РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НКТБ «ПЬЕЗОПРИБОР» ЮФУ
ФАКУЛЬТЕТ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЮФУ
ЦКП «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»
ОАО «КОНЦЕРН «ОКЕАНПРИБОР»
ОАО «НИИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ»
ОАО «НИИ «ЭЛПА»

Сборник трудов

международной молодежной научной конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

23 – 27 сентября 2013 г.
г. Анапа

УДК 53.082.73
ББК 31.261.3
С 23

С 23 Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сборник трудов международной молодежной конференции, г. Анапа, 23-27 сентября, 2013. – Издательство Южного федерального университета, 2013. – 292 с.

978-5-9275-1140-2

Отпечатано с оригиналов статей, в авторской редакции.

Проведение международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»» поддержано грантом РФФИ № 13-02-06827 «Научный проект организация и проведение международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»».

978-5-9275-1140-2 ©НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ

ОРГКОМИТЕТ
международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»

Председатель оргкомитета:
Панич А.Е. научный руководитель-главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, декан факультета высоких технологий ЮФУ, д.т.н, профессор, академик РИА, г. Ростов-на-Дону
Сопредседатели оргкомитета:
Сероштан М.В. проректор по развитию науки и инноваций ЮФУ, д.э.н., г. Ростов-на-Дону
Шатохин А.В. ген. директора ОАО «Концерн «Океанприбор», к.э.н., г. Санкт-Петербург
Дмитриенко А.Г. ген. директор ОАО "НИИФИ", к.т.н., г. Пенза
Нерсесов С.С. ген. директор ОАО "Научно-исследовательский институт "Элпа"", г. Зеленоград
Ученый секретарь оргкомитета: Пономарева Н.С., г. Ростов-на-Дону

Программный комитет
Петров В.В. проректор по инженерному образованию ЮФУ, д.т.н., г. Ростов-на-Дону;
Хэндерсон Ян компания APC International Ltd (USA)
Бауэн К.Р. проф. ,ун-т Бата – Соед. Королевство
Панич А.А. директор НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, д.т.н., г. Ростов-на-Дону
Доля Владимир Константинович заместитель директора по науке и инновациям НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону
Селезнёв И.А. зам. ген. директора по инновационному, стратегическому развитию и научной работе ОАО «Концерн «Океанприбор», д.т.н., с.н.с., г. Санкт-Петербург;
Блинов А.В. заместитель генерального директора по научной работе ОАО "НИИФИ", академик Академии проблем качества РФ, к.т.н., г. Пенза
Нестеров Алексей Анатольевич профессор кафедры «Общей и неорганической химии» химического факультета Южного федерального университета, д.х.н., профессор, г. Ростов-на-Дону
Богуш Михаил Валерьевич заместитель директора НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, д.т.н., г. Ростов-на-Дону
Биятенко Юрий Николаевич заместитель директора по общим вопросам НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Локальный оргкомитет
Земляков Виктор Леонидович – заместитель декана по учебной работе факультета высоких технологий ЮФУ, д.т.н., заведующий кафедрой «Информационных и измерительных технологий», д.т.н., Ростов н/Д
Пономарева Н.С. , Ростов н/Д - ученый секретарь
Шевченко Л.А., Ростов н/Д
Верецкая Г.Ю. , Ростов н/Д
Панич Е.А., Ростов н/Д
Алексюнин Е.С. , Ростов н/Д

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Релаксорные пьезоматериалы и перспективы их развития
Жуков С.Н., Ян. Р. Хендерсон 9

Применение технологий формования сухих порошков для изготовления пьезоэлектрических изделий
О.Л. Хасанов 14

Исследование композитной магнитоэлектрической структуры аморфный ферромагнетик - многослойный пьезоэлектрик
Д. А. Бурдин, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, А.Г. Сегалла, Д.В. Чашин 16

Пути повышения функциональных параметров высокотемпературных сегнето - пьезокерамик на основе твердых растворов $BiScO_3$ - $PbTiO_3$
А.Г. Сегалла, Е.Д. Политова , С.С. Нерсесов 19

Особенности формирования и диэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобата калия-натрия
В.С. Акинфиев, Г.М. Калева, А.В. Мосунов, Е.А. Фортальнова, С.Ю. Стефанович, Е.Д. Политова 22

Достижения и тенденции в технологии оптической керамики на основе оксидов редкоземельных металлов
Ю.Л. Копылов, В.Б. Кравченко 25

Пиро- и пьезоэлектрики в неохлаждаемых тепловизионных системах
Б.Г. Гончаренко, В.Д. Салов, И.Г. Аваева, Ю.Л.Копылов 28

Влияние способа металлизации на структуру и диэлектрические свойства пьезокерамики ЦТС различных составов
О.В. Малышкина, А.А. Топчиёв, Е.В. Барабанова, А.И. Иванова, С.И. Пугачев, И.А. Эмбиль 31

Спекание пленочных актюаторов
А.Ю. Елисеев, О.В. Малышкина, В.А. Головнин, Д. А. Добрынин, Н.В. Иноземцев 34

Гидростатические параметры и анизотропия электромеханических свойств новых 2–2-композитов на основе кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков, поляризованных вдоль [011]
В.Ю. Тополов, К.Р. Бауэн, А.В. Криворучко, А.А. Панич 37

Пьезоэлектрические характеристики и факторы анизотропии новых трёхкомпонентных сегнетоактивных композитов
В.Ю. Тополов, К.Р. Бауэн, П. Бизенья, С.Е. Филиппов 40

Пьезочувствительность и пьезоэлектрическая анизотропия пористых композитных материалов на основе $Pb(Zr, Ti)O_3$
С.Е. Филиппов , А.А. Воронцов, В.Ю. Тополов, Брыль О.Е. 43

Взаимосвязи «микрогеометрия – факторы анизотропии» в высокоанизотропных 1–3–0-композитах на основе сегнетопьезокерамики типа ЦТС
В.Ю. Тополов, С.Е. Филиппов, А.Е. Панич, Е.А. Панич 46

Организация производства изделий из пьезокерамики в «Южном филиале ОАО «Концерн «Океанприбор»
Е.В. Аксенов, П.И. Александров 49

Влияние характеристик частиц порошков пьезофаз системы ЦТС на электрофизические свойства изготовленной из них пьезокерамики
А.А. Нестеров, А.А. Панич, В.К. Доля, Л.Ю. Кудлай, М.А. Мараховский 52

Анизотропные пьезоматериалы на основе фаз со структурой типа ТКВБ
А.А. Нестеров, А.Е. Панич, И.В. Рыбальченко, Е.А. Панич 57
Стеклокомпозиты типа 3 – 0 – 0 для LTCC технологий
А.А. Нестеров, А.А. Панич, И.В. Васильев, Э.К.Самадова 60
Пьезокомпозиты типа 1 – 0 – 3 с активными элементами, изготовленными из нано- и ультрадисперсной шихты.
А.А. Нестеров, А.А. Панич, С.Н. Свирская, Е.А. Панич 62
Мелкозернистые керамические пьезоматериалы на основе фаз систем $PbTiO_3$ – $MeTiO_3$ и $PbTiO_3$ –$MeZrO_3$ (Me = Ca, Sr)
А.А. Нестеров, И.В. Васильев, Л.Ю. Кудлай, Э.К. Самадова 64
Синтез ультрадисперсных порошков титанатов щелочноземельных элементов в водных растворах при высоких значениях pH.
А.А. Нестеров, А.Е. Панич, С.Н.Свирская, И.В. Васильев 67
Методика определения температурной стабильности пьезоматериалов с использованием стенда «Цензурка-М»
А.А.Нестеров, Е.В. Карюков, А.В.Скрылев, А.Ю.Малыхин 69
Электрофизические параметры пьезокерамического материала ЦТБС-3, синтезированного с использованием активных прекурсоров
А.А.Нестеров, С.Н.Свирская, Е.В.Карюков, А.Ю.Малыхин, А.В.Скрылёв, Т.А.Вотинова 72
Влияние размеров и состава частиц порошков на кристаллографическое строение фаз системы $BaTiO_3$ – $SrTiO_3$ и свойства материалов, создаваемых на их основе
Нестеров А.А., Доля В.К., Панич А.А. 73
Микроструктура сегнетожесткой керамики PZT-PMnN-PZnN, полученной в широком диапазоне температур
А.Е. Панич, В.В. Еремкин, В.Г. Смотраков, М.А. Мараховский, А.А. Панич 79
Макролегированиепьезофаз системы ЦТС с низкой температурой спекания
М.А. Мараховский, С.Н. Свирская, А.А. Нестеров, В.А. Мараховский, А.Е. Панич 85
Влияние сложных модифицирующих добавок на электрофизические параметры пьезокерамических материалов системы ЦТС
А.В. Нагаенко, А.А. Нестеров, С.Н. Свирская, А.Е. Панич 88
Технологические возможности управления свойствами материала ЦТС-19 на этапе синтеза
В. В. Еремкин А. В. Нагаенко, А. А. Панич, В. Г. Смотраков 91
Исследование методов механической активации пьезокерамического материала системы ЦТС
В.А. Мараховский, С.Н. Свирская, М.А. Мараховский, А.А. Панич 94
Расчет и измерение спектральных характеристик тонких пленок на основе высокотемпературного пьезокерамического материала титаната ниобата висмута
А.А. Панич, С.О. Гаврилов 96
Проблемы создания адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта
Баринов И.Н., Кучумов Е.В., Ефремов Е.В. 99
Исследование ТКЛР пьезокерамических материалов
Д.А. Добрынин 105

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПЬЕЗОТЕХНИКИ

Автономный пьезоэлектрический генератор
А.Л. Гриценко, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, В.Г. Никифоров, Д.Ю. Шахворостов, Т.В. Щёголева 107

Многослойные пьезоэлектрические приводы
А.Л. Гриценко, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, В.Г. Никифоров, Т.В. Щёголева 112

Влияние внешних факторов на параметры пьезокерамических датчиков угловых скоростей
А. В. Переплетчиков, И. И. Макан, Д. Ю. Шахворостов 116

Малогабаритный акселерометр для диагностики и мониторинга сооружений, оборудования, грунтов и других объектов
В.Н. Зинченко, Н.А. Каширин, В.М. Нечаев, Г.М. Нигметов, Т.В. Щёголева 120

Тарировка пьезоэлектрического датчика удара с использованием многослойных резонаторов
Г.Г. Дольников, С.О. Сегеда, О.В. Малышкина, Н.В. Иноземцев, В.А. Головнин 124

Особенности испытания пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений
Е.А. Мокров, П.Г. Михайлов 128

Синтез метрологических моделей пьезоэлектрического датчика давления
Е.А. Мокров, П.Г. Михайлов 131

Перспективы развития пьезоакселерометров для ракетно-космической техники
А.Г. Дмитриенко, А.В. Блинов, Е.А. Макаров 135

Предварительная обработка сигналов пьезокварцевых датчиков
В.Ю. Трофимов, Л.Е. Шахмейстер 137

Нормирование вибрации
О.Б.Скворцов 140

Боковое поле дуговой антенной решетки
В.Б.Жуков, В.Д.Зубов 143

Применение пьезокерамики в исследовании космической пыли
Г.Г. Дольников, А.В. Захаров, В.Н. Барке, И.А. Кузнецов, А.Н. Ляш, И.А. Шашакова, А.В. Яковлев 148

Разработка сенсоров динамических деформаций на основе сегнетоэлектрических пленок цирконат-титаната свинца
Д.А. Коваленко, В.В. Петров 150

Частотный диапазон датчиков физических величин с цепью компенсации паразитных емкостей сенсора
Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова 153

Пьезоэлектрический вибрационный гироскоп как электромеханический преобразователь-шестиполюсник, основные принципы оптимизации
В.К. Доля 156

Многочастотный гидроакустический модуль как основа построения фазированных антенных решеток
Ю.К. Милославский, В.Н. Митько, П.П. Пивнев, С.П. Тарасов, Ю.В. Душенин, В.В. Гурский, И.И. Маркович 157

Разработка, серийный выпуск и внедрение аппаратуры ряда «Цензурка» для контроля параметров пьезоэлементов, пьезопреобразователей и гидроакустических антенных решеток
Н.М. Иванов, Е.В. Кондаков, Ю.К. Милославский 164

Метод измерения матрицы собственных и взаимных импедансов излучения многоэлементных антенных решёток
Н.М. Иванов, Е.В. Кондаков, Ю.К. Милославский 168
Анализ источников погрешностей измерения параметров пьезоэлментов и пути их снижения
Е.В. Кондаков 172
Трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр
Янчич В.В., Джения Д.В., Янчич Вл.В., Крамаров Ю.А. 175
Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь
Янчич Вл. В., Панич А.Е. 179
Математическая модель двухзонного электромеханического интегрированного преобразователя с калибратором
Янчич Вл. В., Панич А.Е., Митько В.Н. 181
Средства измерения давления, уровня, расхода, плотности и температуры
М.В. Богуш 184
Датчики температуры с аналоговыми, цифровыми и энергосберегающими выходными сигналами
О.В. Шатуновский 186
Исследование метрологических характеристик вибрационного плотномера 804
О.В. Зацерклянный 189
О температурных напряжениях в деталях гидроакустических антенн
О.М. Богуш, Э.М. Пикалев 192
Обзор уровнемеров для криогенных жидкостей и сжиженных газов
А.О. Шатуновский 195
Методы определения пьезомодуля пьезокерамических материалов по параметрам эквивалентной электрической схемы пьезоэлемента
В.Л. Земляков 197
Программно-аппаратный комплекс для исследования импульсного метода определения пьезомодуля
С.Н. Галий, В.Л. Земляков 204
Приближенное определение пьезомодуля на образцах пьезоэлементов в форме диска
В.Л. Земляков, С.Н. Ключников 207
Разработка программно-аппаратных комплексов на основе LabVIEW для исследования пьезокерамических элементов
Т.А. Бодрикова, С.Н. Ключников 210
Метод определения параметров пьезорезонаторов для построения быстродействующих устройств их разбраковки
С.Н. Ключников 212
Контроль пьезорезонаторов по частотной характеристике активной составляющей проводимости
Ерусалимский Ю.А., Толмачев С.А. 215
Расчетная модель теплообмена платы в стационарном воздушном потоке
Е.В. Корохова, Н.И. Горбачев, Е.С. Алексюнин 218

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

Роль радиотелеметрической информационно-измерительной техники в построении экономики в ракетно-космической отрасли
А.В.Гориш, Д.В.Панов 221
Методика решения навигационной задачи транспортного средства применительно к слабосвязанной структуре интеграции разнородных навигационных систем
Щербань И.В., Толмачев С.А. 232
Организационная структура управления предприятием
А.В.Гориш, Д.В.Панов 236
Постановка задачи системного синтеза ресурса управления высокотехнологичным проектом
В.А. Петраков, А.С. Сомов, О.В. Граецкая., Е.В. Корохова, Н.С. Пономарева, А.В. Петракова 244
Модели менеджмента качества в проектировании наукоемкой продукции
Е.В. Корохова, О.В. Лиманцева, В.В. Корохов 247
Организация процессов информационного сопровождения на предприятиях, работающих в области высоких технологий
А.С.Мирошкин, О.В.Граецкая, Н.С.Пономарева 250
Анализ и развитие системы технической поддержки высокотехнологичного предприятия (на примере ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия»)
А.А. Макрищев, Ю.С.Чусова, О.В.Граецкая 253
Модель эффективного генетического алгоритма решения многокритериальных оптимизационных задач
Е. Н. Бородулина, О.Н. Секунова 256
Алгоритм выбора эффективной системы отопления зданий
А.В. Петракова, Е.В. Корохова, И.С. Шабаршина 259
Разработка, анализ и оптимизация производительности онлайн табло
В.И. Кривенко, Н.С. Пономарева, И.С. Шабаршина 262
Перспективные подходы для создания сложных анимированных моделей, функционирующих на мобильных устройствах
В.Н.Михайличенко 265
Универсализация формата электронных учебников для отображения на различных типах компьютерных устройств
М.А.Попова 267
Аппаратно-программный комплекс для экспресс-диагностики и коррекции функционального состояния организма человека
В.И. Бондин, Л.П. Белов 269
Проблемы астероидно-кометной опасности земли
Гориш А.В., Панов Д.В., Пономарев С.А., Рубцов И.С. 271

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Релаксорные пьезоматериалы и перспективы их развития

Жуков С.Н., Ян. Р. Хендерсон
APC International Ltd., США

Сегнетоэлектрическим релаксорным материалам или иначе пьезоматериалам с диффузным фазовым переходом, в настоящее время уделяется большое внимание в связи с их перспективностью.

Впервые такие кристаллические соединения были синтезированы профессором Г. А. Смоленским и его сотрудниками (Ленинградский физико-технический институт АН) в конце 50-х годов. Температурные аномалии таких соединений занимали необычно широкий интервал температур, величина которого достигает сотен градусов, в отличие от классических сегнетоэлектриков, переход которых происходит в очень узкой температурной области. Поэтому, их назвали сегнетоэлектриками с размытыми фазовыми переходами, а позднее кратким термином - релаксорами.

Релаксоры имеют следующие отличительные особенности от обычных сегнетоэлектриков:

1. Фазовый переход в релаксорах никогда не завершается, кривая диэлектрической проницаемости имеет спад вплоть до нуля по Кельвину.
2. В объеме кристалла структурный фазовый переход также не реализуется: структура релаксора представляет собой неполярную матрицу (кубическую решетку типа перовскита) в которой возникают полярные кластеры. Размеры этих кластеров, по разным оценкам, от 100 до 1000 Å. Эти полярные кластеры зарождаются при температуре, называемой температура Бёрнса, которая существенно выше температуры максимума диэлектрической проницаемости (например, для PMN пик диэлектрической проницаемости наблюдается при 250—280 К, в то время, как температура Бёрнса составляет 600—650 К).

3. Для релаксоров наблюдается существенная дисперсия как диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь), так и механических (внутреннего трения и модуля упругости).
4. Внешним электрическим полем можно перевести релаксор в обычное сегнетоэлектрическое состояние.

У релаксорных материалов в отличие от обычных пьезокерамических материалов деполяризация происходит не при достижении температуры Кюри, а, наоборот, в некотором температурном диапазоне выше точки Кюри (в диапазоне Кюри). Внутри этого диапазона, ограниченного снизу точкой Кюри, существует температура, при которой электрическая проницаемость имеет максимальные показания. Мало того, этот максимум электрической проницаемости зависит от частоты и смещается в сторону более высоких температур с увеличением частоты входного сигнала (в пределах спектра радиочастот). Такая реакция дает дисперсную кривую зависимости проницаемости и температуры.

Материалы с диффузным фазовым переходом демонстрируют относительно высокую термостабильность и очень высокие коэффициенты электромеханической связи (>0,9 по сравнению с 0,7–0,8 для обычной ЦТС пьезокерамики).

Релаксорные материалы делятся на две группы: поликристалы и монокристаллы. В свою очередь группы подразделяются на системы: одинарные, двоичные (бинарные) и троичные (триады).

Сегнетоэлектрические релаксорные поликристаллы. К ним относится важная группа пьезоактивных материалов, включающая в себя твердые растворы перовскитов с общей формулой $(1- x)Pb(B_1,B_2)O_3 – xPbTiO_3$. Комплекс перовскитов $Pb(B_1,B_2)O_3$ представляют собой неупорядоченные структуры ионов металлов из следующих групп:

- группа низкой валентности B_1 = Mg, Zn, Ni, Fe, Sc, Yb и In
- группа высокой валентности B_2 = Nb, Ta и W

Свойства релаксоров описываются соединением разнородных катионов разной валентности, находящимся в узлах кристаллической решетки структуры ABO_3.

Типичными примерами замещения узла А являются:

- стронций-титанат висмута: $(Bi_{2/3x}Sr_{1-x})TiO_3$,
- цирконат-титанат лантан свинца (ЦТЛС): $(Pl_{1-x}La_{2/3x})$ $(Zr_yTi_{1-y})O_3$ (PLZT).

Типичными примерами замещения узла В являются компаунды:
- магний-ниобат свинца (МНС): $(PlMg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PMN),
- скандий-тантал свинца (СТС): $Pb(Sc_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ (PST).

Наиболее модельным релаксором является магний-ниобат свинца (PMN) в силу более раннего его открытия, отличных свойств и относительно легкого изготовления, как в виде твердых растворов, так и монокристаллической форме.

Первый бинарный поликристаллический (керамический) релаксор был открыт в 1970 году на основе цинк-ниобат свинца: (цирконат-ниобат свинца)-(титанат свинца) $xPb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$(1-x)PbTiO_3$ (PZN-PT). Впоследствии был разработан другой известный керамический релаксор (магний-ниобат свинца)-(титанат свинца) $(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3(1-x)PbTiO_3$ (PMN-PT).

Повышенный интерес к релаксорам объясняется также их расширяющимся применением в радиоэлектронике, акустооптике и других важных разделах современной техники. Они получили уникальное применение для управления лазерами и наложения информации на лазерный луч. Активно изучается возможность создания магнитострикционных/электроактивных гибридных сенсоров на основе релаксоров.

Ведутся исследования висмут содержащей цинк-ниобат пирохлор системы - (Bismuth ZincNiobate)-pyrochlore, которая демонстрирует частотную и температурную зависимость проницаемости и величины угла диэлектрических потерь, типичные для релаксорных материалов.

Институт материаловедения Пенсильванского университета в интересах разработки высокотемпературных пьезоэлектрических материалов ведет активные исследования бинарных и тройных твердых релаксорных растворов на основе висмут содержащего титаната свинца $BiMeO_3$-$PbTiO_3$. В частности, исследования триады $xBi(Mg_{1/2}Ti_{1/2})O_3$-$yBi(Zn_{1/2}Ti_{1/2})O_3$-$zPbTiO_3$ показали, что она демонстрирует очень высокую температуру (~640ºС) перехода от параэлектрика к ферроэлектрику. А композиция перовскит структурной ромбогедральной керамики

$0.6(BiMg_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ -$0.05Bi(Zn_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ -$0.35PbTiO_3$ может проявлять диэлектрические свойства в диапазоне температур до 1000ºС.

Пьезоэлектрические релаксорные монокристаллы. В настоящее время разработаны и исследуются в качестве перспективных два основных типа пьезоэлектрических релаксорных монокристаллов на основе титаната свинца: бинарные (двоичные) релаксорные системы и троичные релаксорные системы (триады).

Элементы на базе бинарных релаксорных монокристаллических систем PMN-PT и PZN-PT демонстрируют величину деформации на порядок выше по сравнению с обычными поликристаллическими ЦТС материалами. Такие монокристаллы предполагается использовать в: преобразователях сонаров подводных лодок и надводных кораблей, композитных преобразователях высокой степени разрешения, пьезоэлектрических актюаторах небольшого перемещения, преобразователях аппаратуры неразрушающего контроля, диагностической и инвазивной медицинской аппаратуре. Однако есть ограничения по их применению, связанные с их относительно низкой температурой фазового перехода и чувствительностью к повышению давления окружающей среды. Это может сказываться в случаях повышения температуры при неразрушающем контроле и актюации.

В настоящее время, для улучшения параметров бинарных релаксоров типа PMN-PT и PZN-PT проводятся исследования по разработке третьего поколения этих релаксорных монокристаллов. Суть этих исследований заключается в модификации указанных бинарных составов за счет введения в них примесей и/или доноров, что, по мнению исследователей, даст возможность расширить их использование в таких областях, как диагностика, создание пьезоэлектрических датчиков, пьезоэлектрических генераторов и т.п.

В целях улучшения стабильности работы в реальных условиях релаксорных монокристаллов на базе PMN ведутся исследования и разработки таких новых релаксорных монокристаллических триад с модифицированными композициями, как $Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3$–$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$–$PbTiO_3$ (PIN-PMN-PT) и этой триады с добавками марганца Mn: PIN-PMN-PT.

Кроме этого, продолжаются работы по совершенствованию технологии производства с целью получения параметров этих материалов ориентированных на конкретное применение.

Исследования релаксорной монокристаллической поляризованной со срезом [011] триады PIN-PMN-PT - $Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3$-$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTi_{O3}$ во время ферроэлектрического/ферроэлектрического фазового превращения показали огромное электромеханическое преобразование энергии. Этот обратимый эффект сопровождался резкой значительной деформацией и прыжками поляризации в сочетании с индуцированным упругим FR-FO переходом. Фазовый переход в ферромагнитном материале обеспечил плотность выходной энергии на уровне ~750 μJ cm^{-3} за цикл, что на порядок выше, чем у традиционных пьезоэлектрических материалов. Считается, что эти свойства триады вполне будут востребованы для генерирования электрической энергии при использовании FR-FO-FR перехода. В этих целях осуществляется проектирование и разработка доменов монокристаллической триады PIN-PMN-PT с фазовым переходом 32 моды. Кроме этого, продолжаются работы по совершенствованию технологии производства с целью получения параметров этих материалов ориентированных на конкретное применение.

Широкое применение релаксорных монокристаллов пока ограничено относительно высокой коммерческой стоимостью и небольшими размерами элементов, получаемых из выращенных кристаллов. В настоящее время основной технологией выращивания релаксорных монокристаллов PMN-PT и PIN-PMN-PT является традиционной метод Бриджмана. С помощью этого модифицированного метода в коммерческих целях пока удается выращивать монокристаллические були диаметром до 4 дюймов.

Применение технологий формования сухих порошков для изготовления пьезоэлектрических изделий

О.Л. Хасанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

Для изготовления пьезокерамических колец из ЦТС-19, ЦТБС-3, ПКЛ-1 (наружный диаметр 36 мм, внутренний диаметр 23 мм); сегнетокерамических подложек $(Ba,Sr)TiO_3$ (диски диаметром 50 мм); прецизионных керамических корпусов из электрокерамики Ba-Ti-W-O для СВЧ-смесителей телекоммуникационных систем сотовой телефонии (1,85 х 12,70 х 8,35 мм^3; 8 отверстий для токовводов диаметром 0,6 мм) применены разработанные и запатентованные новые методы компактирования сухих порошков в заданные формы: патенты России № 2225280 (10.03.2004); Евразийский патент № 005325 (24.02.2005); США № 6919041 (19.07.2005); Украины № 75885 (15.06.2006); Южной Кореи № 10-0855047 (22.08.2008); Европатент №1459823 (11.03.2009).

Методы обеспечивают равномерную упаковку наноразмерных и микронных частиц порошков в сложные формы путем прессования сухих порошков под действием ультразвуковых колебаний и «коллекторным» способом для последующего спекания изделий широкого назначения из высокоплотной керамики с сохранением наноструктуры [1, 2].

Эти методы позволяют разрушать агломераты частиц в процессе прессования, механически активировать прессуемый порошок, повысить размерную точность изготовления керамических изделий без последующей механической обработки после спекания (net shaping). В технологии не применяются примесные связки и пластификаторы, поэтому керамические изделия сложной формы изготавливаются с равномерной плотностью, минимальными макродефектами (без пор, короблений, сколов и т.п.). В результате повышается качество и эксплуатационные характеристики изделий.

Методы апробированы также для изготовления опытных образцов изделий из функциональной и конструкционной керамики: оптически прозрачной ($Nd\text{-}Y_2O_3$; YAG; $MgAl_2O_4$; $ZrO_2\text{-}Y_2O_3$); бронекерамики (из

оксида алюминия, B_4C), торцевых уплотнений, турбинок бензонасосов для автомобильных и тракторных двигателей; фильер, калибров, экструзионных головок для кабельной техники - из оксида циркония; мишеней ZrB_2 для магнетронного распыления и др. [3 - 5].

Указанные методы внедрены в Холдинговой компании ОАО «НЭВЗ-Союз», в результате реализации комплексного проекта по постановлению Правительства РФ №218 о поддержке сотрудничества высокотехнологичных производств и российских вузов «Создание промышленного производства изделий из функциональной и конструкционной нанокерамики».

1. Khasanov O.L., Dvilis E.S. Net shaping nanopowders with powerful ultrasonic action and methods of density distribution control // Advances in Applied Ceramics.- 2008.- V.107.- No.3.- P.135-141.
2. O. Khasanov, U. Reichel, E. Dvilis, A. Khasanov. Lower sintering temperature of nanostructured dense ceramics compacted from dry nanopowders using powerful ultrasonic action // Materials Science and Engineering: 2011 IOP Conference Series, V.18, P.082004. doi:10.1088/1757-899X/18/8/082004.
3. O.Khasanov, V.Osipov, E.Dvilis, A.Kachaev, A.Khasanov, V.Shitov. Nanoscaled grain boundaries and pores, microstructure and mechanical properties of translucent Yb:[$Lu_xY_{(1-x)}O_3$] ceramics // Journal of Alloys and Compounds.- 2011.- V.509.- S.1.- P.S338–S342.
4. O.V. Karban, O.M. Kanunnikova, E.N. Khazanov, E.I. Salamatov, O.L. Khasanov, A.V. Taranov. Effect of ultrasonic vibration on the structure and composition of the interface regions in Ba–W–Ti–O ceramics // Ceramics International. – 2013. – V.39. – P.497–502.

O. Khasanov, E. Dvilis, A. Khasanov, E. Polisadova, A. Kachaev. Optical and mechanical properties of transparent polycristalline $MgAl_2O_4$ spinel depending on SPS conditions // Physica Status Solidi C. – 2013. – V.10. - No.6 – P.918–920.

Исследование композитной магнитоэлектрической структуры аморфный ферромагнетик - многослойный пьезоэлектрик.

Д. А. Бурдин, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, А.Г. Сегалла, Д.В. Чашин

Московский Государственный Технический Университет МИРЭА, Москва, Россия

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

В последнее время большой интерес исследователей вызывают композитные магнитоэлектрические (МЭ) структуры, содержащие магнитострикционный (МС) и пьезоэлектрический (ПЭ) слои, что обусловлено рекордно высокой эффективностью МЭ эффекта в многослойных структурах и перспективами создания на основе таких структур датчиков магнитных полей [1,2], твердотельных преобразователей напряжения и электрогенераторов. Недавно проведённые исследования двухслойной структуры ЦТС-Метглас показали перспективность применения аморфного ферромагнитного сплава (Метглас) в качестве материала для магнитострикционного слоя МЭ структур [3].

В данной работе исследовалась композитная МЭ структура в виде прямоугольной пластины, размерами 50х30 мм^2, содержащая слой аморфного сплава, толщиной 20 мкм, и многослойную ПЭ пластину. ПЭ пластина состояла из 4 слоёв ЦТС-46 толщиной - 50 мкм, поляризованных нормально к поверхности (Рис.1).

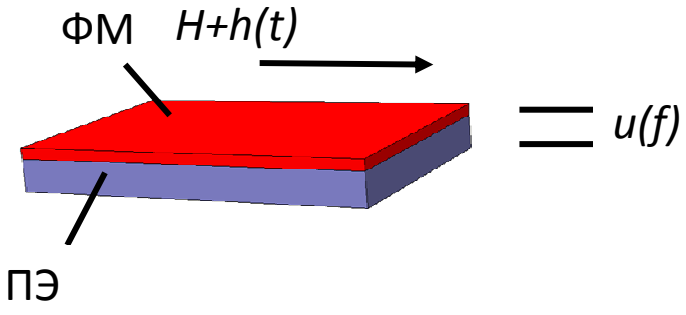


Рис.1 Структура. ПЭ – пьезоэлектрик, ФМ- ферромагнетик.

Исследуемый образец был свободно подвешен с помощью тонких проволочек, припаянных к электродам в узловых точках основной моды

изгибных колебаний. Структуру помещали в постоянное магнитное поле H величиной до 100 Э, направленное параллельно плоскости слоёв, и переменное магнитное поле $h \cdot \cos(2\pi(ft))$ того же направления с амплитудой до 3 Э и частотой в диапазоне 0-100 кГц. Напряжение $u(f)$, генерируемое вследствие МЭ эффекта между электродами структуры, регистрировали с помощью селективного микровольтметра В6-9.

Измерялись зависимости генерируемого напряжения u на частоте акустического резонанса f от амплитуды h переменного магнитного поля, а также от величины H постоянного магнитного поля.

На рис. 2 показана частотная зависимость МЭ напряжения. На частоте f_1=400 Гц, соответствующей основной моде изгибных колебаний пластины, наблюдался резонансный максимум с добротностью Q ~ 100.

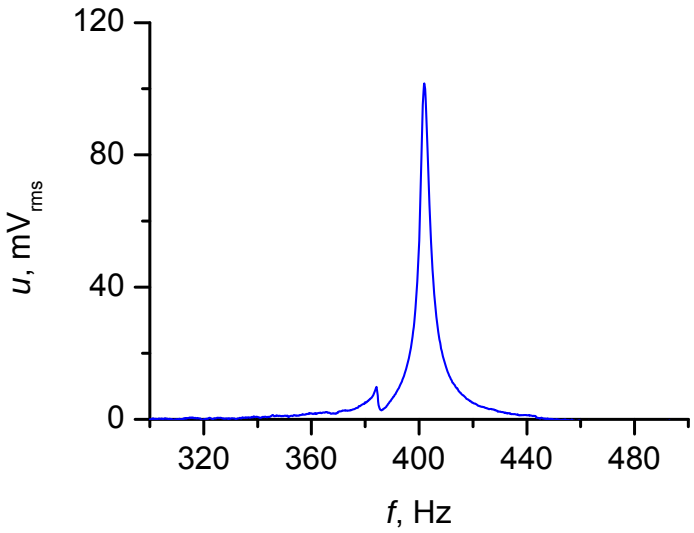
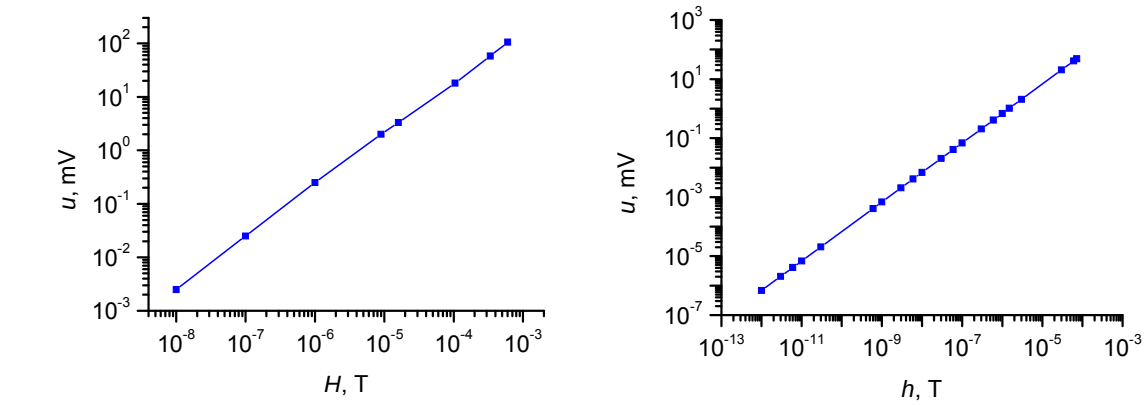


Рис.2 Зависимость генерируемого напряжения u от частоты f при H=0,6 мТ , h = 0.015 мТл.

