнин В.А., Пастушенков А.Г. Магнитоэлектрический отклик в гетерогенных слоистых структурах цтс– никельцинковый феррит – терфенол // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика*. 2010. № 10. С. 13-24.
18. Карпенков Д.Ю., Карпенков А.Ю., Богомолов А.А., Солнышкин А.В., Головнин В.А., Пастушенков Ю.Г. Магнитоэлектрический эффект в многослойных гетероструктурах биморф ЦТС – никель-цинковый феррит // *Вестник ТвГУ*, 2011. Серия: Физика (13). pp. 4-12.
19. Asher E. and Janner A.G.M. Upper Bounds on the Magnetoelectric Susceptibility // *Phys. Lett.*, 1969, V. A29, p. 295-304.
20. Rado G.T. Observation and Possible Mechanisms of Magnetoelectric Effect in Ferromagnet // *Phys. Rev. Lett.*, 1964, V. 13, p. 335-337.
21. Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г., Нан С. В.. Магнитоэлектрические материалы. – М.: Академия Естествознания, 2006. – 296 с.
22. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 160 с., с ил.

23. Тикадзуми С., Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения/ Пер. с японского – Москва: Мир, 1987. – 419с.
24. Nefedov V.G. and Pape D.R.. Acousto-optic device manufacturing. In: Design and fabrication of acousto-optic devices / Edited by Akis P. Goutzoulis, D. Pape and S. Kulakov. Marsel Dekker, Inc. New Yourk, 1994. P. 339-402.
25. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 632 с.
26. Chen W. Q., Bian Z. G., and Ding H. J. 3D free vibration analysis of a functionally graded piezoelectric hollow cylinder filled with compressible fluid // International Journal of Solids and Structures, 2004, v. 41, p. 947–964.
27. Chen W. Q. and Ding H. J.. On free vibration of functionally graded piezoelectric rectangular plate// Acta Mech. 2002. V. 153, p. 207–216.
28. Chen, W. Q., Wang, L. Z. and Lu, Y. Free vibrations of functionally graded piezoceramic hollow spheres with radial polarization// Journal of Sound and Vibration, 2002. V. 251(1), p. 103-114.
29. Chen W. Q., Ding H. J., and Liang J. The exact elasto-electric field of a rotating piezoceramic spherical shell with a functionally graded property// International Journal of Solids and Structures, 2001. Vol. 38(38-39), p. 7015-7027.
30. Takagi K., Li J.-F., Yokoyama Sh., Watanabe R. Almajid A. and Taya M.. Design and fabrication of functionally graded PZT/ Pt piezoelectric bimorph actuator// Science and Technology of Advanced Materials. 2002. V. 3, p. 217-224.
31. Almajid A., Taya M., and Hudnut S. Analysis of out-of-plane displacement and stress field in a piezocomposite plate with functionally graded microstructure// Int. J. Solids Struct. 2001. V. 38, p. 3377-3391.

32. Mantese J. V., Schubring N. W., Micheli A. L., Hayes R. W., Srinivasan G., and Alpay S. P.. Magnetization-Graded Ferromagnets: The Magnetic Analogues of Semiconductor Junction Elements // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87, p. 082503.
33. Sudakar C., Mantese J. V., Micheli A. L., Naik R., Srinivasan G., Alpay S. P., and Lawes G.. Internal Magnetostatic Potentials of Magnetization-Graded Ferromagnetic Materials// *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90, p. 062502.
34. Petrov V. M. and Srinivasan G.. Enhancement of Magnetoelectric Coupling in Functionally Graded Ferroelectric and Ferromagnetic Bilayers// *Phys. Rev. B.* 2008. v. 78, p. 184421.
35. Sreenivasulu G., Mandal S. K., Bandekar S., Petrov V.M., and Srinivasan G. Low-frequency and resonance magnetoelectric effects in piezoelectric and functionally stepped ferromagnetic layered composites// *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84, p. 144426.
36. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Srinivasan G. Flexural deformation in a compositionally stepped ferrite and magnetoelectric effects in a composite with piezoelectrics // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. p. 192502.
37. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., and Srinivasan G. Magnetization-graded multiferroic composite and magnetoelectric effects at zero bias// *Physical Review B.* 2011. V. 84, Issue 1, p. 014432.
38. Mandal S. K., Sreenivasulu G., Bandekar S., Petrov V.M., and Srinivasan G. Functionally Graded Piezomagnetic and Piezoelectric Bilayers for Magnetic Field Sensors: Magnetoelectric Interactions at Low-Frequencies and at Bending Modes// *Advances and Applications in Electroceramics.* 2011. V. 226 doi: 10.1002/9781118144480.ch. 23.
39. Laletin U., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Garg T., Kulkarni A.R., Venkataramani N., and Srinivasan G. Hysteresis and remanence in magnetoelectric effects in functionally graded magnetostrictive-piezoelectric layered composites// *Phys. Rev. B.* 2012. v. 85, p. 104404.