.

На рис.3 приведены зависимости МЭ напряжения от величины постоянного магнитного поля H (рис.3 а) и от амплитуды поля возбуждения h (рис.3 б). Обе зависимости имеют линейный характер.



а) б)

Рис.3 а) Зависимость генерируемого напряжения u_1 на частоте f_1 от постоянного поля H при h = 0.015 мТл.

б) Зависимость генерируемого напряжения u_1 на частоте f_1 от переменного поля h при H = 0.6 мТл.

Из приведённых результатов видно, что исследуемая структура может использоваться в качестве датчика постоянного магнитного поля в диапазоне H=10^{-8}-10^{-3} Т и в качестве датчика переменного магнитного поля на резонансной частоте с амплитудой h=10^{-12}-10^{-4} Т.

Список литературы

1. J. J. Wesler, J. I. Bourianoff, V. V. Zhirnov, J. Nanopart. Res. 2008, V.10, p.1-10C. Nan, M. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan, JAP. 103, 031101 (2008).
2. Manfred Fiebig 2005 J. Phys. D: Appl. Phys. 38 R123
3. Бурдин Д. А., Фетисов Ю. К., Чашин Д.В., Экономов Н.А. Магнитоэлектрический эффект в структуре аморфный ферромагнетик-пьезоэлектрик (труды конф) Сборник научных трудов 5 Международной научной конференции «Функциональная база наноэлектроники», 2012, Харьков-Кацивели, с. 210-211.

Пути повышения функциональных параметров высокотемпературных сегнето - пьезокерамик на основе твердых растворов $BiScO_3$ - $PbTiO_3$

А.Г. Сегалла[1], Е.Д. Политова[2] , С.С. Нерсесов[1]

[1]ОАО "НИИ "Элпа", Панфиловский просп., д.10, 124460, Зеленоград, Москва, [2]Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова,

пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6, 105064, Москва, Россия

Адрес эл. почты: piezomatel@mail.ru; politova@cc.nifhi.ac.ru

Создание новых высокотемпературных пьезокерамических материалов является актуальной задачей для ряда отраслей науки и техники (высокотемпературная виброметрия, дефектоскопия, звуковидение, мониторинг работы мощных авиационных турбин, ядерных энергетических установок и др.).

Керамические твердые растворы на основе системы $(1-x)BiScO_3$ - $xPbTiO_3$ (BSPT) интенсивно изучают в последнее десятилетие в связи с перспективами создания новых пьезоэлектрических материалов с рабочими температурами выше 575 К [1-4]. Составы с $0.63 \le x \le 0.64$, принадлежащие области морфотропной фазовой границы (МФГ), разделяющей концентрационные области фаз с ромбоэдрической и тетрагональной структурами, проявляют температуры точки Кюри $T_C > 700$ К и высокую пьезоактивность ($d_{33} \ge 400 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н) и могут служить основой серии новых пьезокерамических материалов. Однако, перспективные составы BSPT характеризуются повышенными, по сравнению с материалами системы PZT, значениями коэрцитивных полей и диэлектрических потерь. Высокая омическая проводимость керамик при значениях коэрцитивных полей ~25 кВ/см обусловливает сложность проведения процесса поляризации и определяет низкую воспроизводимость параметров.

Для решения поставленных задач использован комплексный подход, включающий модифицирование катионного состава оксидов в А и В позициях решетки перовскита, введение сверхстехиометрических легкоплавких добавок, оптимизацию методов получения и регулирование микроструктуры керамик.

Изучено влияние катионных замещений на фазовый состав, микроструктуру, температуру фазовых переходов, сегнето- и пьезоэлектрические свойства керамик $(Bi,Pb,A)(Sc,M)O_3$ (A – Nd – 10 at. %; M – Ti, Ga, Lu, Yb, Er, Y – 10 at. %), полученных методом твердофазного синтеза [5-7]**.** Изучены свойста твердых растворов BSPT с x=0.64, модифицированных сверхстехиометрическими легкоплавкими добавками Bi_2O_3, LiF, а также Ni_2O_3 и MnO_2 (в количествах до 5 вес. %), с целью снижения температуры спекания керамик, оптимизации размера кристалитов и повышения электросопротивления керамик.

Установлено снижение температуры спекания керамик при сохранении стехиометрии состава и возможность регулирования размера зерен керамик при введении добавки LiF. Показано, что добавки MnO_2 и Cr_2O_3 способствуют понижению полной проводимости и диэлектрических потерь на 1-2 порядка.

Исследована также возможность улучшения пьезосвойств керамики BSPT, при «неравновесном» фазовом переходе из параэлектрической в сегнетоэлектрическую (СЭ) фазу (метод закаливания). Показано, что закаливание образцов керамики с x=0.635 способствует повышению значений пьезомодулей d_{33} до $459 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н и d_{31} до $176 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Повышение эффективности процесса поляризации, по-видимому, достигается за счет повышения мобильности и площади доменных границ при неравновесном фазовом переходе. Аналогичный результат получен на образцах системы BSPT, модифицированных оксидами марганца и хрома [8].

Установлено, что керамики BSPT, близкие по составу к МФГ, обладают весьма низкой механической добротностью радиальных и толщинных колебаний. Применение методов химического соосаждения из растворов нитратов и закаливания позволило получить керамику с $d_{33}=520 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н и $Q_M^{рад} \leq 25$ при Tc=710 К.

С использованием метода диэлектрической спектроскопии в интервале температур 560-740 К выявлены СЭ фазовые переходы первого рода, характеризующиеся четкими аномалиями на температурных зависимостях диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь. Выявлены также релаксационные аномалии диэлектрических параметров,

природа которых связана с наличием вакансий в подрешетке кислорода, обусловленных потерями оксидов висмута и свинца в процессе высокотемпературного спекания керамики.

Установлены корреляции между составом, параметрами структуры, микроструктуры и диэлектрическими параметрами керамик, выявлены добавки, обеспечивающие получение керамик BSPT, перспективных для создания эффективных ПКМ с рабочими температурами > 575 К и низкой механической добротностью [8, 9].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 12-03-00388).

Список литературы

[1]. Eitel R. E., Randall C. A., Shrout T. R., and Park S.-E. Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. pp. 2099-2104.

[2]. Eitel R. E., Zhang S. J., Shrout T. R. J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 2828-2831.

[3]. Zhang Sh. J., Eitel R. E., Randall C. A. et al. Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. pp. 1-3.

[4]. Sehirlioglu A., Sayir A., Dynys F. Journ. Amer. Ceram. Soc. 2008. V. 91. № 9. pp. 2910-2916.

[5]. Политова Е.Д., Егорова Б.В., Калева Г.М., Мосунов А.В., Стефанович С.Ю., Сегалла А.Г., Зенг Я. Изв. РАН. Сер. физич. 2011. Т. 75. № 8. сс. 1228-1231.

[6]. Politova E.D., Kaleva G.M., Mosunov A.V., Segalla A.G., Zeng J., Key Engineering Materials, 2012, Vols. 512-515, pp. 1363-1366.

[7]. Политова Е.Д., Калева Г.М., Мосунов А.В., Садовская Н.В., Сегала А.Г., Зенг Я. (Zeng J.), Неорганические материалы, 2012, Т. 48 сс. 1076–1082.

[8]. Сегала А.Г., Голова Л.В., Горнев Е.С. и др. Пьезокерамический материал. Патент РФ № 2453518 от 20.06.2012.

[9]. Орлов А.В., Сегалла А.Г., Педько Б.Б., Вестник Тверского госуниверситета, серия «Физика», 2011, №. 15, СС. 51-57.

Особенности формирования и диэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобата калия-натрия

В.С. Акинфиев[1], Г.М. Калева[2], А.В. Мосунов[2], Е.А. Фортальнова[3], С.Ю. Стефанович[2], Е.Д. Политова[2]

[1]МГУ им. М.В.Ломоносова, Факультет наук о материалах, [2]Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, [3]Российский университет дружбы народов г. Москва, Россия

Адрес эл. почты: politova@cc.nifhi.ac.ru

Задачи расширения диапазона рабочих температур пьезокерамических материалов стимулировали интенсивные исследования оксидов со структурой перовскита на основе составов ниобата калия - натрия $(K,Na)NbO_3$ [1]. Преимуществом не содержащих свинец сегнетоэлектрических (СЭ) твердых растворов $(K,Na)NbO_3$ являются сравнительно высокие температуры Кюри T_C ~ 700 К и существование МФГ, вблизи которой наблюдали повышение коэффициентов электромеханической связи. Выбор состава $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ (KNN) в качестве базового обусловлен тем, что керамики именно этого состава проявляют наилучшие пьезоэлектрические свойства. Однако получение плотных керамик KNN представляет трудную задачу, и пьезоэлектрические свойства этих оксидов сильно зависят от метода получения керамик [2, 3]. Существенным недостатком К- и Na- содержащих составов является сложность получения керамик высокой плотности обычным керамическим спеканием вследствие невысокой термодинамической стабильности оксидов $KNbO_3$ и $NaNbO_3$.

При создании новых высокоэффективных пьезоэлектриков эффективно используют подход, связанный с формированием и изучением твердых растворов из области морфотропной фазовой границы (МФГ), разделяющей концентрационные области с различной кристаллической структурой. Для улучшения свойств керамик на основе KNN используют подходы катионного модифицирования составов, близких к МФГ. Однако, результаты отдельных работ, в которых исследованы подходы,

способствующие улучшению спекания керамик KNN путем введения добавок, не согласуются друг с другом. Более того, спекающие добавки, эффективные для определенных составов, могут не быть эффективными в случае других составов или даже вызывать деградацию диэлектрических свойств.

В данной работе исследованы твердые растворы $(1-x)[(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3]0.98–[BiScO_3]0.02 – xAgSbO_3$ с x=0 – 0.1, из области МФГ, модифицированные добавками $AgSbO_3$, а также добавками LiF и MnO_2 [4]. Синтезированы также образцы керамик на основе состава $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$, модифицированного легкоплавкими добавками хлорида калия KCl (до 15 мол. %) и фторида лития LiF (5 вес. %) с целью снижения температуры спекания, получения текстурированных керамик высокой плотности, регулирования стехиометрии и улучшения сегнето- и пьезоэлектрических свойств керамик.

Изучено фазообразование, определены области фазовой гомогенности, параметры структуры и микроструктуры керамик, изучены фазовые переходы, диэлектрические и СЭ свойства керамик с использованием комплекса физико-химических методов (РФА, СЭМ, ДТА, ДСК, ГВГ и диэлектрической спектроскопии). Обоснован выбор добавок, интенсифицирующих процесс спекания. Установлена интенсификация процесса спекания керамик KNN при введении добавок $AgSbO_3$, KCl и LiF с низкими температурами плавления, обеспечивающих уплотнение керамик при достаточно низких температурах. Установлено влияние состава, условий получения, параметров структуры и микроструктуры (текстуры) на функциональные свойства керамик.

Полученные результаты свидетельствуют о формировании твердых растворов с размытыми фазовыми переходами, температуры которых варьируются в зависимости от количества вводимых добавок (температура СЭ фазового перехода T_C снижается на ~ 140 К при увеличении содержания добавки $AgSbO_3$, но повышается на ~ 100 К при введении KCl и LiF в сравнении с T_C исходного состава KNN). Отметим, что введение добавок определяет значительное снижение электропроводимости керамик при

комнатной температуре и повышение величины диэлектрической проницаемости при низких температурах < T_C, что должно благоприятствовать эффективной поляризации керамик.

Характерной особенностью изученных образцов является наличие интенсивного сигнала генерации второй гармоники лазерного излучения в широком температурном интервале. Полученные результаты подтверждают принадлежность изученных составов к полярному классу веществ.

Подтверждается формирование нового твердого раствора с перовскитной структурой при введении небольшого количества $AgSbO_3$ (до 10 моль. %) в состав $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$. Показано, что катионы Ag^+ занимают позиции $(K_{0.5}Na_{0.5})^+$, а катионы Sb^{5+} занимают позиции Nb^{5+}, и введение небольших количеств $AgSbO_3$ в состав $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ инициирует существенные изменения в характере фазового перехода, вследствие чего модифицированная керамика проявляет свойства релаксорного сегнетоэлектрика и характеризуется размытыми пиками диэлектрической проницаемости. Таким образом, получены образцы новых составов, сочетание свойств которых позволяет рассматривать их как перспективные пьезоэлектрические материалы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 12-03-00388).

Список литературы

[1]. Saito Y., Takao H., Tani I. et al., Nature. 2004, V. 432, p. 84–87.

[2]. Bernard J., Bencan A., Rojac T. et al., J. Am. Ceram. Soc. 2008, V. 91, p. 2409–2411.

[3]. Yoon M. S., Khansur N. H., Lee W. J et al., Journal Advanced Materials Research. 2011, V. 287–290, p. 801–804.

[4]. Калева Г.М., Мосунов А.В., Стефанович С.Ю., Политова Е.Д., Неорганические материалы, 2013, Т. 49, № 8, с. 885–892.

Достижения и тенденции в технологии оптической керамики на основе оксидов редкоземельных металлов

Ю.Л. Копылов, В.Б. Кравченко

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

Первые эксперименты с получением оптических и лазерных керамик выделяли эти технологии в разряд уникальных и весьма дорогостоящих. Однако более детальное исследование процессов получения таких керамик позволили в последнее время существенно удешевить и упростить буквально все стадии технологии. Это позволяет надеяться, что достижения в технологии оптических керамик будут применимы и для обычных (не оптических) керамик. Рассмотрены последние достижения и тенденции в технологии оксидных оптических керамик и наиболее детально керамик на основе оксидов редкоземельных металлов. Одной из основных проблем современной технологии оптической керамики является устранение микро и нано размерных остаточных пор. На границах пор скачок показателя преломления высок и поэтому даже небольшая концентрация пор порядка 10^{-3} объемных процента приводит к заметному порядка 1% снижению in line пропускания света. Поры преимущественно формируются на стадии компактирования нанопорошков, но не один из методов компактирования не может гарантировать отсутствие пор в случае, когда исходные порошки агломерированы. Таким образом, получение неагломерированных нанопорошков является одной из наиболее важных задач технологии оптической и, особенно лазерной, керамики. Экспериментально было опробовано несколько методов получения неагломерированных наноразмерных порошков, как простых редкоземельных оксидов, так и соединений для использования их в технологии получения высоко прозрачных керамик. В качестве методов получения применялись сольво термальный синтез, пиролиз, химическое (со-)осаждение из водных растворов и размол в высокоэнергетических мельницах. Не агломерированные порошки иттрий алюминиевого граната (ИАГ) $Y_3Al_5O_{12}$ были получены в специально разработанной системе непрерывного сольвотермального синтеза и пиролиза. В сольвотермальном синтезе получены фасетированные нано кристаллы ИАГ, а при использовании пиролиза получены поликристаллические нано

сферы. Химическое осаждение было исследовано детально на примере Y_2O_3 и ИАГ. Было найдено, что при использовании нитратных растворов исходных оксидов при гетерогенном (со-)осаждение наблюдается наибольшая степень агломерации. Меньшую степень агломерации обеспечивает использование хлоридных и сульфатных исходных растворов рис.1. В хлоридных и сульфатных растворах формируются агломераты 2 и 3 порядков. При использовании нитратных растворов формируются агломераты третьего порядка, с трехмерными карало подобными структурами. Нано размерные порошки редкоземельных оксидов полностью свободные от агломерации получены методом гомогенного осаждения с использованием мочевины и сильно разбавленных растворов исходных оксидов. Частицы таких порошков являются агломератами третьего порядка, но имеют близкую к идеальной сферическую форму с диаметром от 80 до 500 нм (см. рис. 2). Количество начальных частиц в каждой нано сфере зависит от условий термической обработки. При достаточно высокой температуре формируются монокристаллические сферы. И форма и размер таких частиц весьма выгодны для получения максимальной плотности упаковки при компактировании (см.Рис.3). Был исследован ряд коммерческих порошков оксидов для их размола в высокоэнергетических мельницах – планетарных и аттриторах. Найдено, что некоторые коммерческие порошки оксидов при оптимальных условиях помола пригодны для получения высоко прозрачных и лазерных керамик. Качество размолотых порошков зависит от прочности агломератов в исходных коммерческих порошках. Мерой качества таких порошков и их смесей служила температура достижения 100% плотности при спекании. Для ИАГ такие порошки были поделены на три условные группы: «плохие», «приемлемые» и «отличные». Зависимости для трех таких образцов показаны на рис.4. Таким методом удалось получить порошки ИАГ и оксида иттрия с узким распределением размера частиц в области 100 нм. В итоге, на основе полученных порошков были изготовлены образцы лазерных керамик с прозрачностью (in line пропускание 84% для ИАГ и 82% для Y_2O_3) близкой к теоретической и обеспечивающей эффективную лазерную генерацию. Внешний вид таких образцов показан на рис.5.

Рис.1. Влияние агломерации порошков на пористость керамики. Порошки полученные из нитратных растворов (а) и поры в соответствующем образце керамики (б). Аналогично для порошков полученных из хлоридных растворов (с и д)

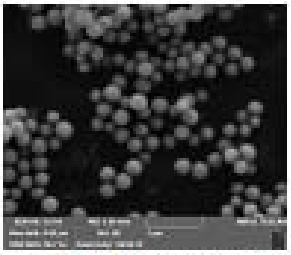


Рис. 2. Сферические частицы оксида иттрия

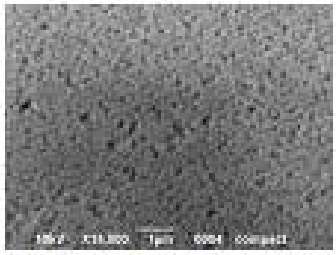


Рис.3. Компакт приготовленный из порошков со сферическими частицами

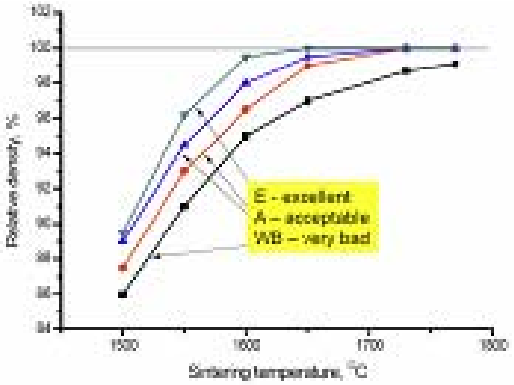


Рис.4. Изменение плотности образцов ИАГ изготовленных из порошков разной степени агломерированности. «А»- приемлемый, «Е»-отличный, «WB»-плохой

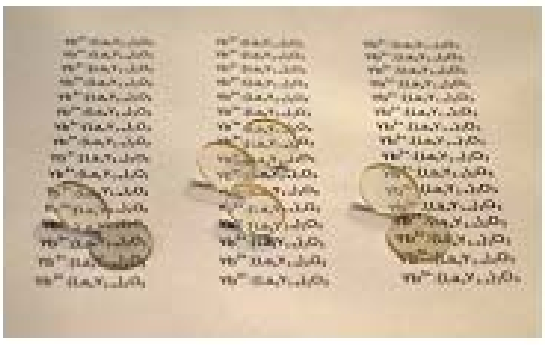


Рис. 5. Образцы лазерных керамик. Иттрий алюминиевого граната легированного неодимом - левый. Оксид иттрия легированный иттербием – правый

Пиро- и пьезоэлектрики в неохлаждаемых тепловизионных системах

Б.Г. Гончаренко[1], В.Д. Салов[1], И.Г. Аваева[2], Ю.Л.Копылов[1]

1-ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино, Россия

2-НИИ Авиационного оборудования, Жуковский, Россия

В последние годы благодаря существенному прогрессу технологии микроболометрическихприемных матриц неохлаждаемых, тепловизионных устройств их характеристики приблизились к характеристикам охлаждаемых систем, а размеры и стоимость стали сравнимы с таковыми для бытовых видеокамер. Однако, микроболометрические матрицы имеют естественные физические граница роста их чувствительности и стабильности, связанные в первую очередь с физическим принципом работы болометра. Поэтому активно ведутся работы по поиску иных физических принципов преобразования теплового излучения в электрический сигнал. Рассмотрены различные типы приемников теплового излучения основанных на изменении под действием нагрева излучением таких свойств твердого тела как показатель преломления (электрооптических эффект), поверхностного заряда (пиро- и пьезо-эффекты), линейных размеров (пьезо- эффект, тепловое расширение). Для регистрации изменений перечисленных свойств, рассмотрены преимущества и недостатки таких методов как электронно- оптический, оптический и емкостной. На основе электронно-оптического метода построен опытный образец тепловизионной системы. В свое время, для систем, работающих в ближнем ИК диапазоне (0.8 – 1.1 мкм), были разработаны электронно-оптические преобразователи (ЭОП), уже четыре поколения которых широко используются и в настоящее время. ЭОП это вакуумный прибор включающий фотокатод электронную оптику и катодолюминесцентный экран. Тепловое изображение объекта, проецируемое на фотокатод, преобразуется на фотокатоде в латентное изображение в виде пространственного распределения плотности тока фотокатода. Электронная оптика отображает это распределение в плоскости катодолюминесцентного экрана, преобразуя, таким образом, ИК изображение (и соответствующее ему латентное электронное) в

видимое изображение на люминесцентном экране. Спектральный диапазон ЭОПа ограничивается спектральной характеристикой фотокатода, возможный длинноволновый край которой не превышает 1.1 мкм. Чтобы продлить спектральный диапазон ЭОПа в область длинноволнового (8-14 мкм) ИК излучения в конструкцию ЭОПа, в его электронную оптику была встроена пироэлектрическая мишень в виде пленки покрытой материалом пироэлектрика. Мишень имеет систему регулярных отверстий, через которые могут проходить электроны на пути от фотокатода к катодолюминесцентному экрану. Это устройство было названо ПИРОЭОПом. В этом устройстве фотокатод равномерно освещается светом вспомогательного источника, обеспечивая равномерный поток электронов. Тепловое изображение объекта проецируется на плоскость пироэлектрической мишени, создавая зарядовый рельеф, который, в свою очередь, вызывает пространственную модуляцию плотности потока фотоэлектронов. Получаемое таким образом латентное изображение объекта преобразуется в видимое изображение также как в обычном ЭОПе. В качестве материала пироэлектрической мишени могут быть использованы неорганические пироэлектрики такие как цирконат - титанат свинца, танталат лития, танталат скандия свинца так и органические пироэлектрики, например ТАДФ(2,2’,4,4’тетрааминодифенил). Неорганические пироэлектрики могут быть выполнены в виде пленок поли и монокристаллических, полученных напыление в вакууме, электрофорезом из суспензий нанопорошков. Органические пироэлектрики могут быть получены, например методом термического напыления в вакууме. Выполнены оценки применимости, преимуществ и недостатков перечисленных материалов и методов их получения. На основе органического пироэлектрика ТАДФ изготовлено несколько образцов макетных ПИРОЭОПов и опытный образец тепловизора на их основе. На рис.1 показан пример выполнения пироэлектрической матрицы-мишени, а на рис.2 внешний вид ПИРОЭОПа и макета тепловизора и пример тепловых изображений (рис.3). На опытном макете достигнуто: разрешение

320x240 пикселей; минимальная обнаружимая разность температур 0.2 К при диаметре мишени 19 мм и дальности обнаружения человека 0.5 км.

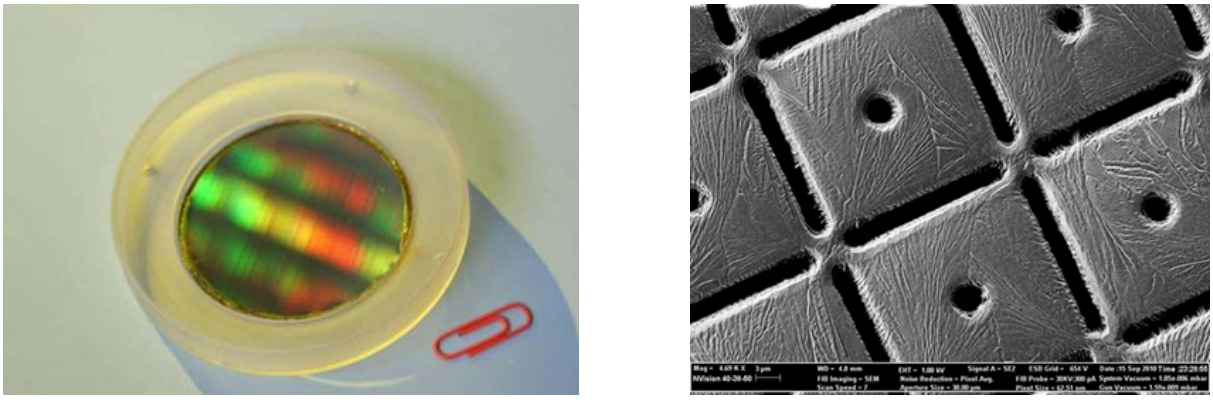


Рис.1. Общий вид пироэлектрической мишени-матрицы (слева) с размерностью 1600 x 1600 пикселей и фрагмент этой мишени (справа).

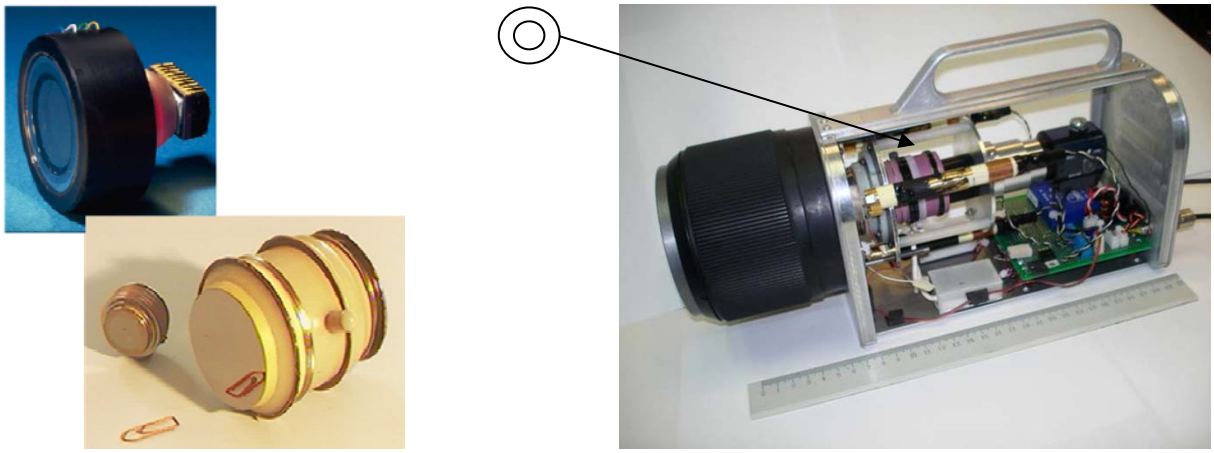


Рис. 2. Внешний вид ПИРОЭОПа (слева) и макета тепловизора (справа). Стрелкой показан ПИРОЭОП.

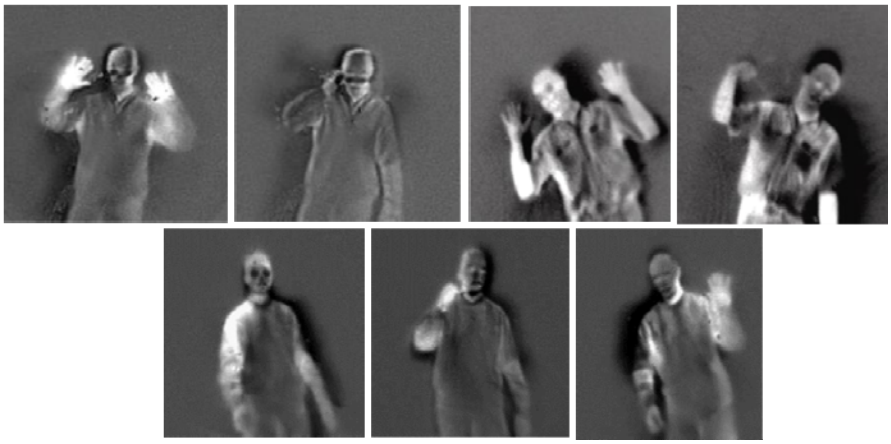


Рис. 3. Пример тепловых изображений, полученных с помощью макета тепловизора.

Влияние способа металлизации на структуру и диэлектрические свойства пьезокерамики ЦТС различных составов

О.В. Малышкина[1], А.А. Топчиёв[1], Е.В. Барабанова[1], А.И. Иванова[1], С.И. Пугачев[2], И.А. Эмбиль[2]

[1]Тверской государственный университет, г.Тверь, Россия

[2] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

г. Санкт-Петербург, Россия Olga.Malyshkina@mail.ru

Промышленная технология металлизации пьезокерамических материалов основана на восстановлении благородных металлов (обычно серебра) из окислов высокотемпературным методом «вжигания». Эта технология не обеспечивает в ряде случаев необходимой адгезионной прочности соединения пьезокерамики с металлом. Использование нагрева металлизирующих составов (серебросодержащих паст) в электрических печах сопротивления приводит к большой продолжительности процесса. Так, длительность цикла однократной металлизации, в результате которой формируется покрытие толщиной 3–4 мкм, составляет 12–14 часов, а для создания покрытия требуемой толщины (10–15 мкм) процесс металлизации повторяют трижды. Нанесение металлических покрытий в СВЧ–электромагнитном поле (СВЧ–металлизация) – новый технологический процесс, реализуемый по схеме, впервые заявленной в [1]. К основным преимуществам СВЧ–металлизации перед металлизацией по промышленной технологии, следует отнести значительное (в 5–7 раз) сокращение продолжительности металлизации и повышение адгезионной прочности соединений пьезокерамика – металл при сохранении высоких значений электрофизических параметров пьезокерамических элементов (ПКЭ).

В работе проведено сравнение структуры и диэлектрических характеристик пьезокерамик ЦТС-19 (сегнетомягкий материал) и ЦТССт-3 (сегнетожесткий материал), металлизированных по промышленной технологии и в СВЧ–поле. Структура боковых поверхностей – сломов образцов (рис.1 и 2) исследовалась с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV (РЭМ). По химическому составу ЦТССт-3 отличается от ЦТС-19 незначительной добавкой марганца–висмута–цинка. В тоже время наблюдаются значительные

изменения в размерах зерен этих материалов. Таким образом, добавка марганца–висмута–цинка делает структуру ЦТССт-3 более мелкозернистой (размер зерен у него в среднем в 1,5 раза меньше, чем у ЦТС-19), что, по всей видимости, способствует увеличению сегнетожесткости данного материала. Материалы ЦТС-19 и ЦТССт-3 различаются не только в размерах зерен, но и в структуре межзеренных границ (рис.1 а,б и 2 а,б). У ЦТС-19 границы зерен выражены не четко, т.е. имеет место «спекание» зерен пьезокерамики, что, по всей видимости, связано с воздействием тепловых полей в процессе металлизации, поскольку после воздействия СВЧ–поля, при котором происходит разогрев поверхности до 810^{o}С, в поверхностном слое границы не различаются (рис.1,в). На структуру ЦТССт-3 подобное воздействие, вызывающее «спекание» зерен, оказывает влияние только при нагреве в СВЧ–поле (рис.2).

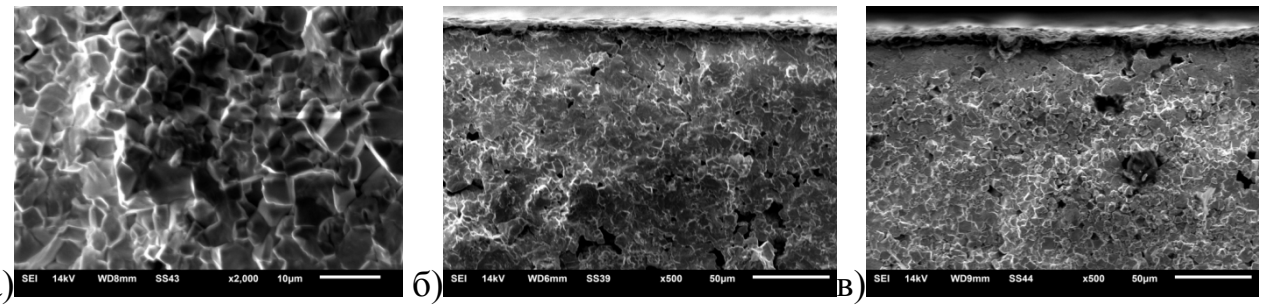


Рис. 1. Изображения боковой поверхности образца ЦТС-19 с промышленными электродами (а, б) и с СВЧ–электродами (в), полученные с использованием РЭМ.
а – увеличение 500; б, в – 2000

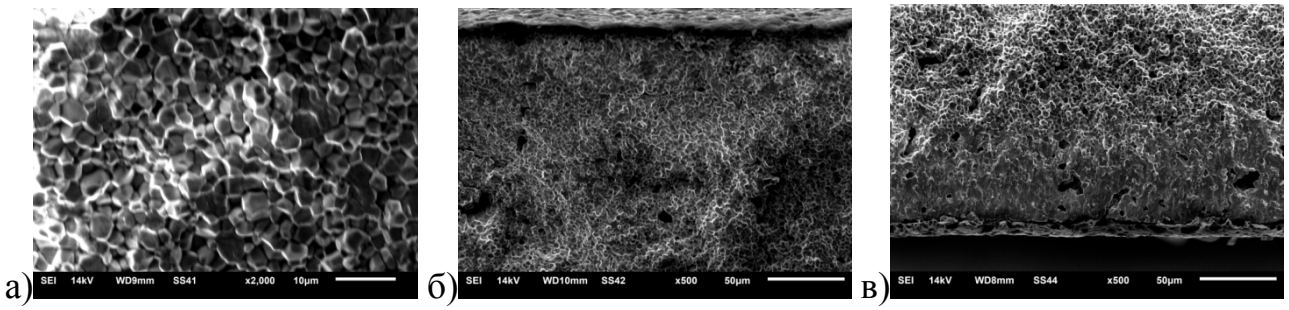


Рис. 2. Изображения боковой поверхности образца ЦТССт-3 с промышленными электродами (а, б) и с СВЧ–электродами (в), полученные с использованием РЭМ.
а – увеличение 500; б, в – 2000

Измерения частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь проводились с использованием

фазочувствительного измерителя Вектор-175 на неполяризованных образцах в интервале частот от 10^{-1} до 10^{6} Гц (рис. 3 и 4).

Исследования дисперсии диэлектрической проницаемости керамик ЦТС-19 и ЦТССт-3 не выявили существенных различий в ходе частотных зависимостей у образцов с разным типом электродов. Таким образом, можно утверждать, что, не смотря на изменения, вызываемые в процессе СВЧ–металлизации в приповерхностном слое, диэлектрические свойства рассмотренных пьезокерамических материалов не зависят от способа металлизации.

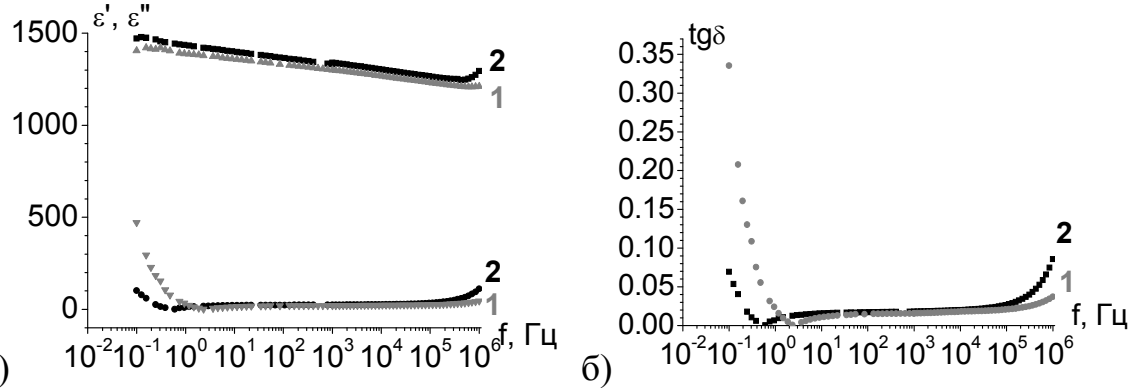


Рис. 3. Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) керамики ЦТС - 19.

Кривая 1 – промышленная металлизация, 2 – СВЧ металлизация

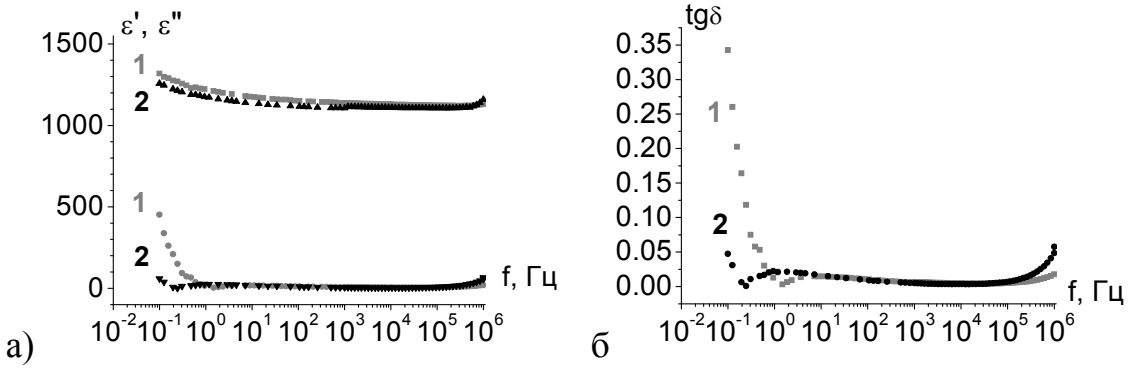


Рис. 4. Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) керамики ЦТССт-3.

Кривая 1 – промышленная металлизация, 2 – СВЧ металлизация

Патент РФ № 2256634 // Бернштейн Л.А. и др. Способ металлизации пьезокерамических элементов. 2004.

Спекание пленочных актюаторов

А.Ю. Елисеев[1], О.В. Малышкина[1], В.А. Головнин[2], Д. А. Добрынин[2], Н.В. Иноземцев[2]

[1]Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия

[2]ОАО «Научно-исследовательский институт «ЭЛПА», г. Зеленоград, Россия

Процесс спекания многослойных монолитных заготовок пленочных актюаторов относиться к основным процессам, определяющим структуру и свойства пьезоэлектрической керамики. Увеличение размера зерна керамики приводит к увеличению величины пьезоэлектрической деформации, однако это сопровождается уменьшением жесткости структуры, увеличением гистерезиса и ростом диэлектрических потерь. Размер зерна должен быть оптимизирован применительно к конкретной области применения.

В настоящей работе исследовались микроструктура и размер зерен пленочных керамических заготовок актюаторов из материала ЦТС-46 с температурой спекания 960÷970 °С, позволяющей использовать для электродов сплав Ag-Pd с меньшим содержанием палладия и способствующей экологической безопасности технологии.

Заготовки перед термообработкой состоят из слоев сырой органической пленки с керамическим порошком-наполнителем толщиной ~ 40 мкм, чередующихся со слоями органической пленки с металлическим порошком-наполнителем (металлосодержащей пастой) толщиной ~ 5 мкм. Пленка с керамикой содержит порядка 40 объемных % органической связки. Часть входящей в состав связки органики выше 160 ºС разлагается с выделением воды и масляного альдегида, а другая часть характеризуется вспышкой при температуре 199 ºС.

По данным DTG при температурной обработке до 380 ºС теряется 7,8 % веса образца; потеря веса начинается при температуре ~ 90 ºС и заканчивается при температуре ~ 420 ºС. Диапазон температур 200 ºС – 280 ºС характеризуется наиболее интенсивной потерей веса. С учетом значительной скорости изменения температуры при проведении анализа (~ 90 ºС за 1000 сек) кривые DTG и DTA соответствуют термическим превращениям основных компонент органической связки. Продукты

испарения, разложения и сгорания, образующиеся при повышении температуры, в газообразном виде (пары воды и углекислый газ), занимают объем, превышающий объем заготовки на 5 порядков.

Как видно из представленных на рис.1 изображений поверхности керамических заготовок, подвергнутых различным температурам нагрева, процесс формирования конечной структуры: уплотнение частиц порошка, увеличение размеров зерен и превращение в поликристаллическое твердое тело начинается при нагреве от 350 до 860 ^{o}C.

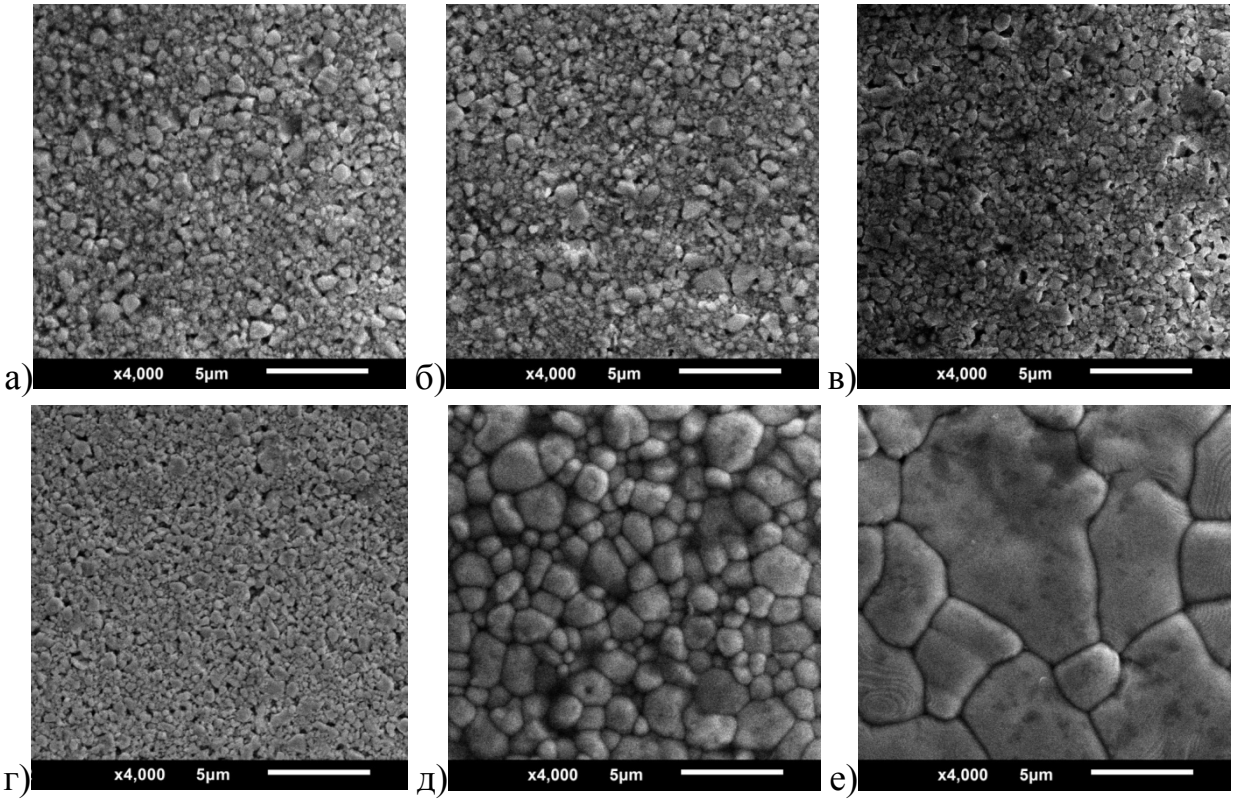
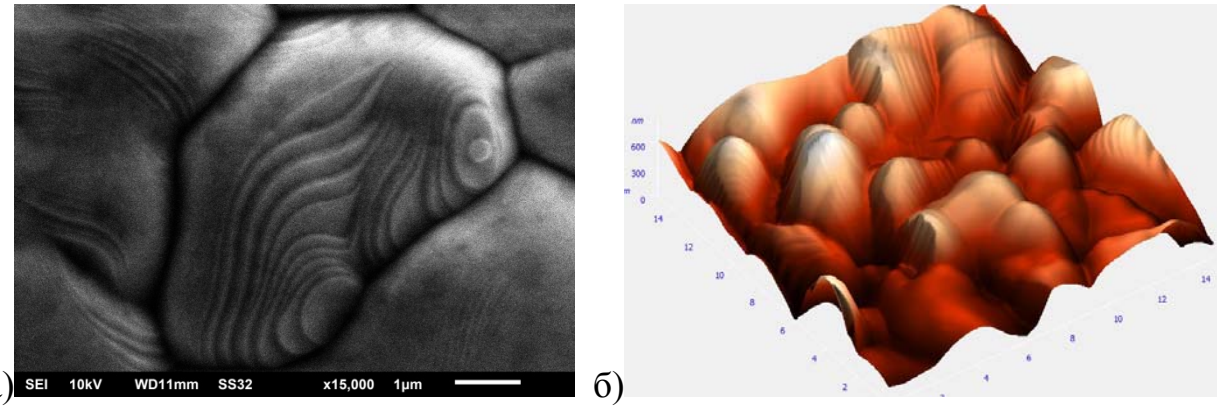


Рис.1. РЭМ изображения поверхностей керамических пленок, сырой (а) и после нагрева до температур 90 (б), 240 (в), 350 (г), 860 (д) и 970 ^{o}C (е)

Агломераты «сырой» пленки сохраняются при повышении температуры до 90 °C. Пористая структура при 240 °C и 350 °C способствует газовыделению. При 860 °C зерна припекаются друг к другу, а при 970 °C поверхность керамической пленки, полностью спечена, практически не имеет пор и характеризуется увеличением размера зерен с температурой отжига от 0,86 мкм для 240 ^{o}C до 2,43 мкм для 970 ^{o}C. Анализ размера зерен был выполнен в программе Image Analysis по данным, полученным на АСМ. Обращает на себя внимание наличие

радиальных «полос» после последней стадии спекания (рис.1,е и рис.2,а), их наличие подтверждается при исследовании рельефа поверхности на АСМ (рис.2,б).

Согласно результатам количественного анализа элементного состава выполненного на энергодисперсионном спектрометре по характеристическому спектру элементов (рис.3), содержание углерода уменьшается при нагреве выше 240 °С, при 860 °С и 970 °С присутствуют следы углерода, характерные для большинства фотографий РЭМ.



а) б)

Рис. 2. РЭМ (а) и АСМ (б) изображения поверхности керамической пленки после нагрева до температуры 970 °С. б – размер 15x15x0,8 мкм

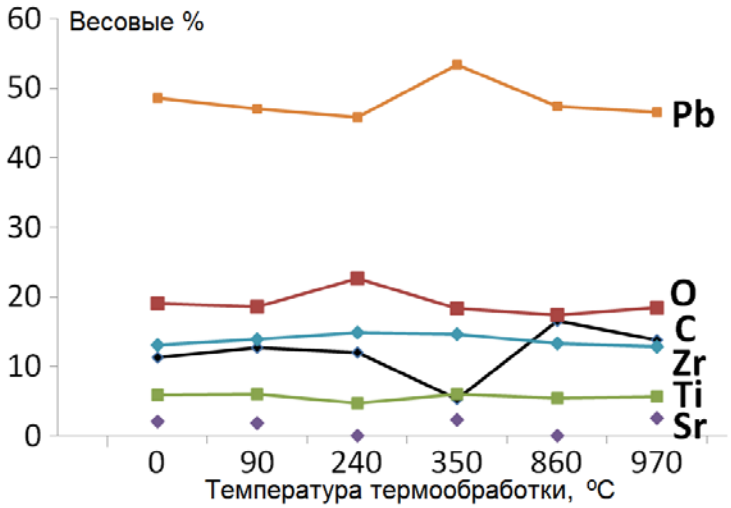


Рис.3 Содержание основных элементов керамики ЦТС-46 при разных температурных обработках

На основе полученных результатов разработаны технологические процессы спекания заготовок монолитных многослойных пьезоэлементов для актюаторов различного применения.

Гидростатические параметры и анизотропия электромеханических свойств новых 2–2-композитов на основе кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков, поляризованных вдоль [011]

В.Ю. Тополов[1], К.Р. Бауэн[2], А.В. Криворучко[3], А.А. Панич[4]

[1] Физический факультет, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

[2] Инженерно-механический департамент, Университет Бата, г. Бат, Соединённое Королевство

[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

[4] НКТБ «Пьезоприбор», Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Кристаллы твёрдых растворов релаксоров-сегнетоэлектриков со структурой типа перовскита представляют большой интерес как компоненты современных пьезоактивных композитов. Большие значения ряда эффективных параметров этих композитов достигаются вследствие высокой пьезоактивности кристаллов, ориентационных эффектов [1] и т.п. В последние годы ориентационные эффекты исследовались в композитах со связностями 1–3, 0–3 и 2–2. При этом в случае композитов на основе релаксоров-сегнетоэлектриков большое внимание уделяется выбору компонентов и дальнейшей оптимизации эффективных электромеханических свойств. Полные наборы электромеханических констант измерены на ряде полидоменных кристаллов $(1 - x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3–xPbTiO_3$, $(1 - x)Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3–xPbTiO_3$ (PZN–*x*PT) и $xPb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3–yPb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3–(1 - x - y)PbTiO_3$, поляризованных вдоль [011] перовскитовой ячейки (симметрия *mm*2). Ниже мы рассмотрим пример пьезоактивного композита со связностью 2–2 на основе кристалла PZN–0,07PT, поляризованного вдоль [011].

Прогнозирование эффективных электромеханических свойств проводится по матричному методу [1] в рамках модели 2–2-композита «кристалл – полимер» (рис. 1) с учётом ориентации главных кристаллографических осей. Из эффективных свойств определяются следующие гидростатические параметры:

а) пьезокоэффициенты $d_h^* = d_{31}^* + d_{32}^* + d_{33}^*$, $g_h^* = g_{31}^* + g_{32}^* + g_{33}^*$;

б) квадрат параметра приёма $(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^*$;

в) коэффициент электромеханической связи $k_h^* = d_h^* / \sqrt{s_h^{*E} \varepsilon_{33}^{*\sigma}}$, где $s_h^{*E} = \sum_{a=1}^{3}\sum_{b=1}^{3} s_{ab}^{*E}$ – гидростатическая упругая податливость при напряжённости электрического поля E = const, $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ – диэлектрическая проницаемость механически свободного образца.

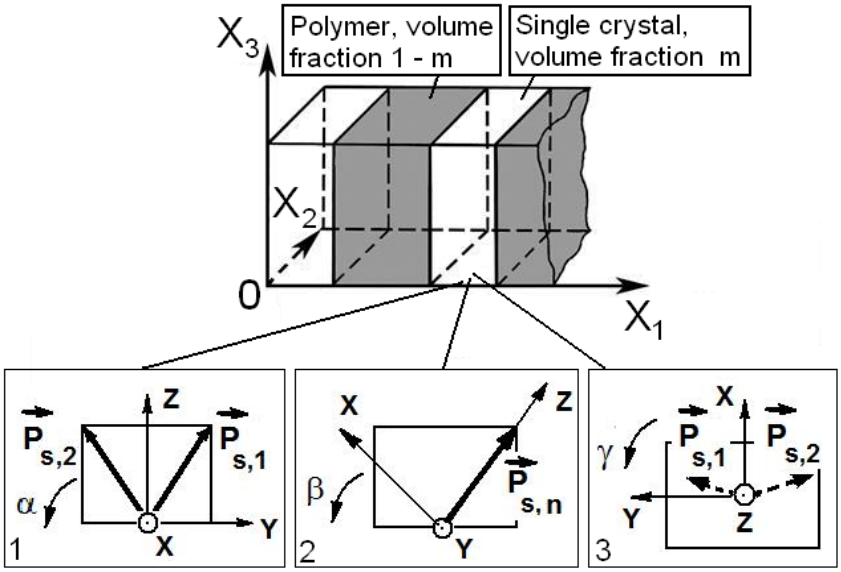
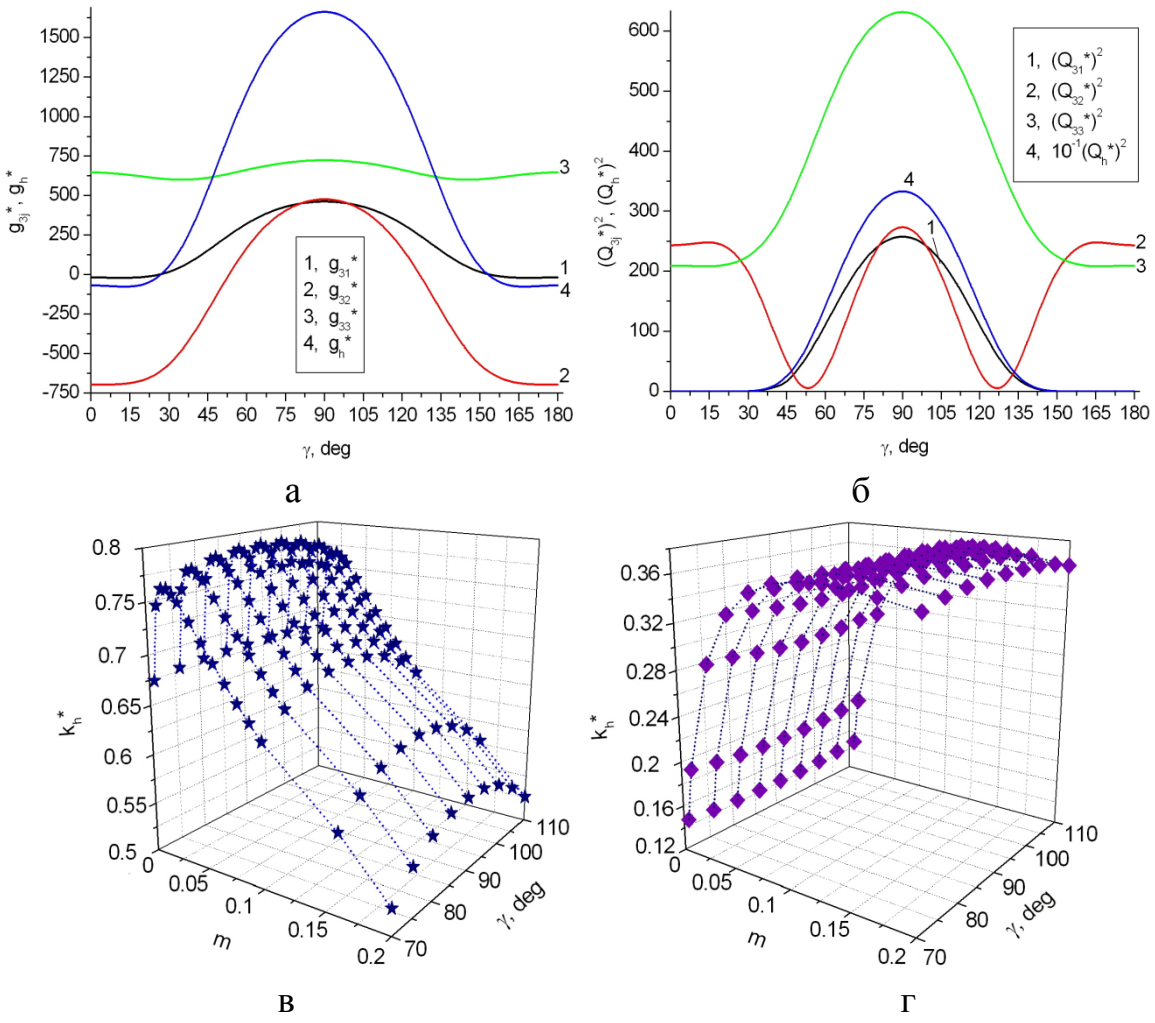


Рис. 1. Схематическое изображение 2–2-композита «кристалл – полимер» [1]. ($X_1X_2X_3$) – прямоугольная система координат, m и $1 – m$ – объемные концентрации кристаллического и полимерного компонентов соответственно, α, β, γ – углы поворота главных кристаллографических осей X, Y, Z (вставки 1 – 3) в каждом кристаллическом слое, $\boldsymbol{P_{s1}}$, $\boldsymbol{P_{s2}}$, … – векторы спонтанной поляризации отдельных типов доменов.

Из трёх вариантов поворота осей X, Y, Z (см. вставки 1–3 на рис. 1) наиболее эффективным является поворот на угол γ [1], что тесно связано с анизотропией упругих и пьезоэлектрических свойств кристалла, поляризованного вдоль [011]. Большие значения гидростатических параметров композита (рис. 2, а–в) достигаются в присутствии оксетного полимера с отрицательным числом Пуассона: такой полимер благоприятно влияет на баланс d_{3j}^*, g_{3j}^* и других параметров при малых значениях m. Замена оксетного полимера на полимер с положительным числом Пуассона приводит к заметному уменьшению гидро- статических параметров (ср., например, рис. 2, г и 2, в).



а б в г

Рис. 2. Эффективные пьезокоэффициенты g_{3j}^*, g_h^* (а, в мВ·м / Н), квадраты параметров приёма $(Q_{3j}^*)^2$, $(Q_h^*)^2$ (б, в 10^{-12} $Па^{-1}$) и гидростатический пьезокоэффициент k_h^* (в) 2–2-композита «кристалл PZN–0,07PT – оксетный полиэтилен». Графики (а) и (б) построены для $m = 0{,}05$ и $0° \le \gamma \le 180°$. На графике (г) для сравнения приводятся данные по k_h^* 2–2-композита «кристалл PZN–0,07PT – фторид поливинилидена с вектором остаточной поляризации $\boldsymbol{P}_r^{(2)} \uparrow\downarrow OX_3$».

Полученные результаты способствуют применениям новых 2–2-композитов в гидроакустике, энергосберегающих устройствах, пьезопреобразователях и т.д.

Список литературы

[1] Bowen C.R., Topolov V.Yu., Betts D.N., Kim H.A. // Proc. SPIE.– 2013.– Vol. 8763.– P.876320–10 p.

Пьезоэлектрические характеристики и факторы анизотропии новых трёхкомпонентных сегнетоактивных композитов

В.Ю. Тополов[1], К.Р. Бауэн[2], П. Бизенья[3], С.Е. Филиппов[4]

[1] Физический факультет, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

[2] Инженерно-механический департамент, Университет Бата, г. Бат, Соединённое Королевство

[3] Департамент инженерных и компьютерных наук, Университет Рима «Тор Вергата», г. Рим, Италия

[4] НКТБ «Пьезоприбор», Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Композиты, содержащие сегнетоэлектрические компоненты (сегнето-пьезокерамики (СПК), кристаллы или полимеры), в основном являются двухкомпонентными материалами. В последние десятилетия появились работы, посвящённые модификации структуры данных композитов и влиянию третьего компонента на их эффективные физические свойства (см., например, [1]). В настоящем сообщении проводится анализ физических и микрогеометрических факторов, улучшающих пьезоэлектрические характеристики трёхкомпонентных композитов по сравнению с родственными двухкомпонентными материалами. Исследуемые трёхкомпонентные композиты описываются элементами связности [2] 1–3, 2–2 и 0–3.

В качестве примера рассмотрим 1–0–3-композит, содержащий систему протяжённых СПК стержней, регулярно распределённых в гетерогенной матрице «СПК включения – полимер». Матрица представляет собой 0–3-композит, в котором центры симметрии включений совпадают с вершинами прямоугольных параллелепипедов, а каждое включение имеет сфероидальную форму, которая задаётся уравнением $(x_1 / a_1)^2 + (x_2 / a_2)^2 + (x_3 / a_3)^2 = 1$ в прямоугольной системе координат ($X_1X_2X_3$), где $a_1 = a_2$ и a_3 – длины полуосей сфероида. Центры симметрии оснований стержней находятся в вершинах квадратов, лежащих в плоскости (X_1OX_2), а образующие стержней параллельны оси OX_3, являющейся осью

поляризации 1–0–3-композита. Его эффективные электромеханические свойства определяются в длинноволновом приближении [2] как функции

1) объёмной концентрации СПК стержней m в 0–3-матрице,

2) объёмной концентрации СПК включений m_i в полимерной среде и

3) отношения длин полуосей СПК включений $\rho_i = a_1 / a_3$.

При этом используются метод конечных элементов (0–3-композит, усреднение по m_i) [3] и метод эффективного поля (1–3-композит, усреднение по m) [2].

Графики концентрационных зависимостей эффективных параметров 1–0–3-композита (рис. 1) приведены для случая, когда пьезоактивность 0–3-матрицы значительно ниже пьезоактивности СПК стержня. Это позволяет нам наблюдать главным образом влияние анизотропных упругих свойств 0–3-матрицы на пьезоэлектрические характеристики 1–0–3-композита. Использование более податливой 0–3-матрицы при фиксированных m_i и m приводит к бóльшим пьезоактивности и пьезочувствительности (рис. 1, г), а также к улучшению гидростатических параметров (рис. 1, б, в, е). Большая анизотропия пьезомодулей d^*_{3j} ($|\zeta_{d3j}| > 5$) наблюдается в ограниченной области ($m < 0{,}05$, см. рис. 1, а), когда упругие свойства 0–3-матрицы более существенны, чем упругие свойства СПК стержня. Отношения квадратов параметров приёма $(Q^*_{33})^2 / (Q^*_{31})^2 > 10$ (ср. рис. 1, г и 1, д) свойственны композиту с более податливой 0–3-матрицей.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют в пользу эффективности 1–0–3-композитов с двумя СПК компонентами. Данные композиты могут использоваться в качестве активных элементов сенсоров, гидрофонов, акустических антенн, пьезоэлектрических преобразователей и энергосберегающих устройств.

[1] Topolov V.Yu., Turik A.V. // Tech. Phys. Lett.– 2001.– Vol. 27, N 1.– P.81–83.

[2] Topolov V.Yu., Bowen C.R. Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics.– London: Springer, 2009. – 202 p.

[3] Topolov V.Yu., Bisegna P. // J. Electrocer.– 2010.– Vol. 25, N 1.– P.26–37.

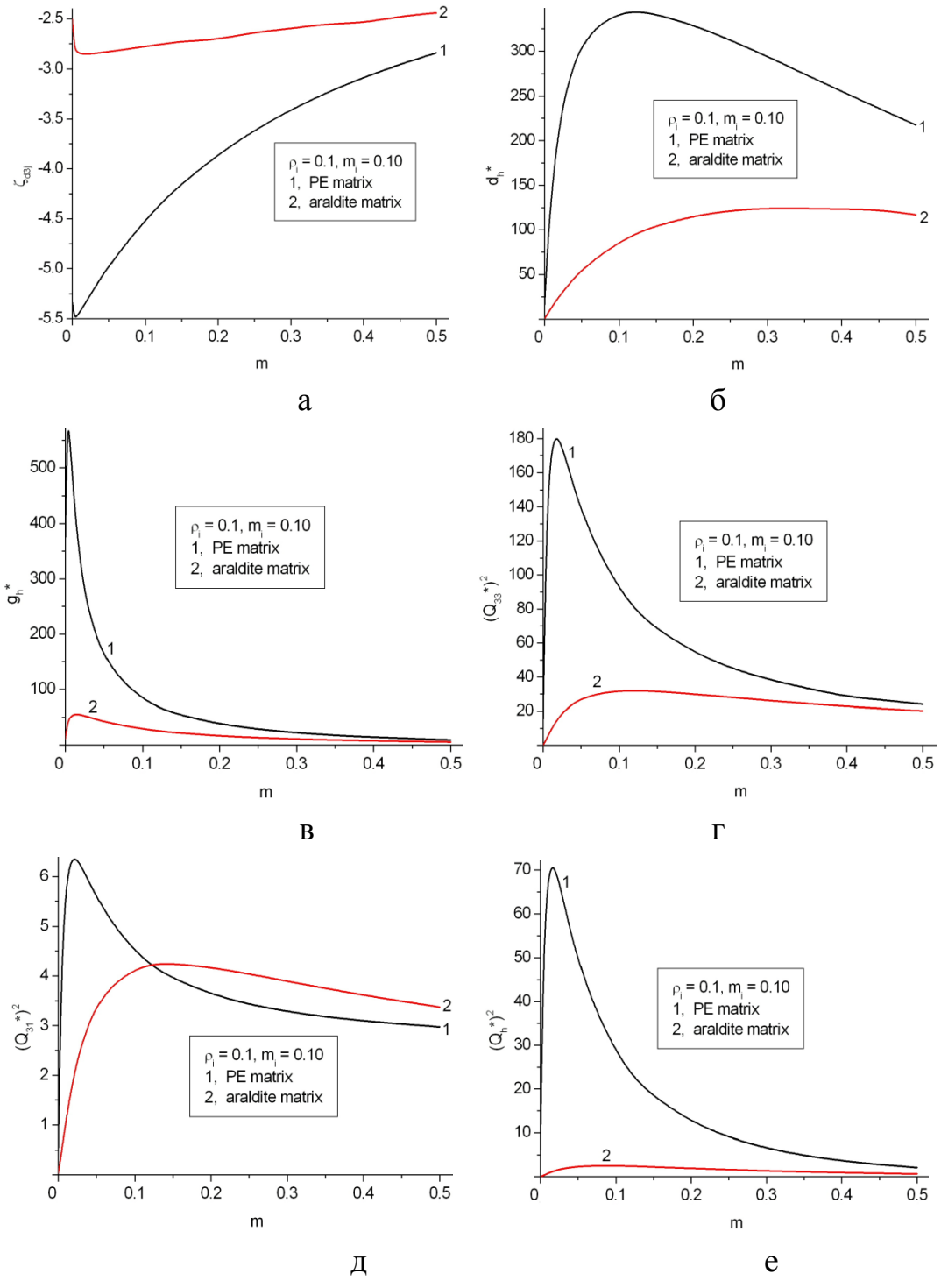


Рис. 1. Фактор анизотропии $\zeta_{d3j} = d^*_{33} / d^*_{31}$ (а), гидростатические пьезокоэффициенты $d^*_h = d^*_{33} + 2\,d^*_{31}$ (б, в пКл / Н), $g^*_h = g^*_{33} + 2\,g^*_{31}$ (в, в мВ·м / Н) и квадраты параметров приёма $(Q^*_{33})^2 = d^*_{33}\,g^*_{33}$ (г, в 10^{-12} $Па^{-1}$), $(Q^*_{31})^2 = d^*_{31}\,g^*_{31}$ (д, в 10^{-12} $Па^{-1}$) и $(Q^*_h)^2 = d^*_h g^*_h$ (е, в 10^{-12} $Па^{-1}$) 1–0–3-композита «СПК ПКР-7М – СПК ЦТС-19 – полимер» при $\rho_i = 0{,}1$ и $m_i = 0{,}10$, где полимер – полиэтилен (кривые 1) или аральдит (кривые 2).