40. Zhang C. L., Chen W. Q., and Zhang Ch.. Magnetolectric effects in functionally graded multiferroic bilayers// Journal of Applied Physics. 2013. V. 113, p. 084502.
41. Yang S-Ch., Park Ch-S., Cho K.-H., and Priya Sh. Self-biased magnetolectric response in three-phase laminates. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108, p. 093706
42. Petrov V.M., Srinivasan G. and Galkina T.A. Microwave Magnetolectric Effects in Bilayers of Single Crystal Ferrite and Functionally Graded Piezoelectric// J. Appl. Phys., 2008. V. 104, p. 113910.
43. Фетисов Л.Ю., Перов Н.С., Фетисов Ю.К. Резонансное магнитоэлектрическое взаимодействие в несимметричной биморфной структуре ферромагнетик – сегнетоэлектрик // ПЖТФ. 2011. Т. 37. В. 6. С. 1-7.
44. Fetisov L.Y., Perov N.S., Fetisov Y.K., Srinivasan G. and Petrov V.M. Resonance magnetolectric interactions in an asymmetric ferromagnetic-ferroelectric layered structures // J. Appl. Phys. – 2011. - V. 109. - № 053908. – P. 1-4.
45. Bichurin M. I., V.M. Petrov. Modeling of Magnetolectric Effects in Composites / Springer Series in Materials Science 201, 2014. 108 p.
46. Бичурин М. И., Петров В. М., Семенов Г. А. Магнитоэлектрический материал для компонентов радиоэлектронных приборов. Патент РФ 2363174
47. Smits J.G., Dalke S.I, and Cooney Th. I. The constituent equations of piezoelectric bimorphs// Sensors and Acntators A. 1991. V. 28 p. 41-61
48. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – 15-е издание. – М, 1976. – 607 с.
49. Эрдеди А.А., Медведев Ю.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика. Детали машин. М.: Высшая школа. 2003. 270 с.
50. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение. - М.: Мир, 1990. 584 с.

51. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле: Под ред. чл.-корр. АН СССР Григолюк Э.И. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
52. Harshe G., Dougherty J.P., Newnham R.E. Theoretical modeling of multilayer magnetoelectric composites // *Int. J. Appl. Electromag. Mater.* – 1993. – V. 4. – P. 145.
53. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V. 68. - № 054402.
54. Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г., Нан С.В. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. – Великий Новгород. 2005. – 226с.
55. Petrov V.M., Srinivasan G., Bichurin M.I., Galkina T.A., Theory of magnetoelectric effect for bending modes in magnetostrictive-piezoelectric bilayers. *Journal of Applied Physics* 105, 063911 (2009)
56. Filippov D. A, Srinivasan G. and Gupta A. Magnetoelectric effects in ferromagnetic films on ferroelectric substrates // *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2008. V. 20. P. 425206.
57. Филиппов Д.А., Петров В.М., Антоненков О.В. Кросс-эффекты в структурах на основе ферритов и пьезоэлектриков: монография/ НовГУ им. Ярослава Мудрого - Великий Новгород, 2010. - 112 с. ISBN 978-5-98769-081-6
58. Филиппов Д.А., Петров В.М. Перекрестные эффекты в феррит-пьезоэлектрических структурах / ИПЦ НовГУ, В. Новгород, 2009, 98 с.
59. Фетисов Ю.К.. Магнитоэлектрический эффект в многослойных структурах магнетик-пьезоэлектрик и его применения // *Радиотехника*, 2007, № 9, с. 78-82.
60. Остащенко А., Фетисов Ю., Преображенский В. Магнитоэлектрический эффект в многослойных пленочных структурах, Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG , 2011, 159 стр.

61. Bichurin M.I.; Filippov D.A.; Petrov V.M.; Laletsin V.M.; Paddubnaya N.N.; Srinivasan G. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites // *Phys. Rev. B*, 2003, v. 68, p. 132408 (1-4).
62. Филиппов Д.А.; Бичурин М.И.; Петров В.М.; Лалетин В.М.; Поддубная Н.Н.; Srinivasan G. Гигантский магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах в области электромеханического резонанса // *Письма в ЖТФ*, 2004, т. 30, вып.1, с. 15-20.
63. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J., and Viehland D. Thermal noise cancellation in symmetric magnetoelectric bimorph laminates // *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, pp. 072906 (1-3).
64. Chashin D.V., Fetisov Y.K., Kamentsev K.E., and Srinivasan G. Resonance magnetoelectric interactions due to bending modes in a nickel-lead zirconate titanate bilayer // *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, pp. 102511 (1-3).
65. Fetisov YK, Bush AA, Kamentsev KE, Ostashchenko AY, Srinivasan G. Ferrite-piezoelectric multilayers for magnetic field sensors // *IEEE Sensors Journal*, 2006, V. 6. P. 935-938..
66. Бичурин М.И., Петров В.М., Петров Р.В., Букашев Ф.И., Смирнов А.Ю. Магнитоэлектрический датчик для измерения магнитного поля // *Magnetoelectric Interaction Phenomena In Crystals: The abstracts of the reports IV conference (MEIPIC-4) 16-19 October 2001 / Ed. By M.I.Bichurin; NovGU Novgorod, 2001. -88 p. (p.84).*
67. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kiliba Y.V., Bukashev F.I., Smirnov Yu.V., Eliseev D.N. Magnetoelectric Sensor of Magnetic Field // *Proceedings of The Fourth Conference On Magnetoelectric International Phenomena In Crystals (MEIPIC-4) / Ferroelectrics*, 2002, V. 280, p.199.
68. Wang Y., Gray D., Berry D., Gao J., Li M., Li J., Viehland D. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetoelectric Sensor // *Adv. Mater.* 2011, V. 23, 4111-4114.
69. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики

- ЦТС и Метгласа// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: www.science-education.ru/101-5367.
70. Soloviev I. N., Bichurin M. I., and Petrov R. V.. Magnetolectric Magnetic Field Sensors // PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 19-23, 2012, p. 1359-1362.
 71. Петров Р.В., Леонтьев В.С. Магнитоэлектрический магнитометр // Вестник НовГУ, сер. Технические науки, №75, т.1, 2013. С. 7-11.
 72. Wang Y., Li M., Hasanyan D., Gao J., Li J., and Viehland D.. Geometry-induced magnetolectric effect enhancement and noise floor reduction in Metglas/piezofiber sensors // APL, 2012, v. 101, p. 092905.
 73. Soloviev A.N., Lavrentyeva K.V., Solovyev I.N., Petrov R.V., Petrov V.M., Bichurin M.I. Magnetolectric transducers// Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Stockholm, Sweden, 2013, p. 1271-1274;
 74. Petrov R. V., Yegerev N. V., Bichurin M. I., Aleksić S. R.. Current sensor based on magnetolectric effect // XVIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2014, 29-31 May 2014, Bourgas, Bulgaria. P. 101-103.
 75. Solovyev I.N., Solovyev A.N., Petrov R.V., Bichurin M.I., Vučković A.N., Raičević N.B. Sensitivity of Magnetolectric Current Sensor // Proceedings of 11th International Conference on Applied Electromagnetics - ПИЕС 2013 September 01 – 04, 2013, Niš, Serbia, p. 109-110.
 76. Petrov R.V., Solovyev I.N., Soloviev A.N. and Bichurin M.I. Magnetolectric current sensor // PIERS Proceedings, Stockholm, Sweden, Aug. 12-15, 2013, p. 105-108.
 77. Килиба Ю.В. Разработка магнитоэлектрических датчиков магнитного поля и СВЧ мощности на основе композиционных материалов. Дисс. к.т.н./Новгородский гос. университет, Великий Новгород, 2003.- 131 с.
 78. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kapralov G.N., Kiliba Yu.V., Bukashev F.I., Smirnov A.Yu., Tatarenko A.S. Magnetolectric microwave devices // Ferroelectrics, 2002, V. 280, p. 211-218.

79. Петров Р.В. Магнитоэлектрические СВЧ-устройства // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, вып. 1 (481), 2003, 78 стр.
80. Бичурин М.И., Петров Р.В., Букашев Ф.И., Смирнов А.Ю., Капралов Г.Н., Татаренко А.С.. Магнитоэлектрические микроволновые устройства// Magnetoelectric Interaction Phenomena In Crystals: The abstracts (MEIPIC-4) 2001 / Ed. By M.I.Bichurin; NovGU, Novgorod, 2001. p.82.
81. Воробьев Ю.Д., Петров Р.В., Бичурин М.И. Исследование полосно-пропускающих магнитоэлектрических фильтров // Студенческая наука: Сб. науч. ст. / Отв. ред. М.И.Бичурин. НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2001. С. 130.
82. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Filippov D.A. Magnetoelectric microwave attenuator // Electronics Lett., 2007. V. 43, p. 674.
83. Бичурин М.И., Петров Р.В., Килиба Ю.В. Магнитоэлектрический СВЧ фазовращатель // Международный форум по проблемам науки, техники и образования 1997 г Москва: Тез. докл., МИИГАИК. М., 1997, ч.2 стр.77.
84. Бичурин М.И., Петров Р.В., Килиба Ю.В. Магнитоэлектрический СВЧ фазовращатель // Международный форум по проблемам науки, техники и образования 1997 г Москва, сб. докл., МИИГАИК. М., 1997, стр. 239-245.
85. M.I.Bichurin, R.V.Petrov, Yu.V.Kiliba Magnetoelectric Microwave Phase Shifters // Proceedings Of The 3rd International Conference On Magnetoelectric Internation Phenomena In Crystals (MEIPIC-3) / Ferroelectrics, 1997, V. 241, p.97.
86. Бичурин М.И., Петров Р.В., Килиба Ю.В. СВЧ фазовращатели на магнитоэлектрических материалах // Микроволновая электроника больших мощностей: измерения, идентификация, применение / ИИЭР-НГТУ ИИП-МЭ'97 Новосибирск, 23-25 сентября, 1997, с. 157-161.