Пьезочувствительность и пьезоэлектрическая анизотропия пористых композитных материалов на основе Pb(Zr, Ti)O_3

С.Е. Филиппов [1]***, А.А. Воронцов*** [1]***, В.Ю. Тополов*** [2]***, Брыль О.Е.*** [1]

[1] *НКТБ «Пьезоприбор», Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

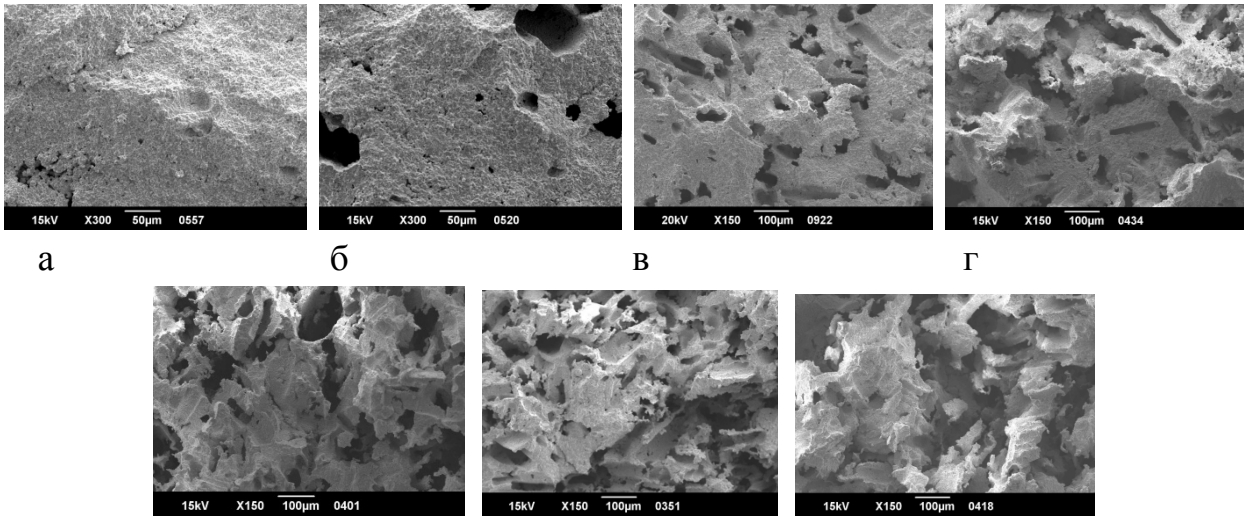
[2] *Физический факультет, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Как известно, пористые материалы на основе сегнетопьезокерамики (СПК) характеризуются относительно высокими значениями [1] пьезокоэффициента g_{33}^*, гидростатических пьезокоэффициентов d_h^* и g_h^*, квадратов параметров приема $(Q_{33}^*)^2 = d_{33}^* g_{33}^*$ и $(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^*$ и т.д. Важную роль в формировании высоких значений вышеупомянутых и других эффективных параметров основе СПК Pb(Zr, Ti)O_3 играет микрогеометрический фактор. В настоящем сообщении рассматривается связь между эффективными параметрами пористых композитов и изменениями их микрогеометрии в широком интервале пористости v_p.

Образцы пористых композитов изготовлены в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ методом компрессионного прессования при давлении до $6 \cdot 10^7$ Па с последующим формированием пористого каркаса и спеканием определенных (в зависимости от заданной пористости m_p) количеств СПК компонента. В полученных образцах достигалась наибольшая объемная концентрация пор $v_p \approx 0{,}60$. Примеры микроструктуры пористых образцов представлены на рис. 1.

Интерпретация экспериментальных данных проводится в рамках модели пористой СПК (рис. 2, а), представляющей собой «композит в композите». При этом существенными являются элементы связности 1–3, т.е. система длинных пьезоактивных стержней в протяженной матрице. Непрерывное распределение СПК компонента в одном направлении (вдоль оси поляризации OX_3) приводит к слабому изменению пьезомодуля $d_{33}^*(v_p)$ и влияет на пьезоэлектрическую анизотропию пористых образцов. Предполагается, что СПК стержни в форме кругового цилиндра регулярно распределены по образцу. Окружающая стержни керамическая матрица является пористой и описывается связностью 3–0. Каждая воздушная пора

характеризуется отношением длин полуосей сфероида $\rho_p = a_1 / a_3 \geq 1$. Поры считаются равномерно распределенными по всей матрице, а линейные размеры отдельной поры – значительно меньшими радиуса СПК стержня. Нами рассматриваются случаи пористой матрицы, поляризованной вдоль OX_3 и неполяризованной. Присутствие пор с $\rho_p \geq 1$ позволяет варьировать отношения модулей упругости пористой матрицы $c_{11}^{(2)E} / c_{13}^{(2)E}$ и $c_{11}^{(2)E} / c_{33}^{(2)E}$, что существенно влияет на поперечные (d_{31}^*, g_{31}^*) и гидростатические (d_h^*, g_h^*) пьезокоэффициенты. Данные на рис. 2, б – г указывают на применимость модели «композит в композите» (рис. 2, а) для интерпретации экспериментальных зависимостей ряда эффективных параметров пьезоактивного материала от пористости v_p.



а б в г

д е ж

Рис. 1. Сколы микроструктур пористых образцов ЦТС-19 при пористости v_p = 0,02 (а), 0,06 (б), 0,10 (в), 0,18 (г), 0,22 (д), 0,26 (е), 0,30 (ж). Сколы выполнены перпендикулярно направлению поляризации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

[1] Topolov V.Yu., Glushanin S.V., Bowen C.R. // Adv. Appl. Ceramics.– 2005. – Vol. 104, N 6.– P.300–305.

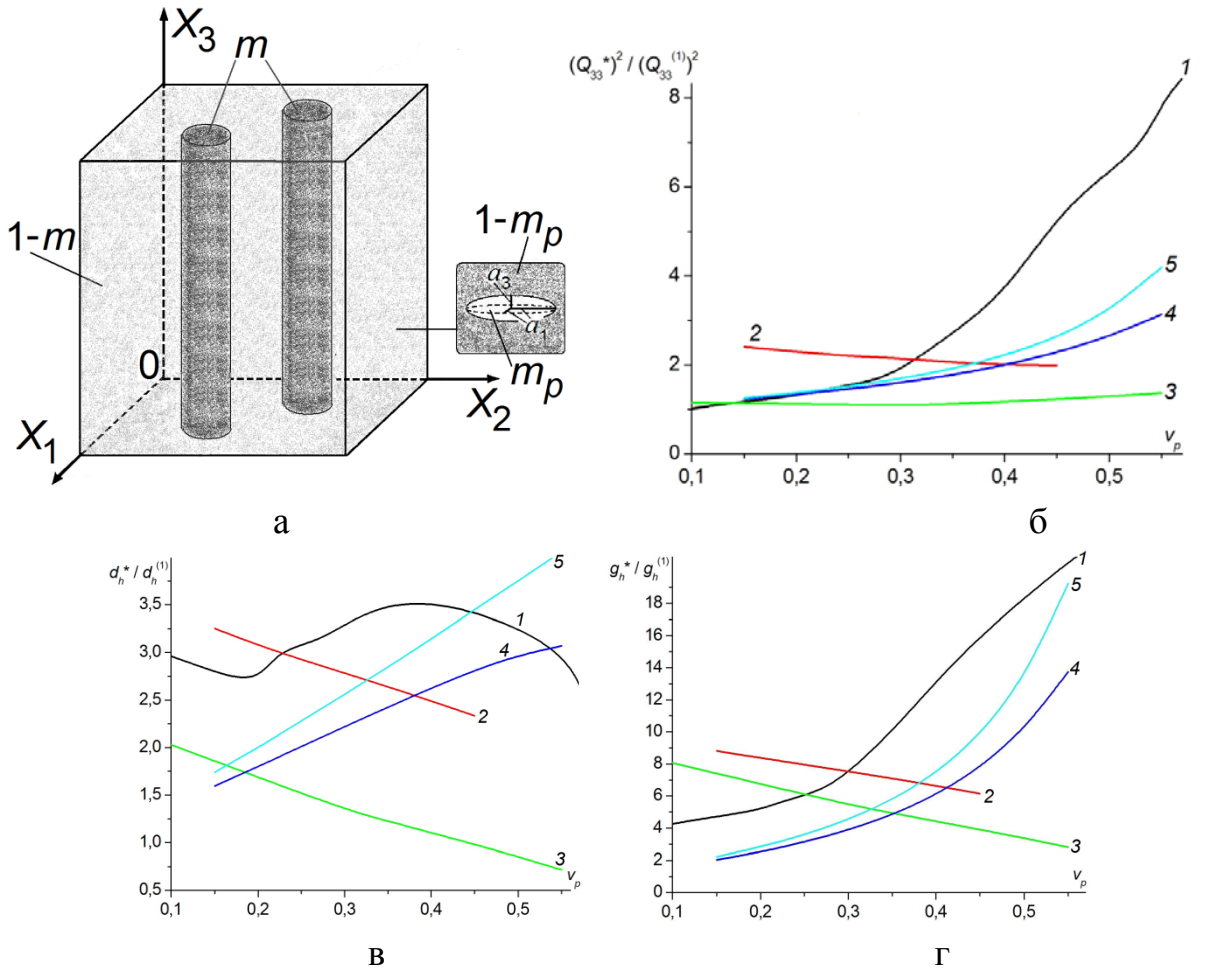


Рис. 2. Схематические изображение элементов пористого материала (а) и концентрационные зависимости нормированного квадрата параметра приема $(Q_{33}^{*})^2/(Q_{33}^{(1)})^2$ (б), нормированного гидростатического пьезомодуля $d_h^*/d_h^{(1)}$ (в) и нормированного гидростатического пьезокоэффициента $g_h^*/g_h^{(1)}$ (г) пористого композита на основе СПК ЦТС-19. На схеме (а) m и 1 – m – объемные концентрации монолитных СПК стержней и пористой керамической матрицы соответственно, m_p – объемная концентрация пор в пористой керамической матрице, a_f – длины полуосей сфероидальной поры. Кривая 1 построена по экспериментальным данным, кривая 2 рассчитана для системы «СПК стержни – пористая матрица с m_p = 0,5, ρ_p = 1», кривая 3 – для системы «СПК стержни – пористая матрица с m_p = 0,6, ρ_p = 1,5», кривая 4 – для системы «СПК стержни – неполяризованная пористая матрица с m_p = 0,7, ρ_p = 10», а кривая 5 – для системы «СПК стержни – неполяризованная пористая матрица с m_p = 0,7, ρ_p = 100».

Взаимосвязи «микрогеометрия – факторы анизотропии» в высокоанизотропных 1–3–0-композитах на основе сегнетопьезокерамики типа ЦТС

В.Ю. Тополов[1], С.Е. Филиппов[2], А.Е. Панич[2], Е.А. Панич[2]

[1] Физический факультет, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

[2] НКТБ «Пьезоприбор», Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Модификация структуры композитов на основе сегнетопьезокерамики (СПК) может приводить к повышению пьезочувствительности, пьезоактивности, гидростатических пьезокоэффициентов и других параметров [1]. В настоящей работе рассматриваются композиты типа 1–3, в которых достигается большая анизотропия электромеханических свойств при изменении микрогеометрических характеристик пористой полимерной матрицы.

Предполагается, что композит содержит систему СПК цилиндрических стержней, регулярно распределенных в пористой полимерной матрице (рис. 1). Вектор остаточной поляризации каждого стержня $\boldsymbol{P}_r^{(1)} \uparrow\uparrow OX_3$, а электроды, нанесённые на образец, параллельны плоскости (X_1OX_2). Полимерная матрица содержит сфероидальные поры, которые распределены регулярно и описываются уравнением поверхности $(x_1 / a_1)^2 + (x_2 / a_1)^2 + (x_3 / a_3)^2 = 1$, где a_1 и a_3 – длины полуосей поры. Считается, что длина наибольшей полуоси поры значительно меньше радиуса стержня. Исследуемый композит (рис. 1) характеризуется связностью 1–3–0, а его электромеханические свойства определяются по методу эффективного поля [2] в два этапа как функции объёмной концентрации СПК m, пористости m_p и отношения длин полуосей поры $\rho_p = a_1 / a_3$. Анизотропия электромеханических свойств композита описывается с помощью факторов анизотропии $\zeta_{d3j} = d^*_{33} / d^*_{31}$, $\zeta_{k3j} = k^*_{33} / k^*_{31} = \zeta_{d3j}(s^{*E}_{11} / s^{*E}_{33})^{1/2}$ и $\zeta_{kt\text{-}p} = k^*_t / k^*_p$, где d^*_{3j} – пьезомодули, k^*_{3j}, k^*_t, k^*_p – коэффициенты электромеханической связи, s^{*E}_{ab} – упругие податливости при постоянном электрическом поле.

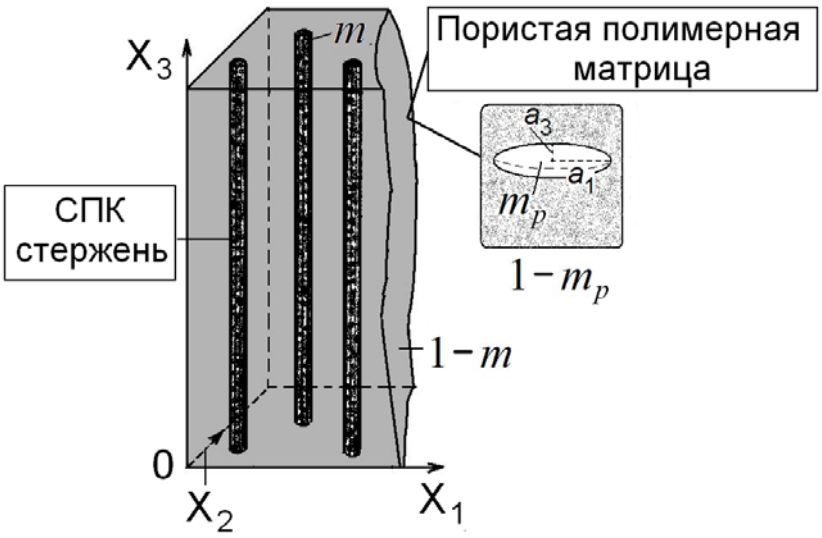


Рис. 1. Схематическое изображение 1–3–0-композита на основе СПК. $(X_1X_2X_3)$ – прямоугольная система координат.

Примеры поведения факторов анизотропии при изменении параметров m_p и ρ_p пористой матрицы и при различных полимерных компонентах показаны на рис. 2 и в таблице. Сплющивание пор, увеличение их объемной концентрации внутри полимерной среды и увеличение упругой податливости полимера способствуют возрастанию по модулю всех трёх факторов анизотропии. Это связано с отношениями между модулями упругости пористой среды $c_{33}^{(3)}/c_{13}^{(3)}$ и $c_{11}^{(3)}/c_{13}^{(3)}$, влияющими на пьезоэлектрическое поведение композита типа 1–3.

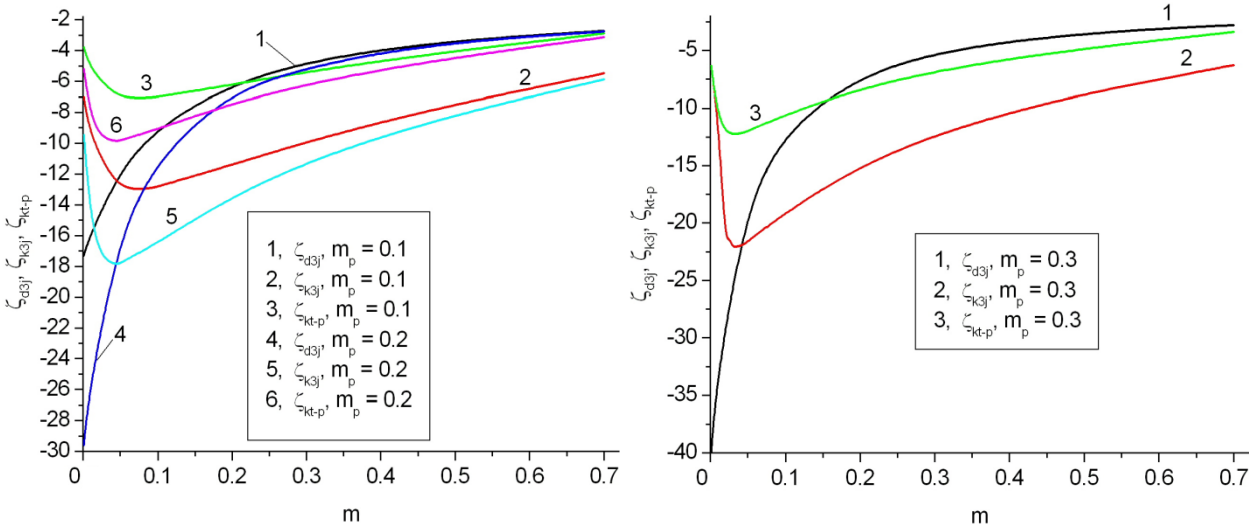


Рис. 2. Концентрационные зависимости факторов анизотропии 1–3–0-композита «СПК ПКР-7М – пористый полиуретан» при $0{,}1 \le m_p \le 0{,}3$ и $\rho_p = 100$.

Таблица. Минимумы факторов анизотропии ζ_{k3j} и $\zeta_{kt\text{-}p}$ и связанные с ними коэффициенты электромеханической связи k_{33}^* и k_t^* 1–3–0-композита «СПК ЦТС-19 – пористый полимер»

ρ_p	m_p	$\min\zeta_{k3j}$	$\min\zeta_{kt\text{-}p}$	k_{33}^* в точке $\min\zeta_{k3j}$	k_t^* в точке $\min\zeta_{kt\text{-}p}$
Матрица из пористого полиэтилена (ρ_p; m_p)					
0,1	0,1	–15,7 (m = 0,272)	–9,37 (m = 0,265)	0,639	0,637
	0,2	–17,9 (m = 0,273)	–10,6 (m = 0,268)	0,640	0,638
	0,3	–20,3 (m = 0,276)	–12,1 (m = 0,271)	0,641	0,640
1	0,1	–15,0 (m = 0,267)	–9,01 (m = 0,264)	0,640	0,637
	0,2	–16,5 (m = 0,272)	–9,90 (m = 0,266)	0,641	0,639
	0,3	–18,2 (m = 0,274)	–10,9 (m = 0,269)	0,642	0,640
10	0,1	–18,9 (m = 0,160)	–11,6 (m = 0,155)	0,639	0,637
	0,2	–22,8 (m = 0,123)	–14,1 (m = 0,120)	0,639	0,638
	0,3	–26,5 (m = 0,105)	–16,4 (m = 0,103)	0,640	0,639
Матрица из пористого аральдита (ρ_p; m_p)					
0,1	0,1	–4,82 (m = 0,400)	–2,43 (m = 0,412)	0,626	0,596
	0,2	–5,43 (m = 0,398)	–2,83 (m = 0,407)	0,628	0,606
	0,3	–6,11 (m = 0,399)	–3,35 (m = 0,406)	0,630	0,613
1	0,1	–4,69 (m = 0,395)	–2,27 (m = 0,415)	0,627	0,593
	0,2	–5,16 (m = 0,390)	–2,50 (m = 0,410)	0,630	0,602
	0,3	–5,70 (m = 0,385)	–2,77 (m = 0,405)	0,633	0,610
10	0,1	–5,59 (m = 0,292)	–2,86 (m = 0,300)	0,626	0,605
	0,2	–6,72 (m = 0,239)	–3,51 (m = 0,245)	0,629	0,614
	0,3	–7,79 (m = 0,208)	–4,12 (m = 0,212)	0,632	0,621

Для сравнения укажем, что модуль упругости c_{11} монолитного аральдита примерно в 2 и 10 раз превышает c_{11} полиуретана и полиэтилена соответственно.

Полученные результаты указывают на возможности применения 1–3–0-композитов в качестве пьезоэлементов с достаточно большими значениями k_{33}^*, k_t^*, $|\zeta_{d3j}| >> 1$, $|\zeta_{k3j}| >> 1$ и/или $|\zeta_{kt\text{-}p}| >> 1$. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

[1] Topolov V.Yu., Panich A.E. // Ferroelectrics.– 2009.– Vol. 392.– P.107–119.
[2] Topolov V.Yu., Bowen C.R. Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics.– London: Springer, 2009.– 202 p.

Организация производства изделий из пьезокерамики в «Южном филиале ОАО «Концерн «Океанприбор»

Е.В. Аксенов, П.И. Александров

Открытое акционерное общество «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, Россия

ОАО «Концерн «Океанприбор создает производство пьезоэлементов на территории дочернего предприятия ОАО «Таганрогский завод «Прибой», г. Таганрог с ориентацией на программу выпуска гидроакустических антенн для корабельных, авиационных и стационарных гидроакустических средств гражданского и военного назначения на ближайшие 15-20 лет. Планируется создание «Южного филиала» ОАО «Концерн «Океанприбор» в г. Таганрог. С целью создания производства приобретено здание и земельный участок.

Создаваемое высокотехнологичное производство предназначено для изготовления пьезоэлементов, обеспечивающих создание стабильных, высокочувствительных электроакустических преобразователей для нужд судового приборостроения и других отраслей народного хозяйства.

Проектом, в рамках которого создается данное производство, является ОКР по теме: «Создание высокотехнологичного производства пьезоэлементов из высокоэффективных ультрадисперсных материалов с использованием нанотехнологий».

Инициатором проекта создания высокотехнологичного производства пьезоэлементов является ОАО «Концерн Океанприбор», которому в соответствии с Государственным контрактом между Южным федеральным университетом (ЮФУ) и Министерством образования и науки Российской Федерации должны быть переданы результаты научно-технической деятельности, полученные в рамках ОКР, для коммерциализации результатов работы на территории Российской Федерации за счет средств внебюджетных источников.

В ходе выполнения ОКР разработаны технологические процессы производства пьезокерамических материалов и пьезоэлементов из них. Пьезоэлементы имеют различные типоразмеры. Определены состав исходного сырья для производства материалов и перечень технологического оборудования серийного производства пьезоэлементов.

Материалы пьезокерамические представляют собой твердые растворы на основе цирконата-титана свинца с добавлением бария и стронция в виде порошка и предназначены для производства пьезоэлементов, обеспечивающих создание стабильных, высокочувствительных электроакустических устройств для нужд судового приборостроения и других отраслей народного хозяйства. Параметры разрабатываемых пьезокерамических материалов, а так же характеристики разрабатываемых пьезоэлементов, находятся на уровне предельных “природных” физических возможностей используемых сегнетоэлектрических систем на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) и не уступают зарубежным аналогам.

Технологии, разработанные ЮФУ в рамках ОКР, охватывают все основные процессы, входящие в технологию изготовления пьезокерамических изделий. Они включают в себя операции от входного контроля исходного сырья до маркировки и упаковки готовых пьезокерамических элементов. Основной целью данной работы являлось освоение существующих промышленных технологий изготовления пьезокерамических изделий с последующим их внедрением на создаваемом производстве.

Одной из многих проблем, которая возникла на пути реализации выше названых мероприятий и внедрения технологий является техническое оснащение. Кроме необходимости освоить и воссоздать указанные технологии, стоит цель максимально автоматизировать технологический процесс, свести к минимуму межоперационное время, а также время и средства, затрачиваемые на подготовительные работы. При этом преследуются и иные цели, а именно: обеспечить высокую повторяемость

результата и неизменное качество исполнения как отдельных технологических операций, так и всего процесса в целом. Не маловажной является и задача сведения человеческого фактора к возможному минимуму. Достижение вышеназванных целей позволит в значительной степени сократить и время выполнения отдельных технологических операций.

При подборе типов и видов технологического оборудования, задействованного на различных этапах техпроцесса, учитывались два направления: применение классического (в т.ч. универсального) и специализированного автоматизированного технологического оборудования.

Основным направлением модернизации продукции пьезоэлементов на этапе освоения серийного производства является расширение номенклатуры пьезоэлементов определенных типоразмеров, изготавливаемых из освоенных материалов, для использования в каждом конкретном случае в конструкции того или иного преобразователя.

Разработка новых составов пьезокерамики с улучшенными параметрами будет возможна на следующих этапах работ за счет совершенствования технологических процессов и модернизации создаваемого в рамках данного проекта производства.

Производство пьезоэлементов, создаваемое в ОАО «Концерн «Океанприбор», ориентируется на программу выпуска гидроакустических антенн для корабельных, авиационных и стационарных гидроакустических средств гражданского и военного назначения на ближайшие 15-20 лет.

Основными потребителями пьезоэлементов являются предприятия, входящие в интегрированную структуру ОАО «Концерн «Океанприбор», это – ОАО «Водтрансприбор» и ОАО «Таганрогский завод «Прибой».

Влияние характеристик частиц порошков пьезофаз системы ЦТС на электрофизические свойства изготовленной из них пьезокерамики

А.А. Нестеров, А.А. Панич, В.К. Доля, Л.Ю. Кудлай, М.А. Мараховский

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Электрофизические параметры (ЭФП) пьезокерамических материалов предопределяются степенью и видом их структурирования на нано- мезо- микро- и макроуровнях. Это связано с тем, что они зависят не только от факторов, влияющих на значение спонтанной поляризации микрочастиц в заданном температурном интервале, но также от архитектуры образца, совокупность элементов которой предопределяет его механические характеристики. Многообразие факторов, способных варьировать ЭФП пьезокерамики, с одной стороны, затрудняет создание технологий, позволяющих повысить воспроизводимость конечного продукта, но с другой открывают возможность создания материалов с задаваемой совокупностью механических, пьезоэлектрических и диэлектрических свойств.

Очевидно, что все виды структурирования неразрывно связаны между собой и любые изменения в одном из них неизбежно приведут к большим или меньшим изменениям (количественного или качественного характера) – в других. Поэтому целью данной работы было исследование влияния аморфных ультраразмерных порошков фаз различного состава не только на процесс формирования зёрен при спекании керамики, но и на процессы возможной деградации пьезофазы, лежащей в основе пьезоматериала, а также на элементы её архитектуры.

В качестве модельного объекта использована пьезофаза ЦТС- 36 порошки которой со средним диаметром 0,45 мкм были получены методом «химической сборки». В качестве добавок использованы ультрадисперсные аморфные порошки на основе фаз системы Bi_2O_3 – CdO – NiO (или Co_3O_4) , полученные конденсационными (диметр частиц менее 220 нм) и дисперсионными методами (диметр частиц менее 340 нм). Выбор данной системы предопределялся широкой областью существования в ней стеклофаз с относительно низкими температурами их размягчения (порядка 800^{o}C), хорошим смачиваем зерен керамики

расплавом, а также малой вероятностью химического взаимодействия добавок с пьезофазой.

Для изготовления шихты, суспензия порошка стеклофазы в этаноле смешивалась с порошком пьезофазы в планетарной мельнице. Отдельные партии полученных заготовок обжигались при температурах 900, 1000, 1050, 1100, 1150 и 1200^{o}C (время изотермического обжига от 1 до 6 часов). Плотность образующейся керамики, содержащей менее 2,5 мас.% добавки любого вида, в интервале температур 900 – 1100^{o}C растет, как по мере увеличения времени, так и температуры нагревания. Рост температуры спекания не способствует дальнейшему росту плотности образцов, что связано с резким увеличением в них скорости вторичной рекристаллизации.

ЭФП пьезокерамических образцов, спеченных при 980^{o}C представлены в таблице 1.

Таблица 1 - ЭФП пьезокерамических образцов, спеченных при 980^{o}C

ЭФП, ед.изм	Номер контрольной партии*									
	1.1	2.1	3.1	1.2	2.2	3.2	1.3	2.3	3.3	ПКР – 1**
$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	1870	1900	1940	1910	1890	1850	1890	1880	1850	700
tgδ,%	1.5	1,9	2,1	2,2	1,9	1,9	2.1	1,8	1,7	2,0
d_{31},пКл/Н	145	135	130	150	165	185	160	155	150	100
d_{33},пКл/Н	365	330	320	390	440	460	400	380	375	240
Q_m	64	67	71	69	63	60	65	70	76	90
V_1^E, м/с	3080	3150	3190	3020	2980	2950	3040	3110	3150	-
$P_{ср}$, г/см^3	7,55	7,52	7,48	7,46	7,50	7,55	7,49	7,54	7,51	7,42

* партии отличались между собой массовой долей аморфной добавки, её составом и температурой спекания образцов

** Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезоэлектрические материалы. Ростов-на-Дону, РГУ. 1983. 160 с.

Обсуждены перспективы дальнейшего повышения пьезопараметров путём оптимизации процесса спекания.

Таблица 1 – Содержание стеклофазы в масс.% в составе материала

Условный состав стеклофазы		$Bi_8Cd_3Me_3O_{18}$ вариант 1	$Bi_8Cd_2Me_3O_{17}$ вариант 2	$Bi_8CdMe_3O_{16}$ вариант 3
Номер партии	Содержание стеклофазы в шихте, масс.%			
	1.1., 1.2., 1.3*	1,0	1,0	1,0
	2.1., 2.2., 2.3	1,5	1,5	1,5
	3.1., 3.2., 3.3	2,0	1,9	2,0

Установлено, что указанные изменения в системах зависят не только от условий спекания керамики, но и от размеров частиц, вводимых в шихту стеклофаз системы B_2O_3 – PbO – ZnO, а также от способов их синтеза. Отмечено изменение точки Кюри пьезоматериалов с ростом концентрации добавки в системе. В работе обсуждены механизмы взаимодействия стекла с пьезофазой, и возможности использования полученных результатов в технологии пьезокерамики.

Пьезоматериалы на основе ромбической фаза $PbNb_2O_6$ представляют интерес в связи с из достаточно высокими объёмными пьезопараметрами. Так, например, пьезокерамика на её основе имеет соотношение $-d_{33}/d_{31} > 3$ и значение g_v на уровне порядка $35 \cdot 10^{-3}$ В•м/Н. Однако, в настоящее время, материалы данного типа практически не используются в связи со значительными технологическими трудностями их изготовления. Они связаны с тем, что у ниобата свинца сегнетоэлектрические свойства имеет только метастабильная ромбическая фаза, образующаяся в результате закалки высокотемпературной тетрагональной фазы от температуры > 1240°С. При охлаждении тетрагональной фазы в условиях близких к равновесным, при ~1230°С, в системе формируется ромбоэдрическая фаза, не имеющая сегнетоэлектрических свойств. Указанные особенности фазовых равновесии в системе PbO - Nb_2O_5 делают невозможным получение любых типов пьезоматериалов на основе $PbNb_2O_6$ ниже 1240°С. Однако, при столь высоких температурах наблюдается частичная потеря системой оксида свинца. Нарушение состава системы приводит к образованию примеси в виде фазы $PbNb_4O_{11}$, не обладающей сегнетоэлектрическими свойствами, и ухудшающей электрофизические параметры (ЭФП) получаемого пьезоматериала. Не решает проблему и введение в систему на этапе синтеза целевой фазы избытка PbO, так как это способствует образованию в ней фаз со структурой типа пирохлора

различного состава, что приводит к росту электропроводности образцов и значительному снижению их пьезоактивности. Кроме того, высокие температуры спекания прессзаготовок (выше 1240°С) способствуют увеличению скорости вторичной рекристаллизации образцов, а, следовательно, к снижению плотности получаемой керамики.

Для устранения этих недостатков нами была предпринята попытка стабилизации сегнетоэлектрической фазы метаниобата свинца путём её легирования. При этом одной из задач являлось получение высокоэффективных керамических пьезоматериалов на основе ромбической фазы, подобной $PbNb_2O_6$, с высокими значениями температур Кюри. Вторая задача заключалась в нахождении приёмов стабилизации таких фаз, т.е. в изменении фазовых равновесий в рассматриваемой системе.

Из нескольких возможных вариантов, с учётом требований по сохранению высоких значений температур Кюри материалов, нами был выбран приём, позволяющий сохранить кислородно - октаэдрический остов сегнетофазы. При этом предполагалось, что будет регулироваться степень дефектности фазы по позиции (А). В связи с этим, нами для стабилизации ромбической сегнетофазы нами был выбран оксид вольфрама (VI) (структура типа ReO_3). Контрольные образцы состава $Pb_{1-x}Nb_{2-x}W_xO_6$ (х от 0 до 0,3) были получены при 850-1250°С (в субсолидусной области системы) в рамках метода твёрдофазных реакций (МТФР), с контролем образующихся фаз методом РФА.

Согласно полученным данным, введение в систему WO_3 способствует стабилизации сегнетофазы со структурой тетрагональной калий вольфрамовой бронзы (ТКВБ). Установлено, что температура, при которой в процессе обжига прессзаготовок исчезает ромбоэдрическая фаза, снижается по мере роста концентрации WO_3 в системе с 1200°С (добавка 5 мол.% WO_3) до 900°С (20 мол.% WO_3). Следует отметить, что в этом случае фазы со структурой ТКВБ могут быть получены без закалки образцов от соответствующих температур и стабильны к длительному отжигу при Т = 400-700°С. Согласно данным РФА растворимость WO_3 в ромбическом $PbNb_2O_6$ достигает 27,5 мол.% WO_3. По мере увеличения концентрации WO_3 в системе наблюдается уменьшение параметра (в) ромбической элементарной ячейки, при практически неизменных значениях параметров (а) и (с).

Образцы плотной керамики состава $(1-x)PbNb_2O_6 \bullet xWO_3$ могут быть получены при температурах спекания 1030-1190°С, что на 50-250°С ниже, чем для чистого $PbNb_2O_6$ (ромбическая фаза). Более низкие температуры спекания уменьшают вероятность нарушения состава керамики за счёт потери PbO, что резко снижает процент брака в пределах партии. Электрофизические свойства образцов системы $PbNb_2O_6$ - WO_3 представлены в таблицах 1 и 2

Таблица 1 – Диэлектрические свойства керамических образцов диаметром 10 мм и высотой 1 мм на основе фаз системы $PbNb_2O_6$ - WO_3.

Содержание в образце WO_3 мол.%	ε при 20°С	ε при T_c	tg δ при 20°С	tg δ при T_c	T_c°С	θ °С	$C_w \bullet 10^5$
3	165	5060	0,0073	0,82	552	512	2,2
5	250	3960	0,0056	0,44	515	460	2,4
15	280	3080	0,0080	0,41	481	415	2,2
20	380	2940	0,0183	0,43	439	395	2,3
25	440	3040	0,0257	0,51	412	285	4,0

ε - диэлектрическая проницаемость, T_c - точка Кюри, tg δ - тангенс угла диэлектрических потерь, θ - температура Кюри- Вейса, C_w - постоянная Кюри-Вейса.

Таблица 2 - ЭФП керамических образцов* диаметром 10 мм и высотой 1 мм на основе фаз системы $PbNb_2O_6$ - WO_3 (электроды серебряные)

мол.% WO_3 в образцах	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$	d_{33} пК/Н	$g_{33} \bullet 10^3$ В•м/Н	$g_v \bullet 10^3$ В•м/Н	d_{33}/d_{31}
3	165	80	54	29	4,3
5	250	115	54	29	4,5
15	280	69	27	12	3,6
20	380	52	15	5	3,0
25	440	19	5	—	—

*поляризация на воздухе при охлаждении образцов от 600°С до комнатной температуры, с увеличением поляризующего поля до 2,5-4,0 кВ/мм, по мере падения проводимости образцов.

Анизотропные пьезоматериалы на основе фаз со структурой типа ТКВБ

А.А. Нестеров, А.Е. Панич, И.В. Рыбальченко, Е.А. Панич

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Пьезоматериалы на основе ромбической фаза $PbNb_2O_6$ представляют интерес в связи с из достаточно высокими объёмными пьезопараметрами. Так, например, пьезокерамика на её основе имеет соотношение $-d_{33}/d_{31} > 3$ и значение g_v на уровне порядка $35 \cdot 10^{-3}$ $В \cdot м / Н$. Однако, в настоящее время, материалы данного типа практически не используются в связи со значительными технологическими трудностями их изготовления. Они связаны с тем, что у ниобата свинца сегнетоэлектрические свойства имеет только метастабильная ромбическая фаза, образующаяся в результате закалки высокотемпературной тетрагональной фазы от температуры > 1240°С. При охлаждении тетрагональной фазы в условиях близких к равновесным, при ~1230°С, в системе формируется ромбоэдрическая фаза, не имеющая сегнетоэлектрических свойств. Указанные особенности фазовых равновесии в системе PbO - Nb_2O_5 делают невозможным получение любых типов пьезоматериалов на основе $PbNb_2O_6$ ниже 1240°С. Однако, при столь высоких температурах наблюдается частичная потеря системой оксида свинца. Нарушение состава системы приводит к образованию примеси в виде фазы $PbNb_4O_{11}$, не обладающей сегнетоэлектрическими свойствами, и ухудшающей электрофизические параметры (ЭФП) получаемого пьезоматериала. Не решает проблему и введение в систему на этапе синтеза целевой фазы избытка PbO, так как это способствует образованию в ней фаз со структурой типа пирохлора различного состава, что приводит к росту электропроводности образцов и значительному снижению их пьезоактивности. Кроме того, высокие температуры спекания прессзаготовок (выше 1240°С) способствуют увеличению скорости вторичной рекристаллизации образцов, а, следовательно, к снижению .плотности получаемой керамики.

Для устранения этих недостатков нами была предпринята попытка стабилизации сегнетоэлектрической фазы метаниобата свинца путём её легирования. При этом одной из задач являлось получение

высокоэффективных керамических пьезоматериалов на основе ромбической фазы, подобной $PbNb_2O_6$, с высокими значениями температур Кюри. Вторая задача заключалась в нахождении приёмов стабилизации таких фаз, т.е. в изменении фазовых равновесий в рассматриваемой системе.

Из нескольких возможных вариантов, с учётом требований по сохранению высоких значений температур Кюри материалов, нами был выбран приём, позволяющий сохранить кислородно - октаэдрический остов сегнетофазы. При этом предполагалось, что будет регулироваться степень дефектности фазы по позиции (А). В связи с этим, нами для стабилизации ромбической сегнетофазы нами был выбран оксид вольфрама (VI) (структура типа ReO_3). Контрольные образцы состава $Pb_{1-x}Nb_{2-x}W_xO_6$ (x от 0 до 0,3) были получены при 850-1250°С (в субсолидусной области системы) в рамках метода твёрдофазных реакций (МТФР), с контролем образующихся фаз методом РФА.

Согласно полученным данным, введение в систему WO_3 способствует стабилизации сегнетофазы со структурой тетрагональной калий вольфрамовой бронзы (ТКВБ). Установлено, что температура, при которой в процессе обжига прессзаготовок исчезает ромбоэдрическая фаза, снижается по мере роста концентрации WO_3 в системе с 1200°С (добавка 5 мол.% WO_3) до 900°С (20 мол.% WO_3). Следует отметить, что в этом случае фазы со структурой ТКВБ могут быть получены без закалки образцов от соответствующих температур и стабильны к длительному отжигу при Т = 400-700°С. Согласно данным РФА растворимость WO_3 в ромбическом $PbNb_2O_6$ достигает 27,5 мол.% WO_3. По мере увеличения концентрации WO_3 в системе наблюдается уменьшение параметра (в) ромбической элементарной ячейки, при практически неизменных значениях параметров (а) и (с).

Образцы плотной керамики состава $(1-x)PbNb_2O_6 \bullet xWO_3$ могут быть получены при температурах спекания 1030-1190°С, что на 50-250°С ниже, чем для чистого $PbNb_2O_6$ (ромбическая фаза). Более низкие температуры спекания уменьшают вероятность нарушения состава керамики за счёт потери PbO, что резко снижает процент брака в пределах партии.

Электрофизические свойства образцов системы $PbNb_2O_6$ - WO_3 представлены в таблицах 1 и 2

Таблица 1 – Диэлектрические свойства керамических образцов диаметром 10 мм и высотой 1 мм на основе фаз системы $PbNb_2O_6$ - WO_3.

Содержание в образце WO_3 мол.%	ε при 20°C	ε при T_c	tg δ при 20°C	tg δ при T_c	T_c°C	θ °C	C_w •10^5
3	165	5060	0,0073	0,82	552	512	2,2
5	250	3960	0,0056	0,44	515	460	2,4
15	280	3080	0,0080	0,41	481	415	2,2
20	380	2940	0,0183	0,43	439	395	2,3
25	440	3040	0,0257	0,51	412	285	4,0

ε - диэлектрическая проницаемость, T_c - точка Кюри, tg δ - тангенс угла диэлектрических потерь, θ - температура Кюри- Вейса, C_w - постоянная Кюри-Вейса.

Таблица 2 - ЭФП керамических образцов* диаметром 10 мм и высотой 1 мм на основе фаз системы $PbNb_2O_6$ - WO_3 (электроды серебряные)

мол.% WO_3 в образцах	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$	d_{33} пК/Н	$g_{33} \cdot 10^3$ В•м/Н	$g_v \cdot 10^3$ В•м/Н	d_{33}/d_{31}
3	165	80	54	29	4,3
5	250	115	54	29	4,5
15	280	69	27	12	3,6
20	380	52	15	5	3,0
25	440	19	5	—	—

*поляризация на воздухе при охлаждении образцов от 600°C до комнатной температуры, с увеличением поляризующего поля до 2,5-4,0 кВ/мм, по мере падения проводимости образцов.

Стеклокомпозиты типа 3 – 0 – 0 для LTCC технологий

А.А. Нестеров, А.А. Панич, И.В. Васильев, Э.К.Самадова

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Разработаны новые технологии изготовления двух типов композиционных материалов со смешанным типом связности микроструктуры: а) сегнетофаза - стеклофаза – полимер (совместно обжигаемая сегнетокерамика в виде сырых сегнетокерамических плёнок) и б) сегнетофаза – стеклофаза (продукт обжига сырых плёнок). В отличие от известных ранее способов формирования подобных материалов, нами впервые использованы нано- и ультрадисперсные порошки легированных фаз системы $BaTiO_3$ - $SrTiO_3$.

Исследованы низкотемпературные процессы введения в сегнетофазы состава $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ легирующих добавок как в позиции (А), так и в позиции (В) кристаллической структуры типа перовскита. На основании результатов исследовательских испытаний разработаны способы изготовления нано- и ультрадисперсных порошков сегнетофаз с равномерным распределением легирующих добавок по объёму системы. Установлено, что замещение иона Ba^{2+} на ионы калия в количестве до 3 мол.% способствуют снижению тангенса угла диэлектрических потерь для композитов типа сегнетофаза – стеклофаза, которые являются целевыми объектами данной работы. Однако указанный тип замещения, формирующий дефекты в анионной подрешётке, не оказывает достаточного влияния влияние на температуру и скорость спекания композиционных материалов типа сегнетофаза - стеклофаза – полимер. Увеличение же в составе сегнетофазы концентрации дефектов по позиции (А), за счёт: а) введения в состав сегнетофазы ионов ниобия, молибдена и вольфрама (фазы состава $Ba_{1-x-y}Sr_xNb_yTi_{1-y}O_{3-y/2}$ и $Ba_{1-x-y}Sr_xM_yTi_{1-y}O_3$ (M = Mo, W) ; б) использование составов, принадлежащих к области гомогенности, прилежащей к TiO_2 (фазы состава $Ba_{1-x-y}Sr_xTiO_{3-y}$) способствует снижению температуры спекания образцов до температуры ниже 890^{o}C и резкому возрастанию скорости процесса синтеза.

Одновременно можно отметить, что образцы легированные ионами ниобия, а также нестехиометрические фазы типа (в) характеризуются дефектностью как по катионной решётке (А), так и по анионной подрешётке. Это позволило создать на основе порошков этих фаз стеклокерамические образцы с аномально низким значением тангенса угла диэлектрических потерь и управляемостью, превосходящей значения этого параметра, представленные в научной литературе.

Для изготовления композиционных материалов со смешанным типом связности микроструктуры типа сегнетофаза - стеклофаза – полимер использован метод шликерного литья на лавсановую подложку. Для достижения оптимальных параметров получаемых материалов, разработана рецептура шликера, позволяющая не только формировать сырые сегнетокерамические плёнки при комнатной температуре, но и регулировать их толщину в пределах от 70 до 300 мкм. рамках значений, заданных в ТЗ.

Разработанный состав шликера обеспечивает режим обжига сырых сегнетокерамических плёнок, аналогичный обжигу промышленных плёнок LTCC типа Green Tape™ 951-P2 и 951-PX.

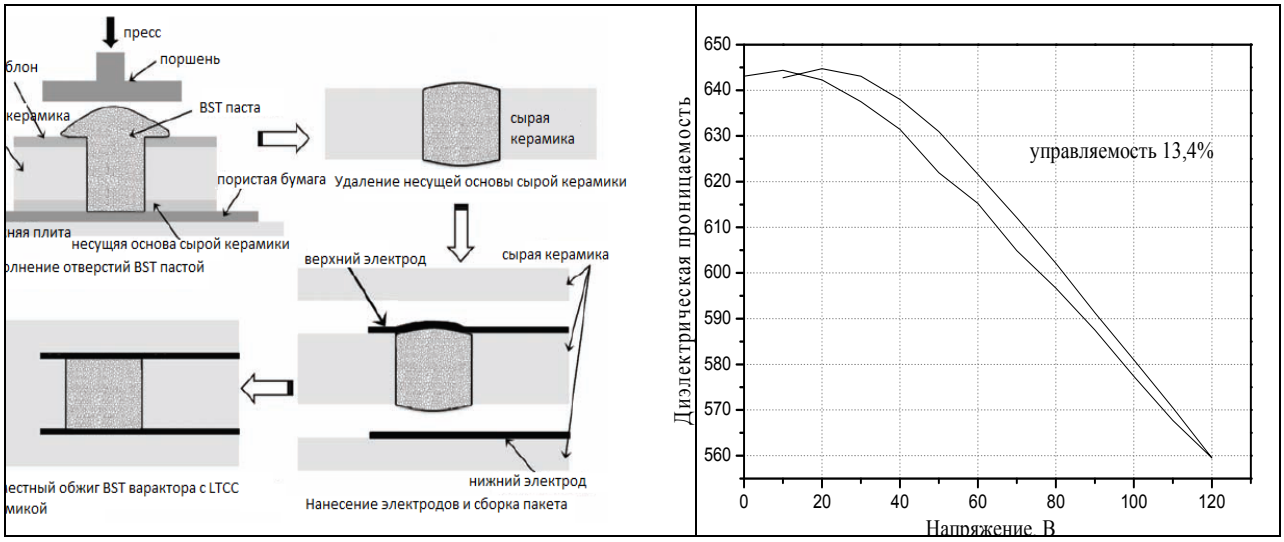


Рисунок 1 – (слева) - схема создания современных гетероструктур на базе LTCC технологий (активный элемент создаётся на основе легированных фаз системы $BaTiO_3$- $SrTiO_3$); (справа) - кривая управляемости диэлектрической проницаемостью для одного «среднего» варактора на основе фазы состава: $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_{2,98}$. $E_{уп.}$ = 2 В/мкм

Пьезокомпозиты типа 1 – 0 – 3 с активными элементами, изготовленными из нано- и ультрадисперсной шихты.

А.А. Нестеров, А.А. Панич, С.Н. Свирская, Е.А. Панич

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Пьезокомпозиты со связностью 3-1, 3-2 и 1-3 являются перспективными материалами для использования из в преобразователях, работающих в режимах излучение-приём. Однако, материалы первых двух типов, даже несмотря на наполнитель, характеризующийся низкой объёмной сжимаемостью, не выдерживают высокого гидростатического давления. В то же время пьезокомпозиты типа 1-3, связующими в которых выступают полимеры с высоким значением модуля Юнга, характеризуются высокой стабильностью свойств к изменению гидростатического давления, но имеют относительно низкую объемную пьезочувствительность. Можно предположить, что достоинства композитов этих типов объединятся в материале, в котором вместо стержней керамики в эпоксидную смолу будут помещены тонкие стержни, изготовленные из среднепористой керамики ЦТС.

Для повышения механической прочности керамических каркасов, изготавливаемых стержней, ультрадисперсный порошок материалов типа ЦТС, синтезируемых для их формирования, получали методом «химической сборки». Для той же цели исходный порошок перед приготовлением шликера обрабатывался раствором соединений бора, висмута, лития и марганца, который после высыхания формирует на поверхности зёрен аморфную фазу, имеющую температуру размягчения порядка 800^{o}C. Стержни для сборки пьезокомпозита (диаметров от 100 до 500 мкм) были изготовлены методом экструзии. Шликер для формирования первичных заготовок включал до 85 объ.% ультрадисперсного порошка одной из модификаций ЦТС, переменное количество порообразователя, растворимого в жидкой фазе, а также водные растворы, содержащие, ПАВ и связующие (смесь полимерных спиртов, альдегидов и аминов). Полученные в процессе экструзии стержни высушивались и обжигались

при температурах от 1000°С до 1200°С. Плотность керамики определялась методом гидростатического взвешивания - ГОСТ 2409–67 (жидкая среда - октан).

Торцы стержней металлизировались (серебросодержащая паста, метод вжигания). Полученные образцы помещались в специальную кассету, изготовленную из диэлектрика с электрическим сопротивлением более высоким, чем у пьезокерамики и поляризовались полем от 2,5 до 4 кВ/мм при температурах от 50 до 120°С, в зависимости от состава сегнетофазы.

Для изготовления пьезокомпозитов поляризованные стержни размещались на липкой ленте полимера, параллельно друг другу. Полученный промежуточный продукт сборки помещался в плоскую полиэтиленовую кювету, в которую добавлялся жидкий компаунд, состав связующего в котором, был идентичен полимеру липкой ленты. Указанная технология позволяет изготавливать три типа конечных изделий: ленточного, спирального и объёмного типа.

Электрофизические параметры (ЭФП) пьезокомпозитов типа 1 – 0 – 3 объёмного типа, изготовленного в виде блоков, склеенных между собой в направлении оси поляризации, представлены в таблице 1. Там же приведены ЭФП композитов типа 1 – 3.

Таблица 1 - ЭФП пьезокомпозитов 1 – 3 и 1 – 0 – 3 (ЦТС-19М – Формосил)

тип связности	тип матрицы	ЦТС об.%	$\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_o$	$d_V \cdot 10^{12}$ К/Н	$g_V \cdot 10^{3}$ В•м/Н	$d_V \cdot g_V \cdot 10^{12}$ $м^2$/Н
1 – 3	сплошная	23,4	215	47	24	1,13
1 - 3	пористая	23,8	220	85	44	3,74
1 – 0 – 3*	сплошная	29,4	164	98	68	6,62
1 – 0 – 3*	пористая	28,7	158	125	89	11,17

(*) – общая пористость стержней 32 – 35%

Обсуждены способы варьирования ЭФП пьезокомпозитов со связностью типа 1 – 0 – 3 за счёт использования связующих с различными значениями коэффициентов Пуассона и модуля Юнга, в том числе изменяемых с помощью различных технологических приёмов

Мелкозернистые керамические пьезоматериалы на основе фаз систем $PbTiO_3$ –$MeTiO_3$ и $PbTiO_3$ –$MeZrO_3$ (Me = Ca, Sr)

А.А. Нестеров, И.В. Васильев, Л.Ю. Кудлай, Э.К. Самадова

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

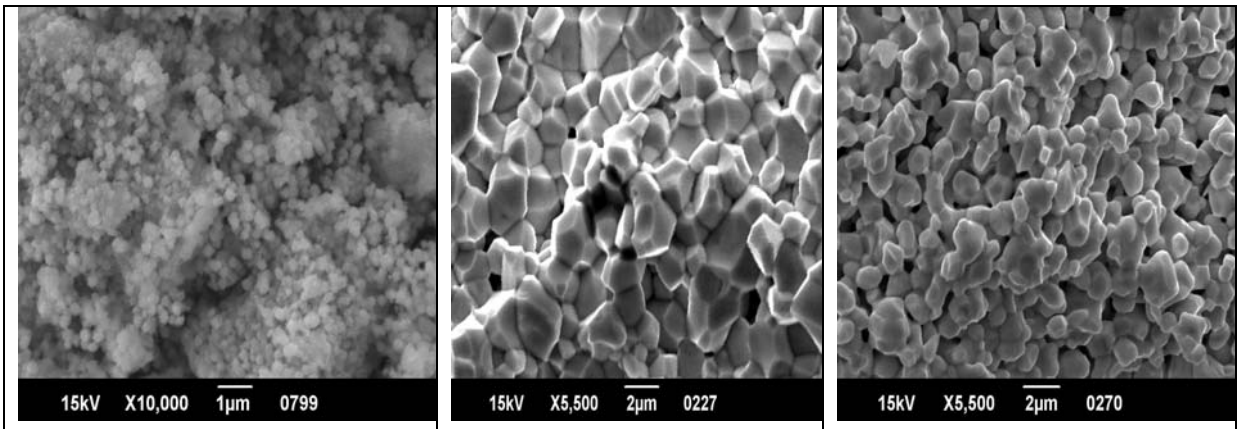
Среди пьезопреобразователей различного типа важное место занимают изделия, способные непосредственно трансформировать всестороннее переменное давление в электрический сигнал. В частности, они используются при изготовлении ряда ультразвуковых приборов: медицинской диагностики, микрофонов, гидрофонов, датчиков неразрушающего контроля конструкций, например, акусто-эмиссионные системы - АЭС и т.д.. В качестве основы этих преобразователей выступают объёмночувствительные керамические, текстурированные или композиционные пьезоматериалы, изготовленные с использованием пьезофаз кислородно-октаэдрического, сульфидного и сульфогалогенидного типа. Не смотря на различия в названиях, все объёмночувствительные материалы являются пьезокомпозитами с различным типом связности фаз в системе. Так, рассмотренные ниже «керамические» объёмночувствительные материалы на основе фаз легированного $PbTiO_3$, представляют собой пьезокомпозиты типа пьезофаза – воздух. В связи с этим, совокупность их механических и электрофизических свойств (при фиксированном составе и кристаллографическом строении пьезофазы), будет предопределяться архитектурой образца, т.е. строением его микроуровня (размер, форма зёрен и пор керамики, а также тип их связности в системе).

В свою очередь, строение элементарной ячейки пьезофазы, а также архитектура керамического каркаса материала, будут влиять на тип его доменной структуры материала, что будет изменять значения коэрцитивных полей образцов, а также величины их остаточной поляризации.

Анизотропия материалов данного типа связана с частичным разрушением керамического каркаса при действии на образец электрических полей высокой напряжённости. Это связано с тем, что в материалах на их основе пьезофаз, имеющих высокое значение спонтанной

поляризации (в соответствии с уравнениями, описывающими пьезоэффект) возникает значительная объёмная деформация, вызывающая появление в них локальных механических напряжений. Снижение величины этих напряжений в системе достигается за счёт возникновения в объёме образца совокупности микротрещин, которые могут развиваться в процессе последующей поляризации материала. Первоначальный характер распределения микротрещин в системе, по-видимому, носит вероятностный характер. Поэтому при поляризации образца скорость их развития будет различной: трещины, преимущественно, ориентированные по направлению приложенного поля, будут развиваться быстрее, чем трещины, ориентированные в перпендикулярном направлении. Одним из веществ, удовлетворяющим сформулированным требованиям является $PbTiO_3$. Однако, в связи с существенным изменением строения этого вещества при переходе от парафазы к сегнетофазе, связанным со значительным смещением, образующих его ионов, керамика на основе $PbTiO_3$, ниже температуры фазового перехода превращается в порошок. Для предотвращения этого явления, путём легирования указанной фазы, уменьшают кристаллохимические различия между сегнето- и парафазой.

В настоящей работе рассмотрены электрофизические свойства (ЭФП) керамические материалы на основе фаз $Pb_{1-x}Me_xTiO_3$ и $Pb_{1-x}Me_xTi_{1-x}Zr_xO_3$, где Me = Ca, Sr, а $x \leq 0.25$. Порошки указанных фаз были получены в рамках метода «химической сборки» с использованием в качестве прекурсоров изо- или гетерополисоединений титана и циркония. Указанные формы, в виде геля, вводились во взаимодействие с суспензиями, состоящими из ультрадисперсного PbO, помещённого в смесь насыщенного раствора ацетатов кальция или стронция и 15% раствора аммиака. Процесс синтеза целевой фазы проводился при стандартных условиях при интенсивном перемешивании системы. Полученный аморфный продукт реакции, после отделения от маточного раствора, прогревался при температуре порядка 300^oC для его дегидратации и кристаллизации целевой фазы. Образующийся порошок имеет диаметр частиц порядка 100 – 200 нм и низкую степень агломерации (рис.1а).



а	Б	в

Рисунок 1. – (а) – порошок состава $Pb_{0,9}Sr_{0.1}Ti_{0,9}Zr_{0.1}O_3$ (температура кристаллизации 290°С); (б) – микроструктура керамики на основе этой фазы; (в) – микроструктура керамики на основе $Pb_{0,9}Sr_{0.1}Ti_{0,9}Zr_{0.1}O_3$ после поляризации полем 6 кВ/мм при 130°С.

Прессзаготовки из порошков фаз указанного состава (после их предварительной подготовки) спекались при температурах от 1050 до 1220°С. Время спекания варьировалось от 1 до 6 часов. Для каждого из составов, путём построения графиков (режим спекания – плотность) выбирались оптимальные условия изготовления контрольных образцов.

В результате исследований установлено, что с ростом температуры спекания происходит постепенное увеличение размеров зёрен, тогда как пористость материалов проходит через пологий минимум для образцов состава $Pb_{1-x}Me_xTiO_3$ при 1100 – 1180, а для керамики типа $Pb_{1-x}Me_xTi_{1-x}Zr_xO_3$ при 1120 – 1190. При этом положение указанного минимума (по температуре спекания) смещается в сторону больших значений по мере роста значений (х) в системах обоих видов.

Исследование процессов поляризации изготовленных образцов показывает, что с ростом размеров зёрен минимальная величина поляризующего поля(при фиксированном составе материала), необходимая для достижения керамикой максимального значения K_t/K_p снижается, однако это сопровождается уменьшением пьезоактивности материала. Показано, что для материалов с размером зёрен менее 1,5 мкм предельное значение d_{33}/d_{31} при их оптимальной поляризации может достигать 16.

Синтез ультрадисперсных порошков титанатов щелочноземельных элементов в водных растворах при высоких значениях pH.

А.А. Нестеров, А.Е. Панич, С.Н.Свирская, И.В. Васильев

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

В рамках дальнейшего совершенствования процессов низкотемпературного синтеза нано- и ультрадисперсных порошков сегнетофаз исследованы процессы взаимодействия гидроксокомплексов титана (IV) с растворами солей кальция, стронция и бария.

Исходные растворы $Na_2[Ti(OH)_6]$ были приготовлены путём осаждения оловых форм гидроксидов Ti(IV) (низкотемпературный гидролиз $TiCl_4$), с последующим их растворением в избытке раствора щёлочи. Для синтеза титанатов кальция, стронция и бария, а также их твёрдых растворов, в полученный щелочной раствор, при постоянном перемешивании, вводились концентрированные растворы ацетатов щелочноземельных элементов (или их смеси - для получения твёрдых растворов типа Me_x□$_{1-x}TiO_3$, где Me и □ = Ca, Sr, Ba). После добавления в систему необходимого объёма растворов указанных солей, её температура доводилась до 80 – 90^{o}C для укрупнения первичных кристаллов и завершения реакции обмена. Интенсивное перемешивание системы (на всех этапах взаимодействия) необходимо для обновления реакционной зоны процесса в связи с изменением его типа во времени (от гомогенного к гетерогенному). Полученная твёрдая фаза отделялась от маточного раствора методом фильтрования, затем вновь переносилась в емкость с дистиллированной водой и полученная суспензия вновь перемешивалась для полного удаления примесей с поверхности полученных частиц. Суспензия вновь разделялась методом фильтрования, после чего твёрдая фаза высушивалась (до постоянного веса) при температуре порядка 90^{o}C. Полученный порошок исследовался методами ДТА-ТГА (дериватограф Diamond T6/DTA), РФА (дифрактометр ARL X'TRA) и ТЭМ (JSM-6390LA). По данным ДТА-ТГА (рис. 1) процесс синтеза сегнетофаз завершается в водном растворе. Синтезированный порошок (средний диаметр частиц

порядка 100 – 200 нм (рис.2)) обладает средней сорбционной способностью (сорбционная ёмкость на воздухе составляет 7 – 9 мас.%).

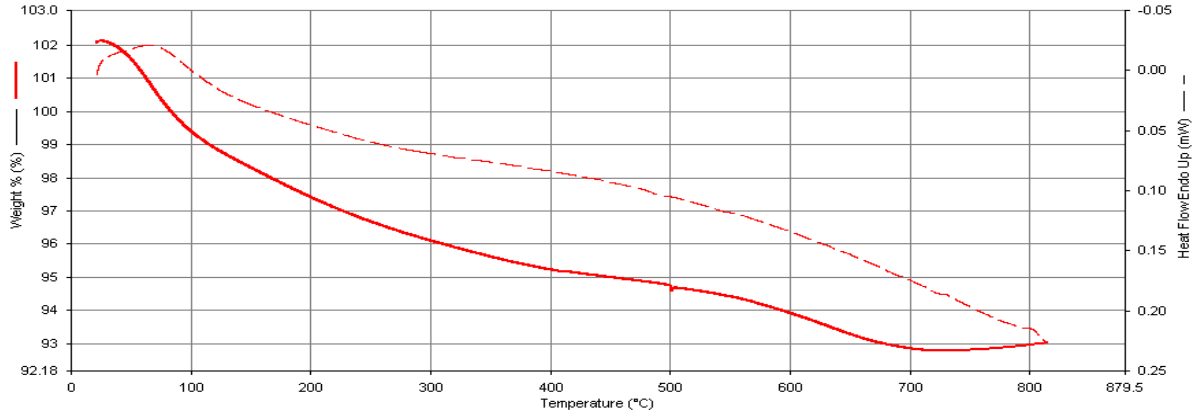
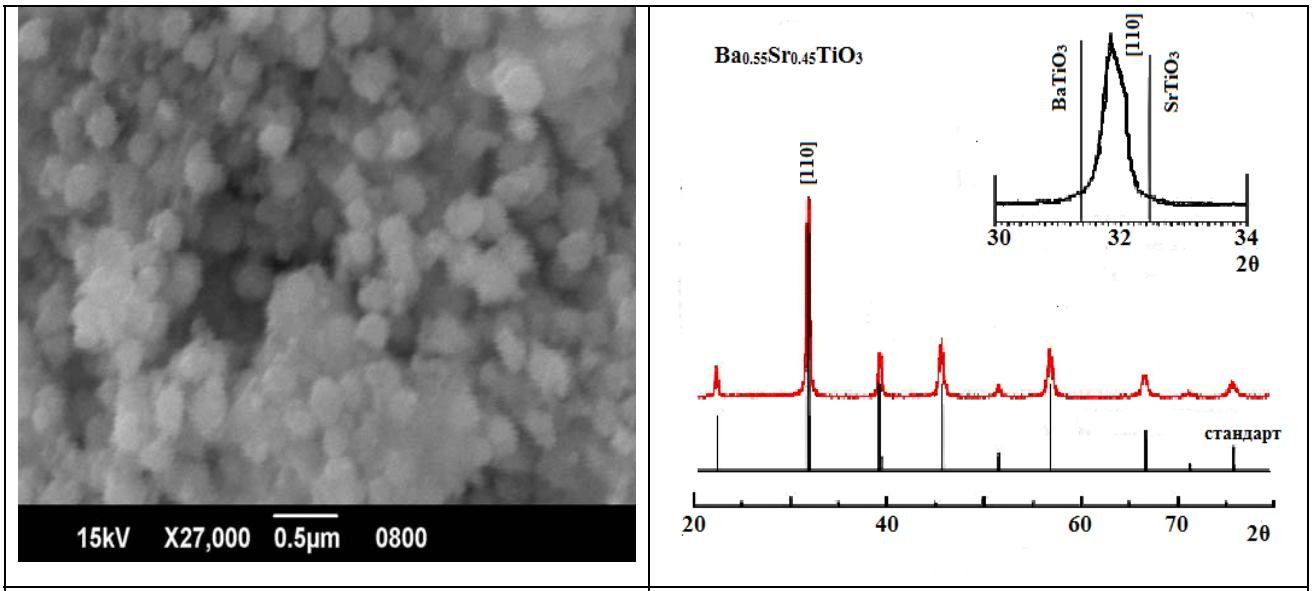


Рисунок 1 – Данные ДТА-ТГА по синтезированному порошку $BaTiO_3$ (предварительная сушка при 90°С в течение 4 часов, последующее хранение на воздухе – 24 часа),



а б

Рисунок 2 – (а) порошок фазы $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$, кристаллизующийся из водных растворов; (б) – рентгенограмма фазы $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$, синтезированная при 90°С в сравнении со стандартом (База данных ICSD по кристаллическим структурам неорганических соединений).

Из рисунка 2б следует, что метод позволяет не только снизить температуру синтеза титанатов щелочноземельных элементов на 1200°С и изготавливать их ультрадисперсные порошки, но и даёт возможность в одну стадию формировать твёрдые растворы состава $Me_x\square_{1-x}TiO_3$, где Me и $\square$ = Ca, Sr, Ba.

Методика определения температурной стабильности пьезоматериалов с использованием стенда «Цензурка-М»

А.А.Нестеров, Е.В. Карюков, А.В.Скрылев, А.Ю.Малыхин

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

В настоящее время изделия из пьезокерамики широко используются в медицине, авиационном и железнодорожной технике, энергетике и других отраслях современной промышленности. Современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управления и контроля все чаще заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики с целью совместного поиска тех или иных технологических решений. Область применения пьезокерамических материалов постоянно расширяется, меняются условия их применения. Возрастают и требования, предъявляемые к пьезоматериалам и изделиям на их основе. В связи с этим актуальным остается вопрос, связанный со снижением влияния изменения температуры на электрофизических параметров (ЭФП) пьезокерамических материалов.

В данный момент известно большое количество пьезокерамических материалов отечественного и зарубежного производства, ЭФП которых сравнивается при стандартных условиях. Однако в процессе эксплуатации пьезопреобразователя температура пьезоматериала может изменяться в широких пределах, что может значительно изменить его диэлектрические и пьезоэлектрические параметры. Особенно актуален этот вопрос для преобразователей работающих в режиме излучения, так как изменение их температуры увеличивается (при равной мощности нагрузки) по мере роста величины тангенса угла диэлектрических потерь. В данной работе представлена одна из возможных методик, позволяющая определить влияние изменения температуры системы на ЭФП пьезоматериалов. В отличие от ранее известных способов такой оценки, которые, как правило, позволяют проводить оценку влияния температуры на один параметр, предлагаемый метод позволяет стоить зависимости типа ЭФП –

температура одновременно для большого числа важнейших диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик исследуемых материалов. Эти исследования выполняются с помощью только двух устройств: измерительного стенда «Цензурка-М» и малогабаритной термокамеры.