87. Tatarenko A.S., Srinivasan G., and Bichurin M.I. Magnetolectric microwave phase shifter // *Appl. Phys. Lett.*, 2006. V. 88. P. 183507.
88. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Bichurin M.I. Electrically-tunable microwave phase shifter based on ferrite-piezoelectric layered structure // *18th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology*, 2008. P. 56-58.
89. Tatarenko A. S., Srinivasan G. A strain engineered voltage tunable millimeter wave ferrite phase shifter // *Mic. Opt. Tech. Lett.*, 2011. V. 53, Issue 2, pages 261–264.
90. Татаренко А.С., Лаврентьева Д. В., Семенов Г.А., Семенов Д.А. СВЧ фазовращатель миллиметрового диапазона на основе магнитоэлектрической слоистой структуры Zn₂Y/PMN-PT // *Вестник НовГУ, сер. Техн. науки*. 2011. № 65. С. 36-38.
91. Lavrentieva D. V. , Bichurin M. I. , Tatarenko A. S. Nonreciprocal magnetolectric microwave attenuator// *PIERS Proceedings*, Moscow, Russia, August 19–23, 2012, p. 885-887.
92. Lavrentieva D. V. , Bichurin M. I. , Tatarenko A. S., M.T. Peric, S.R. Aleksic. Magnetolectric microwave devices // *Proceedings of 11th International Conference on Applied Electromagnetics ПЕС 2013* September 01– 4, 2013, Nix, Serbia, p. 109-110.
93. Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С. Магнитоэлектрический управляемый копланарный СВЧ вентиль-аттенюатор // *Вестник Новгородского Государственного университета им. Ярослава Мудрого*, 2014, Выпуск № 81. С. 55-58.
94. Лаврентьева Д.В., Бичурин М.И., Татаренко А.С. Магнитоэлектрический СВЧ аттенюатор-фазовращатель// *Материалы конф. Микроэлектроника СВЧ*. 2012. с. 159-162.
95. Петров В.М., Лаврентьева К.В.. Электрически перестраиваемые индуктивные элементы// *Вестник Новгородского Государственного*

университета им. Ярослава Мудрого, 2013, Выпуск № 75, том 1. С. 23-25.

96. Лаврентьева К. В. Устройство функциональной электроники электрически управляемый индуктивный элемент на основе композиционного мультиферроика// тезисы XX научной конференции студентов, аспирантов и преподавателей НовГУ, 2013. С. 53.
97. Lavrentyeva K.V., Petrov V.M., Bichurin M.I., Rancic M.P., Aleksic S.R.. Tunable magnetoelectric inductor // Proceedings of 11th International Conference on Applied Electromagnetics - ПЕС 2013 September 01 – 04, 2013, Niš, Serbia, p. 2-6.
98. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977. 656 с. с ил.
99. Супрун Б. К., Шерепа В. Ф.. Радиоприемные и радиопередающие устройства / Под ред. Ф. Н. Петросян – М.: Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1968. 307 с.
100. Вонсовский С. В.. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
101. Lou J., Pellegrini G.N., Liu M., Mathur N.D., and Sun N.X., Inequivalence of direct and converse magnetoelectric coupling at electromechanical resonance Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100, p. 102907.
102. Wu T., Chang Ch.-M., and Carman G. Comparison of effective direct and converse magnetoelectric effects in laminate composite // IEEE Transactions of Magnetics, 2009. V. 45, N. 10. P. 4333 – 4336.
103. Fang X., Zhang N., Wang Z. L. Converse magnetoelectric effects on heterotype electrostrain-piezopermeability composites. App. Phys. Lett., 2008. V. 93. P. 102503.