Измерительный стенд «Цензурка-М» позволяет одновременно измерять и рассчитывать целый комплекс параметров: значения резонансной и антирезонансной частот, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, продольного пьезомодуля, скорости звука, добротности, относительной диэлектрической проницаемости, коэффициентов электромеханической связи и удельного объёмного электрического сопротивления.

Температурный диапазон измерений от –40 до +130°C обеспечивается с помощью малогабаритной термокамеры TIRA mini TTC 4002, позволяющей контролировать температуру в момент измерения с точностью ±1°C. Пьезоэлемент, предназначенный для измерения ЭФП, помещается в специально изготовленные держатели, что позволяет исследовать как образцы стандартного размера диаметром 10мм и толщиной 1мм, так и образцы с нестандартными линейными параметрами.

В работе, в качестве примера, показаны данные по значениям статической емкости C и продольного пьезомодуля d_{33} в интервале температур от минус 40 до плюс 80°C, измеренные полученные в рамках разработанного метода. Показано, что его использование позволяет определить степень обратимости указанных параметров.

Обратимые изменения контролируемого параметра X в интервале температур от 20°C до – 40°C и от 20°C до +80°C определяли по формуле:

$$\Delta X = \frac{(X)_{20} - (X)_Y}{(X)_{20}} \cdot 100$$

где $(X)_{20}$ и $(X)_Y$ значения контролируемого параметра ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, d_{31}, V_1^E) измеренного динамическим методом при 20°C и заданной температуре, соответственно. Используя значения резонансной и антирезонансных частот при различных температурах можно оценить поведение параметров

пьезокерамики, рассчитываемых по формулам, включающих F_r и F_a согласно ОСТ II 0444-87.

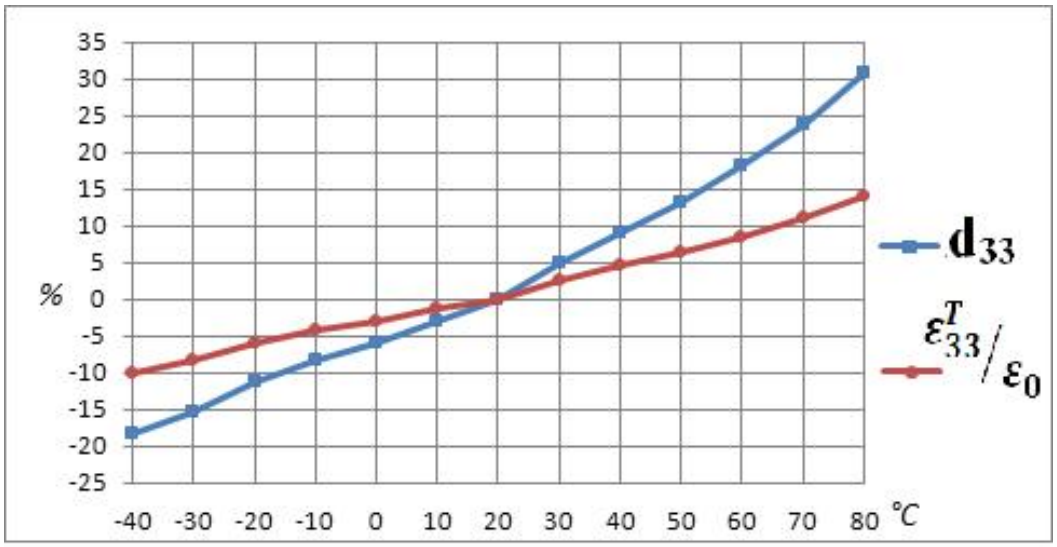


Рисунок 1 - Уходы пьезомодуля d_{33} и относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ для пьезоматериала ЦТБС-3 в интервале температур –40°С – +80°С.

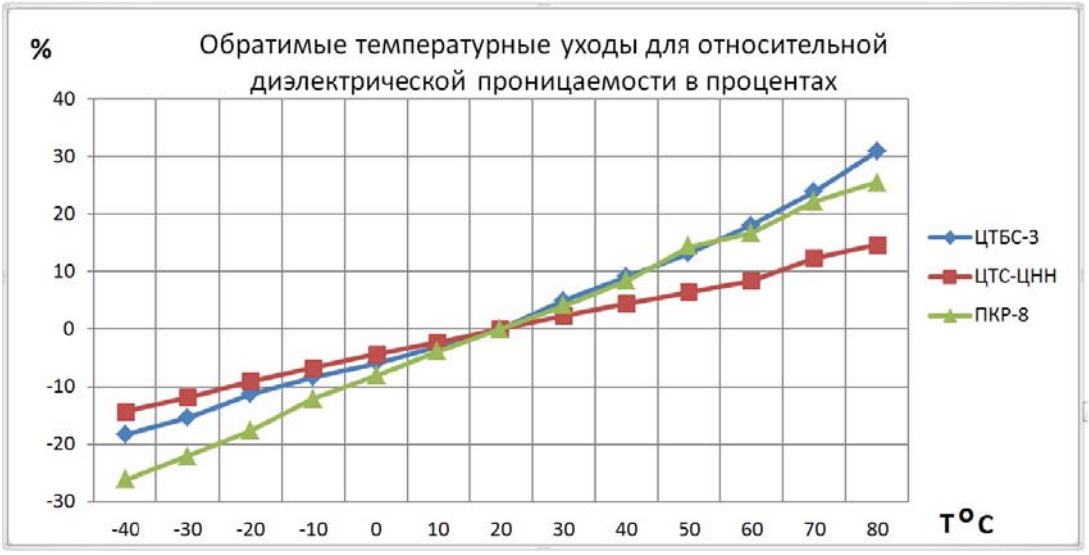


Рисунок 2 – Уходы относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ для пьезоматериалов ЦТБС-3, ЦТС-ЦНН, ПКР-8 в интервале температур –40°С – +80°С.

Полученные результаты согласуются с обратимыми уходами, характерными для материала ЦТБС-3, измеренными ранее в соответствии с ГОСТ 12370-60. Таким образом, апробированный метод изучения ЭФП пьезокерамических материалов с использованием термокамеры и стенда «Цензурка М» позволяет оперативно изучать поведение целого комплекса ЭФП в зависимости от температуры.

Электрофизические параметры пьезокерамического материала ЦТБС-3, синтезированного с использованием активных прекурсоров

А.А.Нестеров, С.Н.Свирская, Е.В.Карюков, А.Ю.Малыхин, А.В.Скрылёв, Т.А.Вотинова

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Пьезокерамические преобразователи различных типов находят широкое применение во многих отраслях современной науки и техники. Наибольшее значение из них имеют материалы на основе оксидных фаз со структурой типа перовскита. Порошки этих фаз в промышленных масштабах, как правило, получают методом твердофазных реакций (МТФР), который имеет ряд существенных недостатков. К основным из них следует отнести высокие температуры процессов синтеза сегнетофаз и спекания прессзаготовок. Это способствует не только нарушению стехиометрического состава пьезофаз за счет испарения ряда прекурсоров (в частности - оксида свинца), но к вероятностному характеру микроструктуры получаемых керамических материалов, за счёт невысокой эффективности способов управления в прессзаготовках процессов первичной, вторичной рекристаллизации и роста зёрен. Следствием этого является плохо прогнозируемый разброс электрофизических параметрах (ЭФП) керамики даже в пределах одной партии. В связи с этим, актуальным остаётся поиск альтернативных вариантов синтеза оксидных фаз указанного типа, лишенных вышеперечисленных недостатков.

В качестве объекта исследований был выбран пьезокерамический материала ЦТБС-3, широко применяемый в современной гидроакустике. С целью снижения температуры синтеза пьезофазы, лежащей в основе ЦТБС-3, а также повышения воспроизводимости свойств пьезокерамики указанного типа, нами для синтеза целевой фазы был выбран комбинированный метод, основанный на различной активности используемых прекурсоров.

Комбинированный метод предусматривает использование в качестве одного из прекурсоров полифункциональных матриц (в нашем случае,

аморфных α-форм гидроксидов титана и циркония), строение каркаса которых подобно строению подрешетки (В) конечного продукта реакции. Указанная матрица заполняется катионами, формирующими подрешетку (А) целевой фазы, за счет самопроизвольно протекающих в системе процессов обмена или внедрения. Применение этого метода позволяет управлять размером частиц получаемых порошков. Использование ультрадисперсных порошков целевой сегнетофазы, полученной указанным низкотемпературным методом, даёт возможность управлять нано-, мезо- и микроструктурой керамических каркасов в процессе их формирования, а следовательно, изготавливать пьезокерамику с задаваемой и воспроизводимой совокупностью свойств.

В работе был рассмотрено влияние предыстории формирования матриц (аморфных α-форм гидроксидов титана и циркония) на ЭФП конечного продукта. Для их получения были использованы азотнокислые растворы комплексных соединений титана (IV) и циркония (IV), которые смешивались в необходимой пропорции. Осаждение матриц осуществляли в реакторе «Ready», предназначенном для проведения химических реакций при контролируемой температуре и осуществлялась 2-мя способами:

1) в первом случае в смесь азотнокислых растворов компонентов небольшими порциями при температуре не выше 8 ^{0}C добавляли 10% раствор аммиака;

2) во втором случае смесь азотнокислых растворов компонентов добавляли к 10% раствору аммиака при температуре 8 ^{0}C.

В полученную смесь гидроксидов титана и циркония вводили компоненты, формирующие подрешётку А (Sr^{2+}, Ba^{2+}, Pb^{2+}), в виде гидроксидов и оксидов.

Полученную суспензию подвергали механической активации в барабанной мельнице с последующей сушкой продукта. Полученный рентгеноаморфный продукт подвергали термической обработке. Температуру синтеза выбирали на основе результатов ДТА и ТГА, (дериватограф Diamond TG/DTA, PerkinElmer) и РФА (дифрактометр ARL

X`Tra), которые свидетельствуют о том, что целевая фаза формируется при 700-800°С (изотермическая выдержка 1 час).

Из синтезированных порошков традиционным комплексом технологических операций были изготовлены контрольные образцы в виде дисков 20х1 мм (электроды серебряные, получены методом вжигания). Значения некоторых ЭФП полученной пьезокерамики, а также её механических характеристик (МХ) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – ЭФП и МХ пьезоматериалов ЦТБС-3, полученных комбинированным методом. Материал синтезирован при 800°С в течении 1 часа (способ 1 – щелочная среда, 2 - кислая среда.

Способ получения матрицы	$T_{сп}$, °С, (время спекания 2 часа)	tg δ %	$\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	d_{31} пКл/Н	d_{33} пКл/Н	V_1^E, м/с	ρ, г/см^3	η 10^6 Па
1	1260	1,9	3050	165	365	3440	7,4	-
	1280	1,8	3035	150	370	3350	7,4	489
2	1260	2,7	2750	120	290	3470	7,4	-
	1280	2,4	3090	160	350	3335	7,4	421
ОСТу 11 0444-87		Не более 3,5	2000-2600	135-200	340-460	3400-3550	Не менее 7,21	Не менее 343

η - предел механической прочности при стат. сжатии

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Свойства пьезоматериала ЦТБС-3, полученного комбинированным способом соответствуют требованиям ОСТ 11 0444-87, при этом удалось повысить прочностные характеристики ($489*10^6$ по сравнению с $343*10^6$ Па) и плотность керамического каркаса (7, 4 по сравнению с 7,21 г/см^3).

2. Свойства исследованного материала практически не зависят от способа осаждения матрицы (осаждение в «кислой» либо в «щелочной» среде).

3. Комбинированный метод позволил снизить температуру (800 ^{0}С по сравнению с 1060 ^{0}С) и время синтеза (1-2 часа по сравнению с 6-8 часами для МТФР).

Влияние размеров и состава частиц порошков на кристаллографическое строение фаз системы $BaTiO_3$ – $SrTiO_3$ и свойства материалов, создаваемых на их основе

Нестеров А.А., Доля В.К., Панич А.А.

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: lanesan@mail.ru

Свойства любой функциональной керамики зависят от типа и степени совершенства строения четырёх (нано – мезо- микро- и макро-) уровней структурирования керамического материала (нано – мезо- микро- и макро-). В частности, под наноуровнем структурирования системы понимают строение элементарных ячеек кристаллических фаз, которое зависит от методики их синтеза и относится к факторам, предопределяющих значение температур фазового перехода и величины ряда электрофизических свойств материалов, создаваемых на их основе, в заданном температурном интервале, а также характер всех последующих уровней структурирования образцов. В свою очередь процессы формирования элементарных ячеек сегнетофаз и частиц исходной шихты оптимального размера и формы, с заданной концентрацией и типом их дефектности предопределяются химической и термической предыстории пресспорошков. В связи с этим, без достоверной информации о влиянии их способов получения на кристаллическую структуру сегнетоэлектрических фаз, трудно понять природу целого ряда явлений, связанных с изменением сегнетоэлектрического состояния зерен керамики, изготовленной из шихты, синтезированной различными методами, или полученной методами диспергирования исходных порошков.

Целью данной работы было:

а) установление влияния методики синтеза фаз системы $BaTiO_3$ – $SrTiO_3$ на строение их элементарных ячеек и размеры частиц порошков, формирующихся в различных системах;

б) выявление связи между размером частиц порошков и кристаллохимическим строением, образующих их фаз, а также определение влияния микролегирования указанных фаз на некоторые технологические и диэлектрические свойства композиционных материалов, изготавливаемых на их основе.

Фазы системы $BaTiO_3$ – $SrTiO_3$ были получены методами твёрдофазных реакций (МТФР) и «химической сборки» (МХС). В основе последней технологии лежит процесс заполнения полимерных матриц, катионами, формирующими подрешётку (А) целевой фазы. Указанное взаимодействие реализуется за счёт протекающих в системах (при стандартных условиях) реакций обмена или внедрения. В связи с этим преобразование первичных аморфных продуктов реакций в целевые фазы не требует значительных энергетических затрат. Это позволяет понизить температуру формирования целевого продукта реакции в среднем на 600К и сократить время обжига шихты в 3 – 5 раз. Снижение энергии активации обсуждаемого процесса даёт возможность сохранять количественный состав целевых продуктов, что практически невозможно сделать в рамках традиционных технологий, основанных на методе твёрдофазных реакций.

Для синтеза фаз со структурой типа перовскита состава $A_{1-x}B_xTiO_3$ (А и В =, Ba или Sr) использовалось предварительно синтезированное изополисоединение Ti (IV), которое (при стандартных условиях) вводилась во взаимодействие с суспензиями, образующимися при реакции между концентрированным раствора NH_3 и кристаллическими ацетатами щелочноземельных элементов.

Образующиеся аморфные продукты реакции, прокаливались при 500-1000К. По данным ДТА и ТГА их термическое разложение протекает при температуре от 330 до 600$^oК$. При этом система проходит через ряд промежуточных, локально стабильных состояний.

В процессе работы, методом РСА определялись параметры элементарных ячеек синтезируемых фаз и значения областей когерентного рассеяния частиц (ОКР). Образование кубических фаз со структурой перовскита (не зависимо от состава исследуемой фазы) наблюдается при 500-550 $^oК$ (при времени обжига 3-5 часа). С ростом температуры синтеза (750 - 950$^oК$) в области системы, прилежащей к $BaTiO_3$ к наблюдается трансформация кубических фаз, образовавшихся при более низких температурах, в тетрагональные. Установлено, что указанные изменения в строении элементарных ячеек вызваны ростом размеров частиц в процессе их вторичной рекристаллизации (таб.1).

Таблица 1 - Изменение параметров элементарных ячеек и ОКР образцов состава $BaTiO_3$ в зависимости от условий их синтеза.

$T_{обжига}$ К	C_M $[Ti(NO_3)_6]^{2-}$	параметр а Å	параметр с Å	параметр *ОКР нм
600	0,2	4,11	-	12
	0,5	4,09	-	21
	0,7	4,07	-	24
	0,9	4,06	-	26
700	0,2	4,05	-	39
	0,5	4,04	4,07	52
	0,7	4,04	4,07	58
	0,9	4,04	4,07	61
800	0,2	4,03	4,05	48
	0,5	4,01	4,04	71
	0,7	4,00	4,03	77
	0,9	4,00	4,03	89
950	0,2	4,02	4,05	54
	0,5	3,997	4,031	98
	0,7	3,992	4,029	>100
	0,9	3,989	4,028	>100
1050	0,2	3,995	4,030	>100
	0,5	3,990	4,029	>100
	0,7	3,989	4,028	>100
	0,9	3,989	4,028	>100

*ОКР рассчитаны по формуле Селакова-Шерера $D=\lambda/\beta\cos\theta$, где λ-длина рентгеновского излучения (нм), β-физическое уширение

На основе изготовленных нано- и ультрадисперсных порошков разработаны новые технологии изготовления двух типов композиционных материалов со смешанным типом связности микроструктуры: а) сегнетофаза - стеклофаза – полимер (в виде паст сырых сегнетокерамических плёнок) и б) сегнетофаза – стеклофаза (продукт обжига композитов).

Разработаны низкотемпературные способы введения в сегнетофазы состава $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ легирующих добавок как по позиции (А), так и в позиции (В) кристаллической структуры типа перовскита, а также лабораторные технологии изготовления нано- и ультрадисперсных

порошков сегнетофаз с равномерным распределением легирующих добавок по объёму системы. Установлено, что замещение иона Ba^{2+} на ионы калия в количестве до 3 мол.% способствуют снижению тангенса угла диэлектрических потерь для композитов типа сегнетофаза – стеклофаза, которые являются одними из целевых объектов данной работы. Однако указанный тип замещения, формирующий дефекты в анионной подрешётке, не оказывает достаточного влияния влияние на температуру и скорость спекания композиционных материалов типа сегнетофаза - стеклофаза – полимер. Увеличение же в составе сегнетофазы концентрации дефектов по позиции (А), за счёт:

а) введения в их состав порошков целевых фаз ионов ниобия, молибдена и вольфрама (фазы состава $Ba_{1-x-y}Sr_xNb_yTi_{1-y}O_{3-y/2}$ и $Ba_{1-x-y}Sr_xM_yTi_{1-y}O_3$ (M = Mo, W);

б) получения порошков фаз составов, принадлежащих к области гомогенности, прилежащей к TiO_2 (фазы типа $Ba_{1-x-y}Sr_xTiO_3$), способствует снижению температуры спекания образцов до 1150 – 1070К и резкому возрастанию скорости процесса.

Одновременно можно отметить, что образцы легированные ионами ниобия, а также нестехиометрические фазы типа (б) характеризуются дефектностью как по катионной решётке (А), так и по анионной подрешётке. Это позволило создать на основе порошков этих фаз целевые стеклокерамические образцы, с низкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и управляющего напряжения с управляемостью до 13,5% при управляющем напряжении порядка 2 В/мкм.

Для изготовления композиционных материалов со смешанным типом связности микроструктуры типа сегнетофаза - стеклофаза – полимер (в виде сырых сегнетокерамических плёнок) использован метод шликерного литья на лавсановую подложку. Для достижения необходимых параметров получаемых материалов, разработана рецептура шликера, позволяющая не только формировать сырые сегнетокерамические плёнки при комнатной температуре, но и регулировать их толщину в пределах от 50 мкм до 250 мкм..

Разработанный состав шликера обеспечивает режим обжига сырых сегнетокерамических плёнок, аналогичный обжигу плёнок типа LTCC, что позволяет проводить совместный обжиг двух указанных композиционных материалов, т.е. формировать заданную гетероструктуру.

Микроструктура сегнетожесткой керамики PZT-PMnN-PZnN, полученной в широком диапазоне температур

А.Е. Панич, В.В. Еремкин, В.Г. Смотраков, М.А. Мараховский, А.А. Панич

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Большинство пьезокерамических материалов имеет температуру спекания выше 1200 °С. Необходимость ее снижения вызвана разработкой многослойных преобразователей с малым управляющим напряжением и низким импедансом на основе керамики цирконата-титаната свинца с использованием технологии для производства конденсаторов, предполагающей одновременное спекание материала и нанесение системы внутренних электродов [1].

В работе изучена возможность снижения температуры спекания пьезокерамик $PbZr_{0.44}Ti_{0.44}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06}O_3$ (I) [2] и $PbZr_{0.437}Ti_{0.432}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.044}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.087}O_3$ (II) [3], относящихся к группе сегнетожестких материалов, отличающихся низкими механическими и диэлектрическими потерями. Поскольку сложность химического состава затрудняет применение химических методов синтеза, получение высокодисперсных, химически однородных порошков, пригодных для низкотемпературного спекания, осуществлялось при помощи высокоэнергетического помола в планетарной мельнице. Наряду с традиционной схемой твердофазного синтеза из простых оксидов использована методика с применением прекурсора, содержащего все элементы, входящие в позицию B перовскитовой ячейки ABO_3. В последнем случае повышается химическая однородность материала, снижается температура синтеза и потери PbO, однако возрастает средний размер агломерата в порошках [4, 5].

В работе использовались реактивы: Nb_2O_5 – «ос.ч.»; TiO_2 – «конденсаторный»; ZnO – «х.ч.»; PbO – «ч.д.а.»; ZrO_2, MnO_2 – «ч.». На различных технологических этапах применялся помол в планетарной

мельнице Planetary Mill pulverisette 5 (Fritsch) с барабаном и шарами из стабилизированной иттрием керамики диоксида циркония. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-2.0 на Co K_α-излучении. Распределение частиц порошка по размеру исследовалось на лазерном анализаторе Analysette 22 Compact (Fritsch). Размер зерна керамики определялся по изображениям сколов на растровом электронном микроскопе JCM-6390 (JEOL).

Поскольку для сегнетожесткого материала характерно наличие вакансий в кислородной подрешетке, в т. ч. и за счет испарения PbO (избыток PbO в шихту не вводился). При синтезе из простых оксидов после смешения в барабанной мельнице порошки подвергались помолу в течение 2 ч в планетарной мельнице и последующей термообработке. Полнота синтеза достигалась при двухстадийной термической обработке при 850°C и 900°C. Фазовый состав твердых растворов соответствовал морфотропной фазовой границе (МФГ) при равном соотношении тетрагональной и ромбоэдрической фаз. Перед спеканием порошки обрабатывались в течение 2 ч в планетарной мельнице (образцы I-1 и II-1).

При приготовлении B-прекурсоров составляющие композицию оксиды после предварительного смешения обрабатывались в планетарной мельнице и обжигались в печи при 1200°C. После добавления PbO и смешения в барабанной мельнице порошки подвергались помолу в планетарной мельнице. После синтеза при 700°C фазовый состав порошков соответствовал МФГ. Деагломерация порошков в планетарной мельнице не производилась (образцы I-2 и II-2).

Однофазный твердый раствор, состав которого соответствует МФГ, может быть также получен при одностадийном синтезе материала из простых оксидов при 850°C в случае добавления в шихту 1% вес. PbO сверх стехиометрического соотношения оксидов, составляющих твердый раствор. Указанный эффект, по-видимому, связан с облегчением диффузии при наличии небольшого количества жидкой фазы при синтезе. По данной схеме, с последующей 2 ч обработкой в планетарной мельнице, получен

образец I-3.

Для всех порошков средний размер первичной частицы не превышал предела обнаружения прибора (0.3 мкм), средний размер агломерата D_a приведен в таблице 1. Спекание заготовок диаметром 12 мм и высотой 3 мм проводили в атмосфере паров PbO. Зависимости плотности ρ и среднего размера зерна керамики $D_з$ от температуры спекания $T_{сп}$ приведены в таблице 1.

Полученные пьезокерамические образцы имели форму диска (диаметр 10 мм и высота 1 мм), на поверхность которых вжиганием наносились Ag электроды. Поляризацию проводили при охлаждении через точку Кюри и приложении электрического поля напряженностью 1 кВ/см. Относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ и тангенс угла диэлектрических потерь tgδ определяли на измерителе иммитанса Е7-20. Пьезоэлектрический модуль d_{31}, коэффициент электромеханической связи k_p и механическую добротность $Q_м$ измеряли методом резонанса-антирезонанса на установке «Атолл-3М». Полученные результаты представлены в таблице 1.

Задача по снижению температуры спекания сегнетожесткого пьезокерамического материала вплоть до 1000 °С решается при использовании обеих схем синтеза. Вместе с тем, применение В-прекурсора независимо от взаимного соотношения мангониобата и цинкониобата свинца в твердом растворе приводит к заметному уменьшению зерна и снижению пьезоэлектрической активности материала. Такой же эффект вызывает избыток PbO в шихте. В этом состоит существенное различие сегнетожесткой и сегнетомягкой керамики, для которой использование В-прекурсора при синтезе либо не влияет на размер зерна [5], либо способствует его увеличению [4].

Таблица 1 – Микроструктурные и функциональные параметры керамики в зависимости от температуры синтеза и условий спекания

Образец	D_a, мкм	$T_{сп}$, °С	ρ, г/см^3	$D_з$, мкм	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	tgδ, %	k_p	$-d_{31}$, пКл/Н	$Q_м$
I-1	1,64	1000	7,58	1,03	1093	0,46	0,59	120	1670
		1050	7,80	1,26	1182	0,42	0,61	127	1930
		1100	7,92	1,51	1240	0,43	0,62	131	1860
		1150	7,90	1,56	1238	0,41	0,61	127	1970
		1200	7,92	1,60	1161	0,41	0,60	121	2270
		1250	7,85	1,79	1114	0,44	0,60	119	1890
I-2	2,35	1000	7,82	0,73	751	0,36	0,54	87	1470
		1050	7,86	0,94	759	0,38	0,55	88	1670
		1100	7,83	0,86	748	0,41	0,56	90	1610
		1150	7,88	0,86	731	0,40	0,50	78	1750
		1200	7,82	0,94	737	0,44	0,51	80	1950
		1250	7,76	1,28	668	0,34	0,48	73	1560
I-3	0,34	1000	7,78	1,15	1071	0,47	0,58	119	1560
		1050	7,84	1,22	1157	0,49	0,61	128	1710
		1100	7,85	1,22	1120	0,48	0,61	126	1480
		1150	7,75	1,26	1132	0,46	0,60	126	1650
		1200	7,88	1,26	1015	0,49	0,58	113	1230
		1250	7,78	1,33	1016	0,45	0,56	109	1800
II-1	0,37	1000	7,73	1,00	1221	0,32	0,59	128	1250
		1050	7,88	1,48	1321	0,28	0,61	137	1480
		1100	7,87	1,49	1269	0,33	0,62	133	1670
		1150	7,89	1,48	1142	0,33	0,61	124	1760
		1200	7,83	1,59	1086	0,32	0,61	122	1460
		1250	7,79	1,74	801	0,30	0,59	101	1360
II-2	2,39	1000	7,67	0,84	889	0,33	0,49	89	1020
		1050	7,83	0,86	917	0,27	0,54	97	1050
		1100	7,79	0,91	868	0,36	0,55	97	1170
		1150	7,79	0,91	824	0,24	0,52	89	1170
		1200	7,71	0,99	746	0,29	0,52	84	810
		1250	7,67	1,28	696	0,27	0,47	74	1120

Значения k_p, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ и абсолютной величины d_{31} прямо пропорциональны размеру зерна. Для всех образцов максимум этих параметров достигается при температуре спекания от 1050 до 1100 °С. В таблице 2 приведены данные по фазовому составу и параметрам перовскитовой ячейки керамики при температуре спекания 1100 °С. Из них следует, что применение В-прекурсора, либо избыток PbO в шихте способствуют увеличению концентрации ромбоэдрической фазы и ребра ромбоэдра, а также уменьшению спонтанной деформации тетрагональной ячейки. Таким образом, одновременно с изменением микроструктуры керамики меняется и структура твердого раствора. Можно предположить, что ионы Mn^{2+} и Zn^{2+}, обладающие относительно большим радиусом, могут частично занимать позицию А перовскитовой ячейки. В таком случае применение В-прекурсора, как и избыток PbO в шихте, должны этому препятствовать.

Таблица 2 – Фазовый состав и параметры ячейки керамики, полученной при 1100°С

Образец	Соотношение фаз на МФГ	Тетрагональная фаза (Т)			Ромбоэдрическая фаза (Рэ)	
		a, Å	*c*, Å	*c/a*	*a*, Å	α, град.
I-1	80Т – 20Рэ	4,037	4,125	1,022		
I-2	65Т – 35Рэ	4,048	4,116	1,017	4,072	89,80
I-3	75Т – 25Рэ	4,040	4,113	1,018	4,072	89,80
II-1	70Т – 30Рэ	4,038	4,123	1,021	4,068	
II-2	55Т – 45Рэ	4,041	4,121	1,020	4,075	

Сравнение материалов I и II, полученных в одинаковых условиях, указывает на близость их пьезоэлектрических свойств, за исключением того, что I обладает меньшими механическими, а II – диэлектрическими потерями. При использовании двухстадийной схемы синтеза они не

уступают по параметрам ПКР-8, ПКР-78 и ЦТССт-3 [6].

Список литературы

1. Takahashi S. Sintering $Pb(Zr,Ti)O_3$ ceramics at low temperature / S. Takahashi // Jpn. J. Appl. Phys. – 1980. – V. 19, N 4. – P. 771-772.

2. Pat. 1376013 Great Britain, IC C 04 B 35/00, 35/48. Improvements in and relating to ceramic compositions / Nishida M., Ouchi H.; the applicant and the patentee Matsushita Electrical Industrial Company Limited. – N 5779/72; filed 08.02.72; publ. 04.12.74.

3. Пат. 2219143 Российская Федерация, МПК^7 C 04 B 35/591. Пьезокерамический материал / [Смотраков В.Г., Еремкин В.В., Бакиров А.А., Никитин Я.С.]; заявитель и патентообладатель ООО «Донские измерительные системы». – № 2001134960/03; заявл. 19.12.01; опубл. 20.12.2003.

4. Еремкин В.В. Влияние механической активации на технологию получения пьезоэлектрической керамики цирконата-титаната свинца / [В.В. Еремкин, И.В. Гусенко, А.В. Нагаенко и др.] // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 105-109.

5. Еремкин В.В. Низкотемпературное спекание пьезокерамики ЦТС, предназначенной для монолитных многослойных актюаторов / [В.В. Еремкин, И.В. Гусенко, А.В. Нагаенко и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 6. – С. 17-21.

6. Высокоэффективные пьезокерамические материалы. Оптимизация поиска / [Данцигер А.Я., Разумовская О.Н., Резниченко Л.А., Дудкина С.И.]. – Ростов н/Д: Изд-во «Пайк», 1994. – 96 с.

Макролегированиепьезофаз системы ЦТС с низкой температурой спекания

М.А. Мараховский, С.Н. Свирская, А.А. Нестеров, В.А. Мараховский, А.Е. Панич

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

На сегодняшний день пьезокерамика достаточно широко используется в различных областях науки и техники.Особое внимание уделяется пьезокерамическим трансформаторам и актюаторам выполненным на основе многослойныхпьезопреобразователей с низковольтным управляющим напряжением.

Технологический процесс производства многослойных пьезоактюаторов основан на методе шликерного литья и совмещает спекание активных керамических слоев с формированием системы внутренних электродов.Следовательно, возникает необходимость согласования температуры спекания керамики с температурой плавления материала электродов с целью предотвращения изменения качества и свойств пьезоматериала.Посколькутемпература спекания пьезокерамики, как правило, превышает 1200°С, возникает необходимость использования дорогостоящих Pt или Pt-Pdпаст в качестве материалов электродов[1].

Пьезокерамические материалы, применяемые в многослойных актюаторах должны обладать высокими значениями электрофизических параметров (ЭФП):пьезомодуля d_{33}(так как направление полезной деформации совпадает с направлением приложенного электрического поля),диэлектрической постоянной (ε), высокой температурной стабильностью в диапазоне температур от минус 30°С до плюс 50°С[2].

С целью получения высоких значений ЭФП в сочетании с низкотемпературным спеканием, было проведено макролегирование системы характеризующейся низкой температурой спекания:
$PbTiO_3$ -$PbZrO_3$ - $PbB_{1/2}^{2+}B_{1/2}^{6+}O_3$ - $PbB_{2/3}^{3+}B_{1/3}^{6+}O_3$,где$B^{+2} \rightarrow Ni^{+2}$, Cd^{+2}, a$B^{+3} \rightarrow Bi^{+3}$, $B^{+6} \rightarrow W^{+6}$

В качестве макролегирующей добавки использовалась система $PbB^{+2}{}_{1/3}B^{+5}{}_{2/3}O_3$, где $B^{+2} \rightarrow Ni^{+2}$, Zn^{+2}, а $B^{+5} \rightarrow Nb^{+5}$

Пьезоматериал был получен методом твердофазных реакций. Было исследованно 7 вариантов состава пьезокерамического материала системы ЦТС с разной концентрацией легирующей макродобавки (от 0,2 до 0,8 мол.доли).Приготовление шихты - смешение и помол порошков проводилось в планетарной мельнице PlanetaryMillpulverisette 5 (Fritsch).Синтез шихты проводилив две стадии с промежуточным помолом (температуры изотермических обжигов материала 700°С и 800°С).Качество образцов и полнота прохождения синтеза оценивалась по даннымДТА (Diamond TG\DTA) и РФА (ARL'Xtra - $Cu_{K\pi 1}$излучение Ni-β-фильтр). Синтезированный материал, измельчённый в планетарной мельнице, прессовали в заготовки цилиндрической формы. Сформованные заготовки спекали в печи Nabertherm в засыпке из смеси цирконата свинца и PbOпри температуре 980°С. Режимы поляризации подбирали с учётом диэлектрического и механического гистерезиса, а также температуры Кюри пьезоматериала. Значения ЭФП пьезокерамики определялись на пьезокерамических образцах в форме диска (диаметр 10 мм, толщина 1 мм) с помощьюустановки «Цензурка-М».Полученнные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения ЭФП пьезокерамических образцов различных составов полученных при температуре спекания 980°С.

Конц. макро добавки, Мол.доли	tgδ, %	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	d_{31}, пКл/Н	d_{33}, пКл/Н	Q_m	V_1^E, м/с	ρ, г/см^3	K_P	E_c, В/мм	T_c, °С
0,2	2,80	1360	145	405	70	2990	7,6	0,58	750	250
0,3	2,85	1425	145	415	70	2945	7,5	0,54	800	240
0,4	2,50	1965	175	485	65	2865	7,5	0,55	800	235
0,5	2,50	2025	180	535	60	2825	7,4	0,54	800	230
0,6	2,40	2560	230	645	55	2765	7,6	0,61	700	220
0,7	2,10	3100	245	695	55	2790	7,6	0,61	600	210
0,8	1,95	3245	240	660	65	2755	7,5	0,57	750	210

Наивысшими значениями пьезомодуляd_{33} и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ обладают составы 5, 6 и 7. График зависимостей ЭФП от состава пьезоматериала представлен на рис. 1.

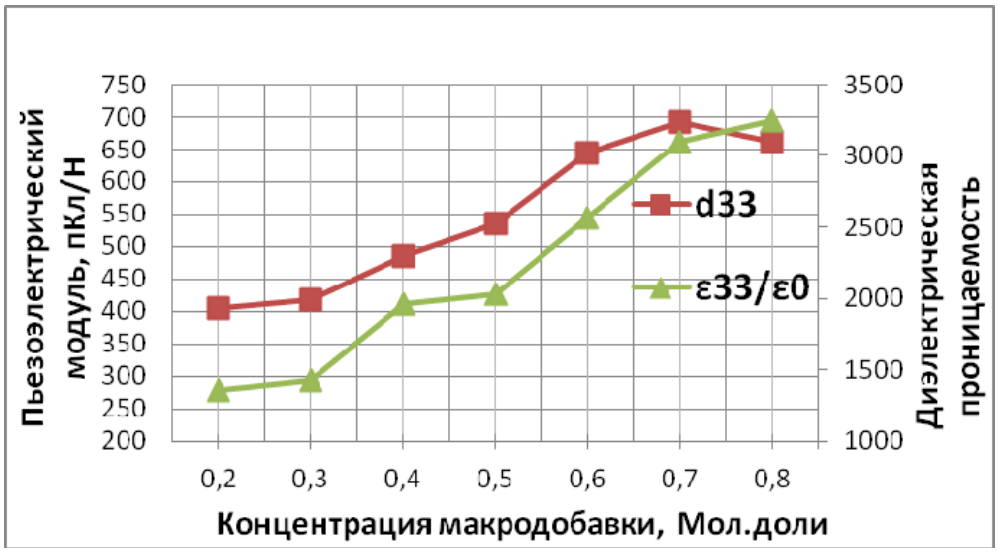


Рис. 1Зависимость пьезомодуля (d_{33}) и диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$)от состава пьезоматериала

Важнейшим эксплуатационным качеством пьезокерамики, является временная стабильность. Отклонения ЭФП пьезокерамического материала после 3-х месяцев «старения» не превышают 10%.

Выводы

Низкая температура спекания пьезоматериала(980°С)позволяет использовать менее дорогие Ag/Pd пасты в качестве материалов электродов, взамен Pt/Pdпри изготовлении многослойных монолитных преобразователей;

Доказана возможность управления свойствами пьезокерамических материалов(пьезомодульd_{33} от 405 до 660 пКл/Н, диэлектрическая постоянная (ε) от 1360 до 3245) с температурой спекания 980°С путём варьирования концентрации макродобавки в системе.

Список литературы

1. Wersing W., Wahl H., Schnoller M. PZT-based multilayer piezoelectric ceramics with AgPd-internal electrodes // Ferroelectrics. - 1988. - Vol. 87. - P. 271-294.

2.Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы, Ростов-на-Дону, 2008. 159с.

Влияние сложных модифицирующих добавок на электрофизические параметры пьезокерамических материалов системы ЦТС

А.В. Нагаенко, А.А. Нестеров, С.Н. Свирская, А.Е. Панич
НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия
nagalexandr@gmail.com

Пьезокерамика на основе фаз системы (1-x)$PbTiO_3$-x$PbZrO_3$ является основой большинства высокоэффективных пьезокерамических материалов. Одним из традиционных методов варьирования электрофизических параметров (ЭФП) материалов рассматриваемой группы является их макро- и микролегирование. Влияние отдельных катионов на изменение основных ЭФП керамических материалов типа ЦТС изучено достаточно подробно, однако сведения об их совместном влиянии в рамках одной системы крайне противоречивы. В связи с этим, практический интерес представляет изучение влияния на свойства материала системы ЦТС, содержащего легирующие добавки в подрешётке (А), фаз системы ЦТС, содержащих легирующие добавки в кристаллографической позиции (В).

В качестве модельных объектов были выбраны фазы системы ЦТС, составы которых принадлежали МО, в одной из которых часть ионов Pb^{2+} была замещена парой (Na^{+} + Bi^{3+}) – фаза А, а в другой - ионы Ti^{4+} и Zr^{4+}, на пару ионов (1/3Me^{2+} + 2/3Nb^{5+}), где Me –Ni^{+2}, Zn^{+2} – фаза В. Шихта для синтеза легированных порошков пьезофаз получена методом диспергирования в планетарной мельнице Planetary Mill pulverisette 5 (Fritsch), время помола составляло 2 часа. В качестве исходных компонентов использованы предварительно высушенные порошки необходимой квалификации с влажностью не более 0,2 масс.%: TiO_2 и Nb_2O_5 – марки «о.с.ч.»; PbO и Bi_2O_3 марки «ч. д. а.»; $SrCO_3$, NiO, ZnO и Na_2CO_3 – «ч»; ZrO_2 марки «ЦРО-1». Синтез целевых фаз проводился при 850ºС по режиму одностадийного технологического процесса.

Образцы для исследования были получены тремя методами: в первом случае в качестве исходных прекурсоров использовались предварительно синтезированные материалы системы ЦТС, один из которых был легирован

в подрешетке А (компонент А), другой - в подрешетке В (компонент В). Синтезированные фазы смешивались (без дополнительного синтеза) в необходимой пропорции и из полученного порошка формовались и спекались пьезозаготовки. При этом мольные доли материалов типа А и В изменялись в пределах от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1, что позволило оценить влияние совместного легирования по подрешеткам, а также зависимость свойств материалов при переходе от преимущественного легирования по подрешетке А к преимущественному легированию по подрешетке В.

В остальных случаях необходимая композиция с различной долей легирования по подрешеткам изготавливалась с использованием перечисленных выше прекурсоров в виде оксидов и карбонатов, которые смешивались во втором случае в водной среде, а в третьем сухим смешением в вибрамельнице в необходимой пропорции, а целевая система получалась после одностадийного синтеза. После измельчения синтезированного продукта из него формовались и спекались пьезозаготовки. Мольные доли материалов типа А и В изменялись в пределах от 0,2 до 0,9.

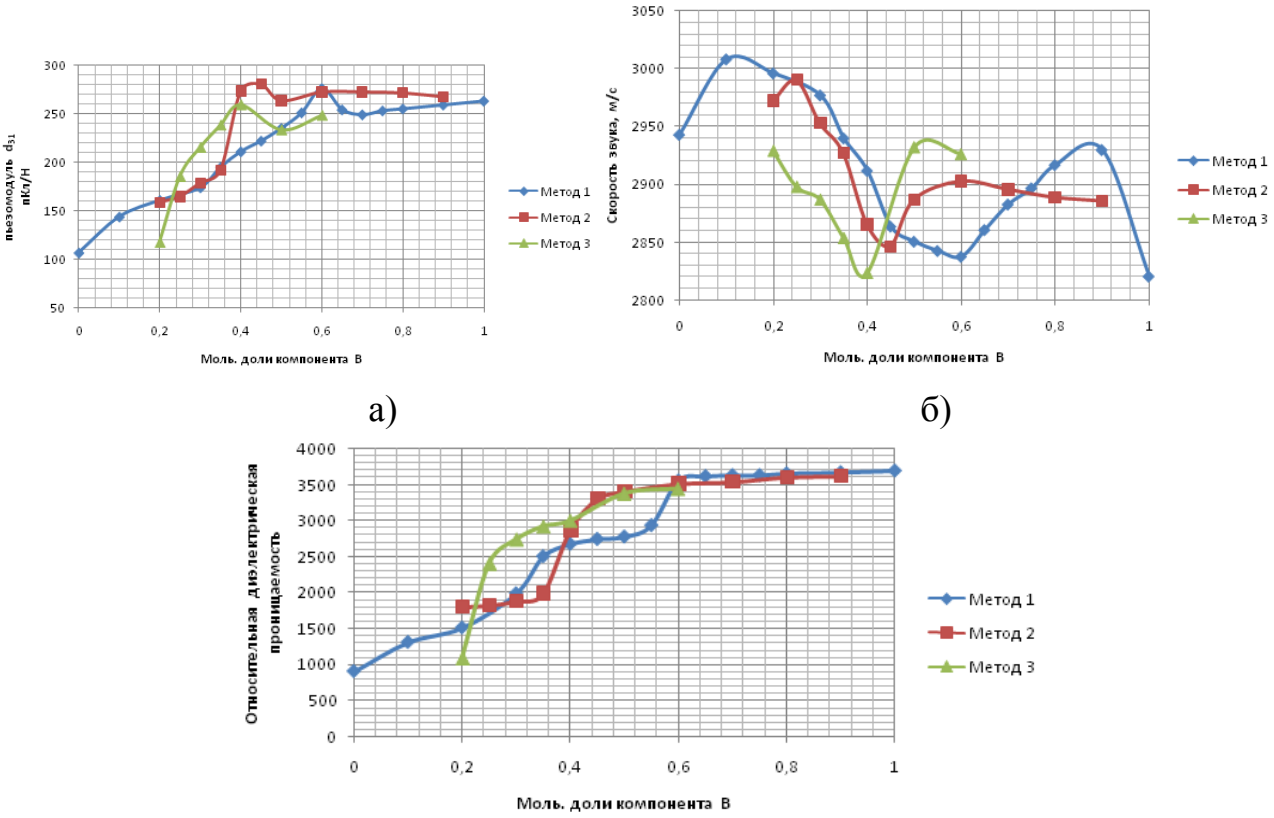
Спекание прессзаготовок осуществлялось в специальной засыпке, исключающей нарушение состава образцов. Скорость повышения температуры системы составляла 100^0С/ч, а время изотермической выдержки при температуре 1150ºС - 2 часа.

Согласно данным растровой микроскопии при увеличении в системе мольной доли компонента (В) до 0,45 скорость вторичной рекристаллизации в ней снижается, а затем вновь возрастает.

Для образцов полученных методом 1 и 2 рост доли стеклофазы в системе несколько увеличивает значения коэрцитивных полей материалов и снижает величину их спонтанной поляризации, в то время как для образцов изготовленных методом 3 наблюдается обратная картина.

Электрофизические свойства материалов в зависимости от соотношения компонентов А и В в системе представлены на рис. 1 (а, б и в). Установлено, что изменение основных пьезопараметров материалов с ростом содержания компонента В в системе носит характер близкий к

экстремальному, что свидетельствует об образовании между ними непрерывных рядов твёрдых растворов.



а) б)

в)

Рис. 1 Изменение значений продольного пьезомодуля (а), скорости звука (б) и относительной диэлектрической проницаемости (в) по мере роста мольной доли компонента B в системе.

Полученные зависимости свидетельствуют, что наибольшие значения относительной диэлектрической проницаемости и продольного пьезомодуля приходятся на 0,4-0,6 мольных долей компонента B, т.е. при сопоставимом количестве компонентов, легированных в позициях A и B кристаллической решетки.

Проведённые исследования показали, что одним из эффективных способов варьирования ЭФП пьезоматериалов может быть формирование твёрдых растворов на основе двух и более известных пьезоэлектрических фаз, имеющих различное сочетание электрофизических параметров.

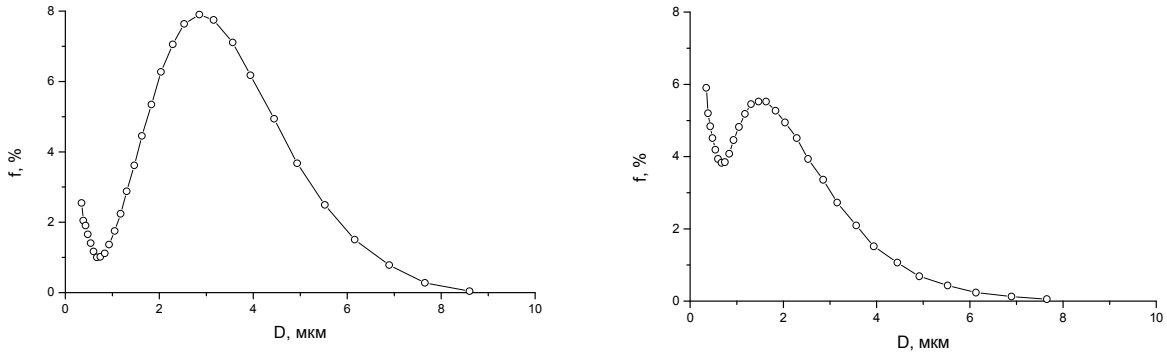
Технологические возможности управления свойствами материала ЦТС-19 на этапе синтеза

В. В. Еремкин А. В. Нагаенко, А. А. Панич, В. Г. Смотраков.
НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия
nagalexandr@gmail.com

Твердофазный синтез твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС), модифицированных по позиции А перовскитовой ячейки ABO_3 ионами щелочноземельных металлов, не представляет сложности и осуществляется из простых оксидов (карбонатов) в одну или две стадии в диапазоне температур от 800 до 900^0C [1]. В работе [2] впервые предложена основанная на применении прекурсора $Zr_{1-x}Ti_xO_2$ схема синтеза, позволяющая повысить химическую однородность материала при значительном снижении температуры обжига.

В настоящей работе изучена возможность расширения температурного диапазона спекания и управления функциональными параметрами сегнетомягкой керамики $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ + 1 % вес. Nb_2O_5 (ЦТС-19) [1] за счет применения прекурсора и высокоэнергетического помола шихты в планетарной мельнице.

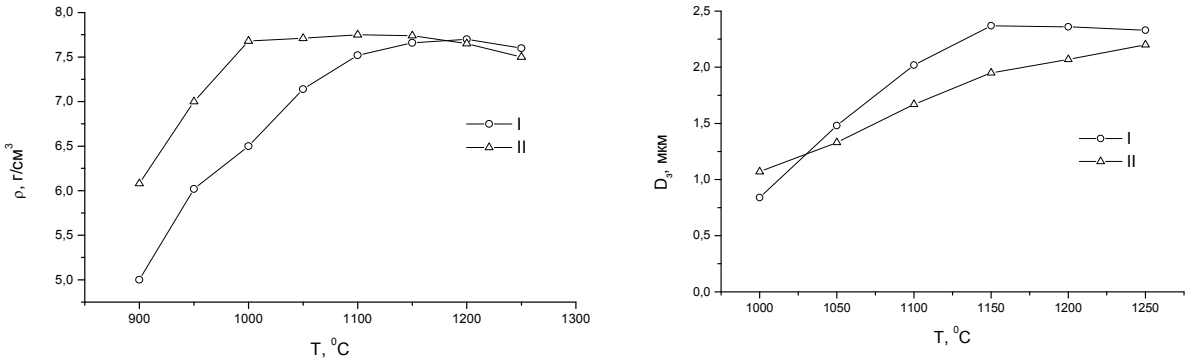
В качестве прекурсора использовали твердый раствор $Zr_{0.518}Ti_{0.459}Nb_{0.023}O_{2.012}$, содержащий все элементы, входящие в позицию В перовскитовой решетки. ZrO_2, TiO_2 и Nb_2O_5 после предварительного смешения обрабатывались в планетарной мельнице в течение 5 ч и обжигались при 1300^0C в течение 4 ч. После добавления PbO (включая добавку 1 % вес. на испарение) и $SrCO_3$ и смешения в низкоскоростной барабанной мельнице порошок подвергался помолу в течение 2 ч в планетарной мельнице с центробежным ускорением 29g в водной среде. После синтеза при 750^0C (4 ч) фазовый состав порошка соответствует морфотропной фазовой границе (образец I). Для уменьшения размера агломератов D_a после синтеза часть порошка дополнительно обрабатывалась в течение 2 ч в планетарной мельнице (образец II). На рис. 1 представлена плотность распределения частиц по размеру f (D) для синтезированного порошка до и после обработки в планетарной мельнице.



А б

Рис. 1. Плотность распределения частиц по размеру для порошков I и II

Спекание образцов проводили в атмосфере паров PbO, скорость нагрева –200^{0}C/ч, время выдержки – 3 ч. Зависимости плотности ρ и среднего размера зерна керамики $D_з$ от температуры спекания приведены на рис. 2.



А б

Рис. 2. Зависимость плотности (а) и среднего размера зерна (б) от температуры спекания керамики

Таким образом, для получения высокоплотной керамики ЦТС-19 в диапазоне температур от 1000 до 1250^{0}C помимо полноты синтеза необходимо, чтобы средний размер агломерата в порошке не превышал, по крайней мере, 1.8 мкм.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента электромеханической связи k_p, относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, пьезомодуля d_{31} и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от температуры спекания керамики.

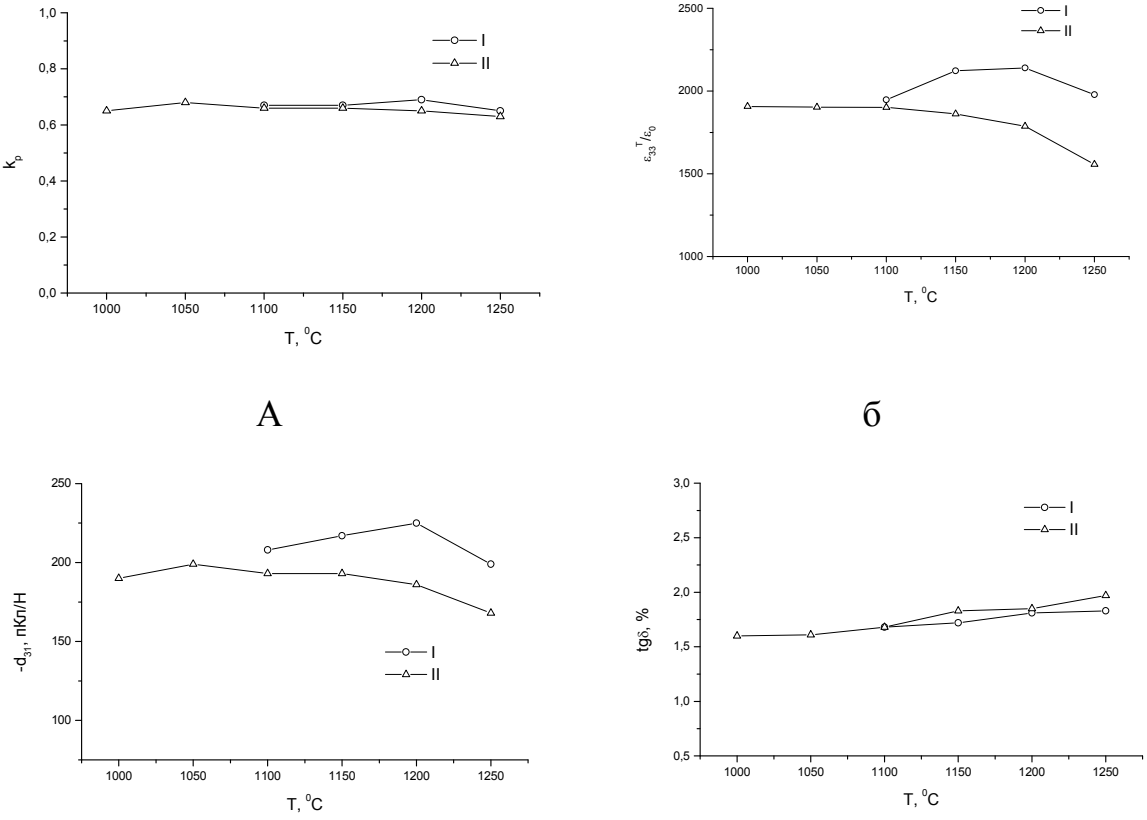


Рис. 3. Зависимость k_p (а), $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ (б), d_{31} (в) и tgδ (г) от температуры спекания керамики

С повышением температуры спекания величина k_p остается практически неизменной, а tgδ имеет слабую тенденцию к росту. Дисперсность порошка не оказывает на эти параметры заметного воздействия. Вместе с тем, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ и абсолютная величина пьезомодуля d_{31} при одинаковой температуре спекания выше для керамики I, обладающей более крупным зерном. Таким образом, для сегнетомягкого материала повышение дисперсности порошка, способствующее низкотемпературному спеканию, стимулирует потери PbO, измельчение зерна и снижение пьезоэлектрической активности.

1. Глозман И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972, 288 с.
2. Tashiro S., Kotani Y., Fukai K., Igarashi H. Fabrication of PZT ceramics from $Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ solid solution // Jpn. J. Appl. Phys. – 1989, v. 28, Suppl. 28-2, p. 80-82.

Исследование методов механической активации пьезокерамического материала системы ЦТС

В.А. Мараховский, С.Н. Свирская, М.А. Мараховский, А.А. Панич

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Одной из важнейших стадий изготовления пьезокерамики методом твердофазных реакций является синтез исходных порошковых материалов. Полнота прохождения синтеза во многом предопределяется реакционной способностью материала. Один из наиболее эффективных способов повышения реакционной способности - механическая активация (механоактивация)материала. В работе исследовано влияние различных способовмеханической активациичастиц шихты пьезокерамического материалана технологические процессы изготовления пьезокерамических элементов, их микроструктуру и электрофизические параметры (ЭФП). В качестве основы использовался пьезокерамический материал ЦТС-36 низколегированный Cd и W, по своему составу близкий к промышленно выпускаемым пьезокерамическим материалам.

Технологические режимы активирования подбирали по дисперсности частиц шихты и полноте прохождения синтеза пьезокерамического материала. Дисперсность частиц синтезированной шихтыпьезоматериала ЦТС-36определялина лазерном дифракционном анализаторе размера частиц «Analysette 22 compact». Качество синтезированной шихты пьезоматериала оценивали по результатам рентгенофазового анализа (РФА) полученным на дифрактометреARL’Xtra.

Механическое активированиешихты пьезоматериала ЦТС-36проводили на различном технологическом оборудовании:

I – Механоактивация в барабанной шаровой мельнице «ШЛМ»;

II – Механоактивацияв планетарной мельницеFritsch «PlanetaryMillpulverisette 5»;

III -Механоактивация в вибрационной мельницеFritsch«Pulverisette0»;

IV – Активация в ультразвуковом дезинтеграторе ИЛ10-1.0;

V – Метод II с ультразвуковой активацией;

VI – Метод IIIс ультразвуковой активацией.

Шихтапьезокерамического материала ЦТС-36, активированная различными методами, синтезироваласьв две стадии с промежуточным помолом в барабанной мельнице (температуры синтеза шихты 700 и 900°С).Спекание керамических пробников осуществляли в печи «Nabertherm» при температурах 1150 - 1250°С.

Микроструктура после спеканияопределялась на изломах керамических образцов с помощью электронного растрового микроскопа«JEOLJSM 6390 LA».

Плотность пьезокерамических образцов (ρ), диэлектрическая проницаемость($\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$),пьезомодуль($d_{33}$)от температуры спекания ($T_{сп}$)приведены в таблице 1. ЭФП пьезокерамичсеких образцов определяли на измерительных установках «Цензурка-М» и «d_{33}-meterАРС».

Таблица 1 – Основные свойства пьезокерамических образцов, изготовленных из механически активированной шихты

Метод активации	$T_{сп}$, °С	ρ, г/см^3	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	d_{33}, пКл/Н
I	1150	5,38	580	165
	1220	5,16	550	220
	1250	5,17	420	190
II	1150	7,64	945	330
	1220	7,57	900	330
	1250	7,51	775	275
III	1150	7.65	880	280
	1220	8.04	805	270
	1250	7.43	725	250
IV	1220	5,42	460	230
	1250	5,29	410	215
V	1150	7,67	930	330
	1220	7,65	845	310
	1250	7,45	810	315
VI	1150	7.64	870	275
	1220	7.6	780	260
	1250	7.37	725	255

Выводы

В результате исследования установлено, чтомеханическая активация шихты пьезоматериаласпособствует получению пьезокерамических элементов с повышенными значениями плотности и ЭФП. Наиболее эффективное для механоактивации оборудование - планетарная мельница.Пьезокерамика, изготовленная из материала активированного в планетарной мельнице, обладает минимальными размерами зерна (5 мкм), по сравнению с образцами активированными другими способами.

Механоактивация шихты в барабанной шаровой мельнице и вибромельнице оказалась менее эффективной, по сравнению с активацией в планетарной мельнице.

Использование ультразвукового воздействияв совокупности с другими способами механической активации материала способствует повышению однородностии плотности микроструктуры, а также снижению температуры спекания.

Доказано, что механическая активация шихты пьезокерамического материала влияет на полноту прохождения синтеза, и соответственно на качество и свойства получаемой пьезокерамики.

Расчет и измерение спектральных характеристик тонких пленок на основе высокотемпературного пьезокерамического материала титаната ниобата висмута

А.А. Панич, С.О. Гаврилов

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Среди всего множества пьезокерамических материалов можно выделить особую группу, которая отличается высокими значениями точки Кюри и рабочих температур. Эти материалы соответственно называют высокотемпературными. Благодаря их свойствам они могут эффективно применяться в датчиках ультразвуковых дефектоскопов, толщиномеров, высокотемпературных вибраций и ультразвуковой медицинской диагностической аппаратуры. Как правило, пьезоэлементы на основе

высокотемпературных материалов обладают весьма высокими значениями пироэлектрического коэффициента в сочетании с низкой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$, что также обуславливает их применение в индивидуальных и матричных пироприемниках[1].

В данной работе в качестве исследуемого материала для тонких пленок был выбран титанат ниобатата висмута (ТНВ-1), имеющий наибольшие значения точки Кюри и рабочей температуры по сравнению с другими материалами данной группы и крайне низкую диэлектричесую проницаемость, особенно благоприятную при использовании его в высокочастотных устройствах. Некоторые параметры ТНВ-1 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ТНВ-1

Материал	T_K, °C	$T_{раб.}$ °C	$\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	$tg\delta\times10^2$ (E=50 В/см)	d_{33} пКл/Н	g_{33} мВ×м/Н
ТНВ-1	920	750	100	1,0	7	8,0

В проведенной работе было получено несколько образцов пленок с использованием установки высокочастотного напыления «Плазма-50СЭ». Выбранный сегнетоэлектрический материал, закрепленный на катоде, распылялся путем ионной бомбардировки в атмосфере кислорода и наносился на подложки (анод) из кремния, нержавейки и поликора, разогретые до температуры 400°C[2]. Для исследования толщины полученных образцов был использован метод электронной микроскопии. При времени напыления 1-2 ч. толщина полученных образцов полученных образцов пленок находится в интервале от 0,6 мкм до 1,2 мкм. Это говорит о том, что скорость роста пленок ТНВ-1 при выбранных параметрах составляет 600 нм/ч.

С помощью спектрального быстродействующего эллипсометра «Эллипс-900АСБ» и программного обеспечения Spectr были получены эллипсометрические углы ψ и Δ и коэффициенты поглощения и преломления k и n в зависимости от длины волны λ[3], лежащей в интервале от 300 нм до 900 нм, и построена модель пленки ТНВ-1

толщиной 1200 нм на подложке из кремния. Путем подгонки спектров построенной модели к спектрам полученных образцов был произведен расчет k и n материала пленки (рис. 1).

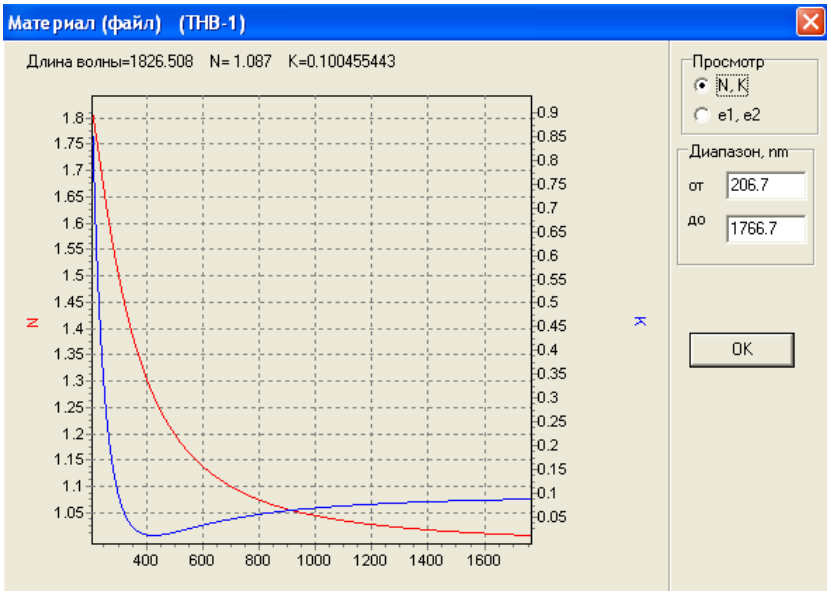


Рис. 1. Графики зависимостей коэффициентов преломления и поглощения n и k от длины волны λ для материала пленки титаната ниобата висмута.

Как видно из графиков, в области ультрафиолетового излучения наблюдается резкий рост коэффициентов и незначительные изменения в росте k и убывании n в инфракрасной области. Полученные спектральные характеристики были сохранены в библиотеке программы Spectr, для дальнейшего использования при измерении толщин пленок THB-1.

Список литературы

1. Данцигер А.Я. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайнера пьезоэлектрических материалов. – Ростов н/Д.: МП «Книга», 2002, т.2.-365 с.

2. Суровяк З., Панич А.Е., Дудкевич В.П. «Тонкие сегнетоэлектрические пленки», г.Ростов-на-Дону, 1994г.

3. Швец В.А., Спесивцев Е.В., «Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением», Новосибирск, 2008г.

Проблемы создания адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта

Баринов И.Н., Кучумов Е.В., Ефремов Е.В.

ОАО «НИИФИ», г. Пенза, Россия

Контроль и управление техническим состоянием элементов конструкций РКТ в течение всего периода возможного проявления деформационного воздействия должны носить систематический характер и позволять осуществлять оценку происходящих изменений и структурных нарушений на основе количественных критериев.Помимо этого они также должны обеспечивать управляемость процессами потенциально опасных вибраций, шумов, механических напряженийи компенсировать результат воздействияэтих процессов на надежность элементов конструкций РКТ.

Разработка аэрокосмических структур нового поколения требует создания новых материалов, которые имели бы улучшенные физические и механические параметры иудовлетворяли высоким требованиям по надежности и ресурсу для решения специфических задач. Одним из перспективных направлений в этой области являетсяразработка и исследование активных материалов и структур, способных формировать функциональные формы и профили в зависимости от внешнего воздействия, т.е. обеспечивать выполнение одного из принципов концепции управления перемещением – адаптроники. Формирование функциональных форм и профилей позволит обеспечивать оптимальный аэродинамический профиль крыла, лучшую маневренность летательного аппарата, снизить потребление топлива, энергии и обеспечить лучший дистанционный контроль в экстремальных условиях.

Описанные задачи можно решить, используя адаптивные смарт-материалы и структуры, способные реагировать на изменение внешних или внутренних условий (изменяя свое статическое и динамическое поведение), а также быть использованными в качестве сенсоров. Адаптивные смарт-материалы и структуры способны получать информацию и реагировать на изменение внешних или внутренних условий. В общем виде адаптивные смарт-материалы и структуры можно представить, как материалы и

структуры с тремя встроенными функциями: сенсорной, процессорной, исполнительной.

Для такого поведения материал и структура должны иметь нелинейно изменяющиеся свойства. Адаптивные смарт-материалы и структуры характеризуются следующими особенностями: контроль основных функций, оптимизация свойств путем обучения, контроль изменения факторов окружающей среды, способность материалов и структур анализировать ситуацию, возникшую в результате изменения окружающей среды и реагировать на данное изменение.

Применение адаптивных смарт-материалов и структур, обладающих вышеперечисленными свойствами, позволяет реализовать различные составляющие процедуры измерения физической величины:

- преобразование измеряемой величины в пропорциональный электрический сигнал;
- одновременное измерение нескольких физических величин;
- компенсация частотной и температурной погрешностей метрологических характеристик, вызванных неизмеряемыми воздействиями и влияющими факторами;
- подавление нежелательных резонансных колебаний, вибраций, шумов управляемым демпфированием;
- адаптация к условиям эксплуатации;
- осуществление задач адаптроникии др.

Из существующего на сегодняшний день научно-технического и экспериментально-технологического задела по разработке адаптивных смарт-материалов, способствующих созданию перспективных преобразователей физических величин для монтажа в элементы конструкций РКТ, можно отметить исследования американских компаний, сотрудничающих с NASA, по исследованию и созданию «умных» материалов, обладающих одним или более свойств, которые могут быть достоверно изменены контролируемым методом внешнего воздействия, таким как: воздействие механической силы, температуры, влажности, дисперсного отверждения, электрического или магнитного поля.

Существует множество эффектов для построения адаптивных смарт-материалов и структур. Например, эффект памяти формы, магнито-электрострикция, магнито-электрореологический эффект, брэгговская дифракция, сегнетоэлектричество, сегнетомагнетизм и др. Многие из них уже достаточно хорошо исследованы, внедрены и успешно реализуются на практике. Однако из всего многообразия эффектов можно выделить пьезоэлектрический, как прямой, так и обратный, как наиболее перспективный с точки зрения удовлетворения требований по контролю и управлению техническим состоянием элементов конструкций РКТ.

Комплексными преимуществами пьезоэлектрических актюаторов для построения адаптивных смарт-материалов и структур являются:

- высокие возможности по разрешению (порядка нм);

- высокая скорость срабатывания (порядкамкс);

- развитие больших сил (перемещение конструкций массой >100 т на 500 мкм с минимальным шагом 0,05-0,1 нм);

- отсутствие магнитного поля (действие пьезоктюаторов связано с электрическими полями; они не генерируют магнитные поля, а также не подвержены их влиянию);

- низкое потребление энергии (а статическом состоянии, даже под действием больших нагрузок, пьезоактюаторы не потребляют электрическую энергию и не выделяют тепловую);

- не подверженность износу (а конструкции пьезоактюаторов нет шестерен или подшипников; их перемещение обусловлено динамикой твердого тела.На практике у пьезоактюаторов не выявлен какой-либо износ после нескольких миллионов рабочих циклов);

- возможность работы в экстремальных условиях (пьезоактюаторы не требуют смазки, а пьезоэлектрических эффект присутствует даже при криогенных температурах.Кроме того, пьезоактюаторы с керамической изоляцией способны работать в условиях сверхвысокого вакуума).

Можно выделить следующие виды пьезоактюаторов, удовлетворяющие конструкционно-технологическимтребованиямдля создания адаптивных смарт-материалов и структур:

– пакетные (линейные) пьезоактюаторы;

– трубчатые актюаторы;

– биморфы и мультиморфы;

– сдвиговые пьезоактюаторы;

– ламинарные пьезоактюаторы;

– актюаторы с рычажным усилителем;

– композиционные актюаторы с пьезоэлектрическими волокнами.

Хочется обратить внимание на последний вид актюаторов, как наиболее перспективный с точки зрения внедрения в элементы конструкций за счет наличия композиционного материала с участком активного пьезокерамического волокна, заключенного в участок полимерной матрицы, когда пластичная нежесткая структура полимерной матрицы не только защищает волокно, и приводит к повышению уровня его удельной прочности, но и позволяет материалу более легко согласовываться с криволинейными поверхностями.

Существует несколько подвидов таких актюаторов.Наиболее широко используются так называемые 1-3 композиционные актюаторы, включающие в себя пьезоэлектрические стержни, заключенные в полимерную матрицу и расположенные линейно по всей толщине устройства.

Будучи прикрепленными к такой структуре, как фюзеляж самолета, данные структуры способны снизить уровни собственного шума, выступая в роли датчиков давления и актюаторов для измерения условий внешней среды и ответного снижения уровня широкодиапазонной вибрации вплоть до 20 дБ.

Следующий подвид актюаторов – композиты из активного волокна. В данном типе устройства одноосно совмещаются пьезокерамические волокна, окруженные полимерной матрицей, кроме того, могут присутствовать неактивные стекловолокна для повышения уровня конструкционной прочности. Прочная связь между матрицей и волокнами позволяет через матрицу стабильно и последовательно передавать нагрузку, приложенную на волокна, на основную структуру. Гребенчатые электроды передают напряжение электрического поля, необходимое для активации пьезоэлектрического эффекта в волокнах.

Данный тип актюаторовхарактеризуется легкостью, с которой они внедряются в практически любую многослойную композитную структуру, в частности, лопасти несущего винта вертолета, характеризующиеся значительным шумом и вибрацией в полете из-за высоких аэродинамических нагрузок.

Третий подвидактюаторов, в котором используются и активные, и композитные материалы, вдобавок к гребенчатым электродам, называется макроволоконным композитом. Данный активный элемент также включает в себя одноосно совмещенные волокна, окруженные полимерной матрицей, но волокна обладают прямоугольным поперечным срезом. Здесь также используется гребенчатый электрод, распространяющий напряжение электрического поля по всей длине волокон, опираясь при этом на прочную связь между матрицей и волокнами, чтобы должным образом преобразовывать заряд приведения в действие. Данные актюаторы предназначены для нейтрализации напряжения при кручении и напряжение изгиба, которые прилагаются на стабилизаторы самолетов во время полета в результате ударной нагрузки.

Таким образом, использование пьезоактюаторов, в частности, композиционных актюаторов с пьезоэлектрическими волокнами, потенциально способносоздавать материалы и структуры для контроля и управления характеристиками элементов конструкций РКТ с требуемыми характеристиками.Однако в настоящее время не решен комплекс вопросов, обусловленныйсуществующими ограничениями в части отсутствия фундаментального подхода к разработке и созданию адаптивных смарт-материалов и структур, заключающегося в решении следующих задач:

– исследование номенклатуры исследовательских задач по измерению и управлению параметрами элементов конструкций РКТ;

– анализ и обобщение технических и структурных требований к элементам конструкций РКТ с точки зрения инкорпорирования адаптивными смарт-материалами и структурами со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта;

– исследования и разработка технических требований и измерительных задач к адаптивным смарт-материалоам и структурам со свойствами

прямого и обратного пьезоэффекта для монтажа в элементы конструкций РКТ.

– исследования и разработка методов и средств информационного обмена и алгоритмов взаимодействия между элементами адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта и управляющей системой;

– анализ методов и средств управления физико-химическими свойствами и рецептурами адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта;

– исследования состава рецептур адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта.

– исследования и формирование перечня технологических переходов, операций, методов, режимов изготовления адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта.

– исследования и разработка физико-математических и топологических моделей, программ расчета по локализации адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта с точки зрения удовлетворения конструкционно-механических требований по надежности элементов конструкций РКТ;

– исследования и разработка структурно-алгоритмических моделей элементов конструкций РКТ для обеспечения инкорпорирования адаптивными смарт-материалоами и структурами со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта;

– исследования и определение технологических методов внедрения и особенностей монтажа в элементы конструкций РКТ адаптивных смарт-материалов и структур со свойствами прямого и обратного пьезоэффекта.

Таким образом, от реализации данных вопросов будет зависеть решение комплексной задачипо контролю и управлению характеристиками элементов конструкций РКТ с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций.

Исследование ТКЛР пьезокерамических материалов

Д.А. Добрынин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Зеленоград, Россия

Известно множество пьезокерамических материалов. Разработчики, как правило, сообщают их основные физические свойства, однако среди характеристик часто не указывается температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), а если указывается, то только его поведение при температурах ниже точки Кюри [1]. При создании новых материалов, в том числе композиционных, учитывать ТКЛР необходимо. Поэтому была поставлена задача определить ТКЛР наиболее доступных марок пьезокерамики.

Были выбраны следующие пьезокерамические материалы, производимые ОАО «НИИ «Элпа»: ЦТС-19, ЦТС-26, ЦТС-36, ЦТС-46, НЦТС-1, НЦТБС-1 и ТСВС-1. Данные материалы интересны тем, что они различаются по характеристикам (температуре точки Кюри и пьезомодулям d_{33} , d_{31}), и, в то же время, близки по температуре спекания.

Образцы размерами 25x3x3 мм были изготовлены по технологии сухого прессования. Проведен анализ образцов на дилатометре Netzsch DIL 402 PC. Исследована зависимость длины образцов от температуры в диапазоне 20…600 °C (рис. 1).

Далее было проведено численное дифференцирование этих зависимостей, то есть были получены зависимости ТКЛР от температуры. Каждая зависимость была поделена на участки ниже и выше точки Кюри T_K , это разделение было проведено в связи с тем, что структура материала меняется при переходе через точку Кюри. Точка Кюри определялась по положению минимума (или максимума для ЦТС-36) на зависимости ТКЛР от температуры. В указанных пределах зависимость ТКЛР аппроксимировали уравнением вида

$$\alpha(T) = aT + b \quad K^{-1},$$

Коэффициенты *a* и *b* приведены в таблице.

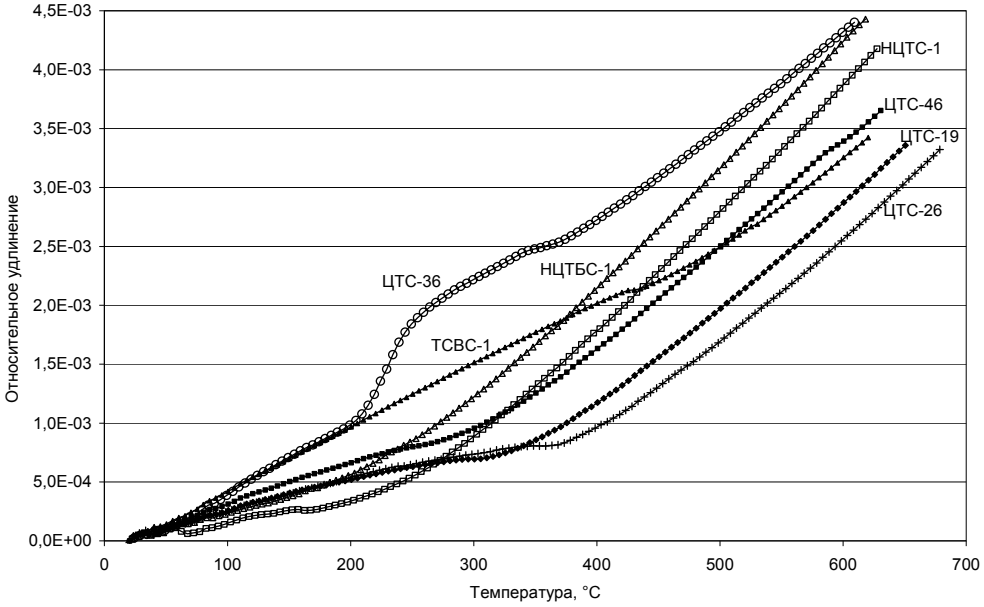


Рис.1. Зависимость относительного удлинения пьезокерамики от температуры

Материал	T_K, °С	$20°C < T < T_K$		$T_K < T < 600°C$	
		a	B	a	b
ЦТС-19	300	$-8{,}7\cdot10^{-9}$	$3{,}9\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$2{,}9\cdot10^{-6}$
ЦТС-26	350	$5{,}8\cdot10^{-9}$	$3{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	$1{,}5\cdot10^{-6}$
ЦТС-36	230	$18\cdot10^{-9}$	$3{,}9\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$2{,}4\cdot10^{-6}$
ЦТС-46	250	$-7{,}8\cdot10^{-9}$	$4{,}5\cdot10^{-6}$	$0{,}95\cdot10^{-8}$	$4{,}3\cdot10^{-6}$
НЦТС-1	170	$-61\cdot10^{-9}$	$9{,}9\cdot10^{-6}$	$0{,}98\cdot10^{-8}$	$5{,}4\cdot10^{-6}$
НЦТБС-1	130	$16\cdot10^{-9}$	$0{,}97\cdot10^{-6}$	$0{,}65\cdot10^{-8}$	$7{,}2\cdot10^{-6}$
ТСВС-1	430	$-3{,}9\cdot10^{-9}$	$6{,}2\cdot10^{-6}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$-4{,}5\cdot10^{-6}$

При аппроксимации не учитывались значения ТКЛР вблизи точки Кюри из-за переходных процессов. Очевидно, что материал ТСВС-1 резко отличается от остальных, поскольку относится к другой системе твердых растворов.

В докладе обсуждается, какие пары материалов наиболее совместимы по ТКЛР, температуре спекания и другим характеристикам. Приводится анализ влияния состава пьезокерамики на коэффициент расширения.

Список литературы

1. Данцигер А.Я. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. — Ростов н/Д.: МП «Книга», 2002. Т2. с.317-322.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПЬЕЗОТЕХНИКИ

Автономный пьезоэлектрический генератор

А.Л. Гриценко, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, В.Г. Никифоров, Д.Ю. Шахворостов, Т.В. Щёголева

ОАО «НИИ «Элпа», г. Москва, г. Зеленоград, Россия

При современном уровне развития транспортных средств, обеспечивающих потребность в быстром передвижении людей и грузов на различные расстояния, транспорт не является экономичным – теряется значительная часть используемой энергии за счёт всевозможных вибраций, тряски, ускорения, торможения и т.д. механической энергии безвозвратно рассеиваемой в окружающую среду.

Одним из путей прямого преобразования механической энергии транспортных средств в электрическую энергию является создание автономных высокоэффективных пьезоэлектрических генераторов [1-5].

Современная технологическая база создания многослойных пьезоэлектрических преобразователей позволяет создавать конструкции пьезоэлектрических генераторов, обеспечивающих высокими механическими нагрузками на полотно автодорог и железнодорожного пути [2-4].

В России одна из самых длинных сетей железнодорожных путей в мире, которые зачастую находятся в отдалённых от городских центров районах и очень важно обеспечить автономное электропитание систем входящих в инфраструктуру современной железной дороги: светофоры, всевозможные сигнальные огни и датчики контроля движения.

Для решения поставленной задачи в ОАО «НИИ «Элпа» разработан типовой модуль автономного пьезоэлектрического генератора, преобразующий механическую энергию с давлением от $10^6 \div 10^8$ Н/м^2 в электрическую энергию.

Модульная конструкция позволяет под конкретные задачи автономного обеспечения электроэнергией собирать их в линейку, обеспечивающую простоту установки и монтажа в полотно железной дороги.

Основные ограничения по применению пьезокерамических генераторов в системах преобразования механической энергии деформации сжатия-растяжения, связанны с предельными параметрами пьезокерамики [2] в пределах прочности пьезокерамики на растяжение и сжатие $-T_{33} \le 10^8 H/м^2$ [1,2], а для многослойных структур ограничением электрической прочности $E/h \le 2 \cdot 10^6 В/м$, при которых обеспечивается долговечность пьезоизделий в частотном диапазоне напряжения до 100 Гц с более чем $2 \cdot 10^9$ импульсов.

Таким образом, для многослойных пьезоэлектрических генераторов номинальная величина $T_{33} \approx 4 \div 6 \cdot 10^7 H/м^2$.

С учётом этих ограничений и на основании расчётных соотношений была разработана конструкция модуля автономного многослойного пьезоэлектрического генератора ГН-1 приведённого на рис.1.

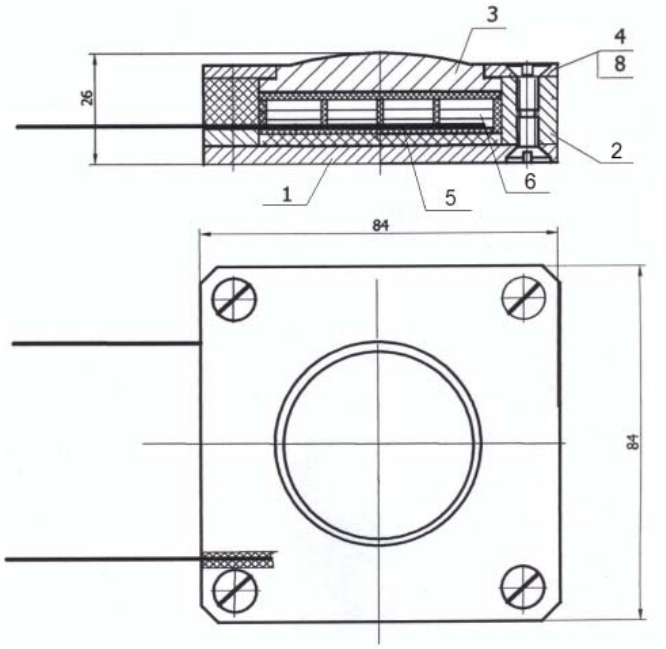


Рис.1. Конструкция модуля многослойного пьезоэлектрического генератора ГН-1.

Многослойный пьезоэлектрический блок состоит из 32 тонкоплёночных пьезокерамических элементов толщиной 80 мкм (пьезокерамический материал ЦТС-46), соединённых между собой механически последовательно, а электрически параллельно (толщина слоя внутренних электродов 4÷6 мкм, материал сплав серебро-палладий 70/30).

Исследовались электрофизические параметры ГН-1 – зависимость напряжения от давления.

Измерения проводились на пресс-установке, обеспечивающей плавную подачу давления в диапазоне измерений от 10^6 до $5 \cdot 10^7$ Н/м^2 со скоростью 10^6 Н/м^2 в сек. Время снятия давления была не более 0,1 сек.

Напряжение измерялось при подключении ГН-1 по схеме, приведённой на рис.2.

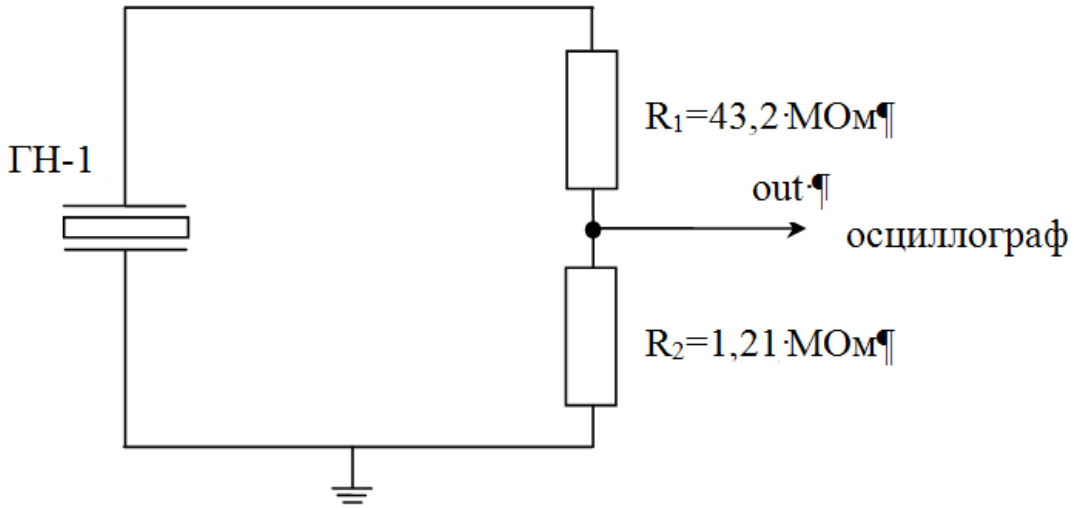


Рис.2. Схема измерения напряжения ГН-1.

С делителя регистрировалось напряжение при циклах сжатия и растяжения цифрового осциллографа типа по принятой методике.

Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	Значения	
	Расчёт	эксперимент
При приложении давления		
Напряжение, В	88	75
Заряд, Кл	$3{,}52 \cdot 10^{-3}$	$3{,}00 \cdot 10^{-3}$
Энергия, Дж	$70 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-3}$
При снятии давления		
Напряжение, В	88	66
Заряд, Кл	$3{,}52 \cdot 10^{-3}$	$2{,}64 \cdot 10^{-3}$
Энергия, Дж	$70 \cdot 10^{-3}$	$52{,}8 \cdot 10^{-3}$

Примечание: Повторяемость наблюдалось в более, чем 20 циклах, в таблице приведены средние значения (с точностью ±5%).

Измерения ёмкости до и после снятия давления находилось в пределе $C_0 = 40 \pm 5\%$.

При снятии нагрузки наблюдается в цикле растяжения-сжатия напряжение, которое связано с остаточным зарядом.

Для железнодорожного состава, состоящего из 50 вагонов при интенсивности давления 1 состав в час за сутки аккумулируется энергия одного модуля $W_{ЭЛ} = 30 Дж$, заряд $Q = 15{,}6 К$, мощность $P = 7{,}5 кВт$.

Поскольку пьезоэлектрический генератор работает автономно в течение продолжительного времени с относительно малой электрической энергией произведённой за один цикл сжатия-растяжения, то, используя систему накопления и хранения энергии в основном как источник зарядки аккумуляторных батарей.

Эта проблема является самостоятельной задачей и определяет эффективность преобразования для потребителя. В настоящее время в ОАО «НИИ «Элпа» совместно с сотрудниками МГТУ проводятся исследования

по эффективному сбору и накоплению энергии с КПД до 70%. Кроме того, в ОАО «НИИ «Элпа» завершается разработка специального пьезокерамического материала с низкой температурой спекания 1000÷1100 °С с $d_{33} = 800 \div 1000 \cdot 10^{-12} К/Н$ для пьезоэлектрических генераторов, которые повышают эффективность преобразования в 1,5÷1,8 раз.

Список литературы

1. Waanders J.W. Piezoelectric Ceramics. Proper ties and Applications // Philips Components Marketing Communication Eindhoven April, 1991.

2. Никифоров В.Г., Чернов В.А. Предельные параметры твёрдотельных многослойных пьезоэлектрических батареек // Материалы VI Научно-технической конференции «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологии». Анапа 22-26 сентября 2008 г.

3. В.А. Головнин, Е.С. Горнев, А.В., Дайнеко, Д.А. Добрынин, «Сравнительные характеристики пьезокерамических механоэлектрических преобразователей для генерации электричества». Вестник ТвТУ Серия Физика, 2010 г., вып. 11, стр.33-46.

4. Акопьян В., Лартонов И., Истомин И. Пьезогенераторы – новое перспективное направление малой энергетики // Наука и техника, 2011 г. №2.

5. А. Гриценко, В. Никифоров, Т. Щёголева // Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов. Компоненты и технологии №9 2012 г. стр.63-68.

Многослойные пьезоэлектрические приводы

А.Л. Гриценко, А.В. Дайнеко, С.С. Нерсесов, В.Г. Никифоров, Т.В. Щёголева

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

Пьезоэлектрические приводы, на основе многослойных пьезоэлектрических актюаторов, обладают рядом уникальных свойств в отличие от их электромеханических, электромагнитных, гидравлических аналогов: высокой разрешающей способностью на уровне нм (при включении в систему с обратной связью), малые размеры и масса, развивают высокие выходные удельные усилия до 40 Н/мм^2, имеют широкий диапазон рабочих частот от единиц до $10^3 \div 10^4$ Гц, низкое энергопотребление, имеют повышенную устойчивость к внешним механическим нагрузкам, при их работе отсутствуют внешние электромагнитные помехи, устойчиво и надёжно работают в широком температурном диапазоне от -65ºС до +85 ºС, в вакууме, высокая надёжность и долговечность до $2 \cdot 10^9$ импульсов.

Основными недостатками пьезоэлектрических приводов являются относительно малые линейные перемещения $\Delta L / L \leq 0{,}1\%$, что резко ограничивает их область применения. С другой стороны многослойные пьезоэлектрические актюаторы имеют избыточный запас по развиваемому усилию, что позволяет увеличивать амплитуду перемещений при установке их в систему мультиплицирования, обеспечивающую увеличение амплитуды перемещений в 8÷10 раз. В качестве базовой конструкции пьезоэлектрического микроактюатора была выбрана конструкция многослойного пьезоэлектрического актюатора на базе многослойного пьезокерамического элемента, изготовленного по индивидуальной литьевой технологии.

Основным элементом конструкции многослойных пьезоэлектрических актюаторов является пьезокерамический многослойный элемент с размерами 12×15×3,2. В зависимости от типа актюатора собирается пьезокерамический блок из пьезокерамических

элементов с помощью клеевого соединения (клей К-400).

Исходные оптимальные соотношения различных вариантов конструкции мультипликаторов легли в основу конструирования многослойных пьезоэлектрических приводов трёх вариантов для работы под нагрузкой до 150 Н в диапазоне частот 10÷100 Гц, при управляющих напряжениях 30÷150 В.

Таблица 1 Электрофизические параметры пьезоприводов в нормальных климатических условиях

Параметры	Ед. изм.	Значения пьезопривода		
		№1	№2	№3
Статическая ёмкость	мкФ	35,8	35,3	35,4
Сопротивление изоляции	МОм	53	45	35
Масса	г	290	310	405

Таблица 2. Измерения электрических параметров пьезоэлектрических приводов в нормальных климатических условиях

№ п/п	Режимы испытаний	Амплитуда перемещения, ΔZ, мкм		
		пьезопривод №1	пьезопривод №2	пьезопривод №3
1	Напряжение, U=+150В Частота, f, Гц	I. Усилие F=50 Н		
1.1	Статический режим	1025	790	720
1.2	10	940	750	700
1.3	20	940	750	700
1.4	30	940	750	700
1.5	40	940	750	700
1.6	50	940	750	700
2	Напряжение, U=+150В Частота, f, Гц	II. Усилие F=100 Н		
2.1	Статический режим	950	750	720
2.2	10	940	750	700
2.3	20	940	740	700
2.4	30	940	740	700
2.5	40	940	740	700
2.6	50	910	740	700
3	Напряжение, U=+150В Частота, f, Гц	III. Усилие F=150 Н		
3.1	Статический режим	950	750	700
3.2	10	910	720	600
3.3	20	920	740	600
3.4	30	920	740	600
3.5	40	910	740	600
3.6	50	910	740	600

Пьезопривод №1 имеет максимальную величину линейных перемещений, которая в статическом режиме равна 1,025 мм, т.е. обеспечивает мультиплицирование с коэффициентом ~9÷10.

В динамическом режиме максимальная амплитуда перемещений зависит от частоты (в частотном диапазоне 10÷50 Гц).

При изменении усилия от 50 до 150 Н изменения амплитуды перемещения не значительны.

Для исследования многослойных пьезоприводов в динамическом режиме и определения возможности преобразования линейных перемещений в угловые перемещения с усилием не менее 150 Н был разработан демонстрационный испытательный стенд.

Таблица 3. Перемещение пьезоэлектрических приводов в статическом и динамическом режимах

№ п/п	Режимы испытаний	Значения перемещения (мкм) и угла порота (град)					
		пьезопривод №1		пьезопривод №2		пьезопривод №3	
		Δl, мкм	$\Delta\alpha$, град	Δl, мкм	$\Delta\alpha$, град	Δl, мкм	$\Delta\alpha$, град
1	Напряжение, U=+150В. Частота, f, Гц	I. Усилие F=50 Н					
1.1	Статический режим	1000	–	790	–	735	–
1.2	10	940	7,2	790	6,0	730	5,7
1.3	20	940	7,2	790	6,0	730	5,7
1.4	30	940	7,2	790	6,0	730	5,7
1.5	40	940	7,2	790	6,0	730	5,7
1.6	50	940	7,2	790	6,0	730	5,7
2	Напряжение, U=+150В. Частота, f, Гц	II. Усилие F=100 Н					
2.1	Статический режим	945	7,3	800	–	735	–
2.2	10	940	7,2	790	6,0	720	5,6
2.3	20	940	7,2	790	6,0	720	5,6
2.4	30	940	7,2	790	6,0	720	5,6
2.5	40	940	7,2	790	6,0	720	5,6
2.6	50	940	7,2	790	6,0	720	5,6
3	Напряжение, U=+150В. Частота, f, Гц	III. Усилие F=150 Н					
3.1	Статический режим	945	7,3	790	–	735	–
3.2	10	920	7,1	790	6,0	720	5,6
3.3	20	920	7,1	790	6,0	720	5,6
3.4	30	920	7,1	790	6,0	720	5,6
3.5	40	920	7,1	790	6,0	720	5,6
3.6	50	920	7,1	790	6,0	720	5,6

Угол поворота не зависит от частоты и прилагаемого усилия и определяется конструкцией пьезопривода.

Проведённые исследования показали, что разработанные многослойные пьезоэлектрические приводы обладают высокой механической энергией (произведение перемещения и развиваемого усилия, отнесённое к массе), высоким разрешением по перемещению ±0,01 мкм, низким энергопотреблением не более 30 Вт, высоким быстродействием. Могут быть также применены в качестве высокоточных адаптивных приводов в различных областях науки и техники, в том числе для систем прямого управления закрылком лопасти несущего винта вертолёта [2-4].

Список литературы

1. Патент на изобретение №2390090 «Линейный пьезоэлектрический двигатель». 20 мая 2010 г. Авторы: А.Л. Гриценко, А.Я. Сафронов.

2. Р.М. Образцов. Мультиплицированные пьезоэлектрические приводы для применения в авиатехнике.

3. Active Rotors Ready for lift – off. Posted by Graham Warwick oct.8/28/2009.

4. Aerolastic and Structural dynamics design and qualification of Rotation modules experimental validation a flap actuator for helicopter blades.

Влияние внешних факторов на параметры пьезокерамических датчиков угловых скоростей

А. В. Переплетчиков, И. И. Макан, Д. Ю. Шахворостов

ОАО «НИИ «Элпа», г. Москва, г. Зеленоград, Россия

Датчики угловых скоростей (ДУС) находят применение в навигационных системах и системах телеметрии, во многих областях. Существует множество ДУС, способных заменить механические гироскопы. Одни из них — балочные пьезокерамические гироскопы, обладающие малыми размерами и низкой стоимостью, разработка которых ведется в ОАО «НИИ «Элпа». Они имеют широкий диапазон измеряемых скоростей, обладают нелинейностью ниже 2% и порогом чувствительности до 0,05 °/сек.

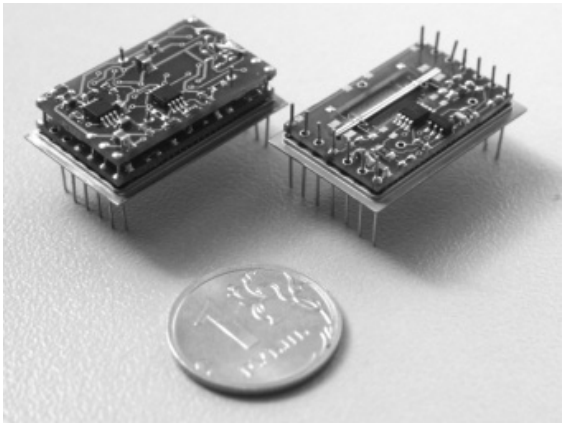


Рис.1 Датчик угловых скоростей ГПБ-2, производства ОАО «НИИ «Элпа», и его чувствительный элемент.

Основные характеристики ДУС это выходной сигнал в состоянии покоя U_0 (нулевой сигнал) и масштабный коэффициент преобразования МК:

$$МК = \frac{U_0 - U_\omega}{\omega},$$

где U_0 — нулевой сигнал датчика, ω — значение угловой скорости, U_ω — сигнал датчика при заданной угловой скорости.

Основная проблема ДУС это смещение величины выходного сигнала датчика, относительно его начального значения, которое вносит ошибку при определении угловой скорости (дрейф). Различают временные и

температурные дрейфы. Временной дрейф, как правило, носит экспоненциальный характер. Его величина имеет случайное распределение и на данный момент не описана каким-либо законом.

Для решения проблемы температурного дрейфа необходимо вводить компенсацию сигнала при помощи электроники. Для уменьшения чувствительности пьезокерамики к воздействию температуры, может быть использовано искусственное старение.

Влияние на свойства ЧЭ могут оказать влага в атмосфере, различные загрязнители. Проблема может решаться просушиванием и лакированием ЧЭ, но это может повлиять на чувствительность ДУС в целом. Влияние влаги, и загрязнителей, может быть исключено герметизацией ЧЭ с использованием сухого азота. Также необходимо улучшать технологический процесс в целом, использовать помещения с определенным микроклиматом, заданной температурой и влажностью, чтобы исключать влияние внешних факторов в процессе настройки и сборки.

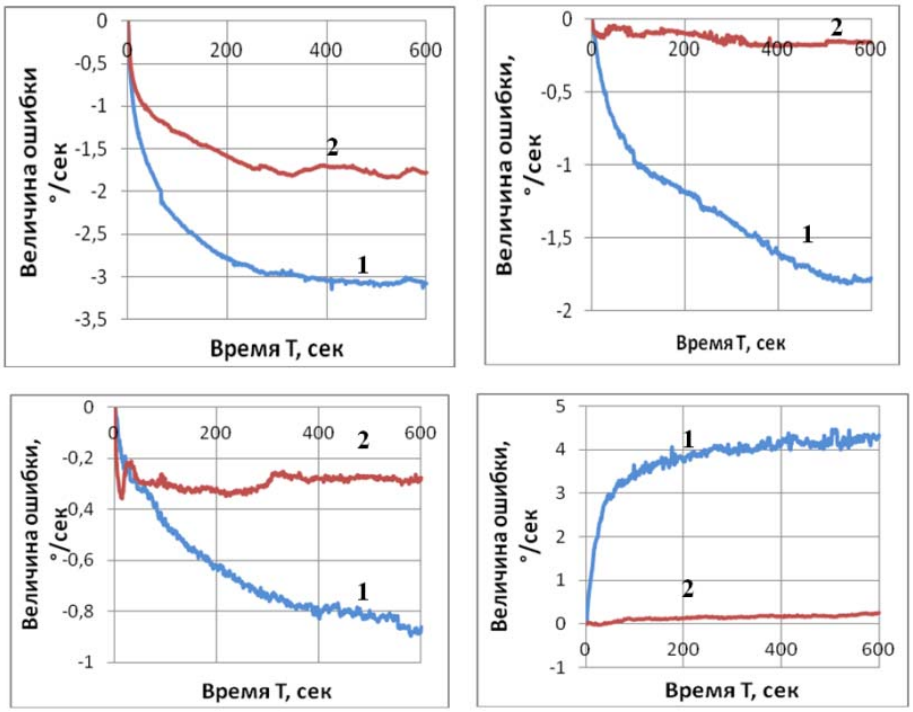


Рис. 2. Сравнение временных дрейфов незаргерметизированных (1) и загерметизированных (2) ДУС

Были проведены измерения дрейфа нулевого сигнала для ДУС без корпуса и с корпусом, наполненным сухим азотом. Величина нулевого сигнала в состоянии покоя считывалась в течение десяти минут от момента подачи питания на датчик с интервалом в 1 секунду. Измерения проводились при температуре T = 21°C и относительной влажности 85%. Перед герметизацией чувствительные элементы просушивались. Измерения проводились на датчиках, с диапазоном скоростей ±60 °/сек. Результаты измерений выборки из четырех образцов представлены на рис. 2. В целом характер дрейфа не изменился, его значения уменьшились от 1,8 до 20 раз. Вносимая ошибка для загерметизированных ДУС после 10 минут работы не превышает 2 °/сек в четырех случаях.

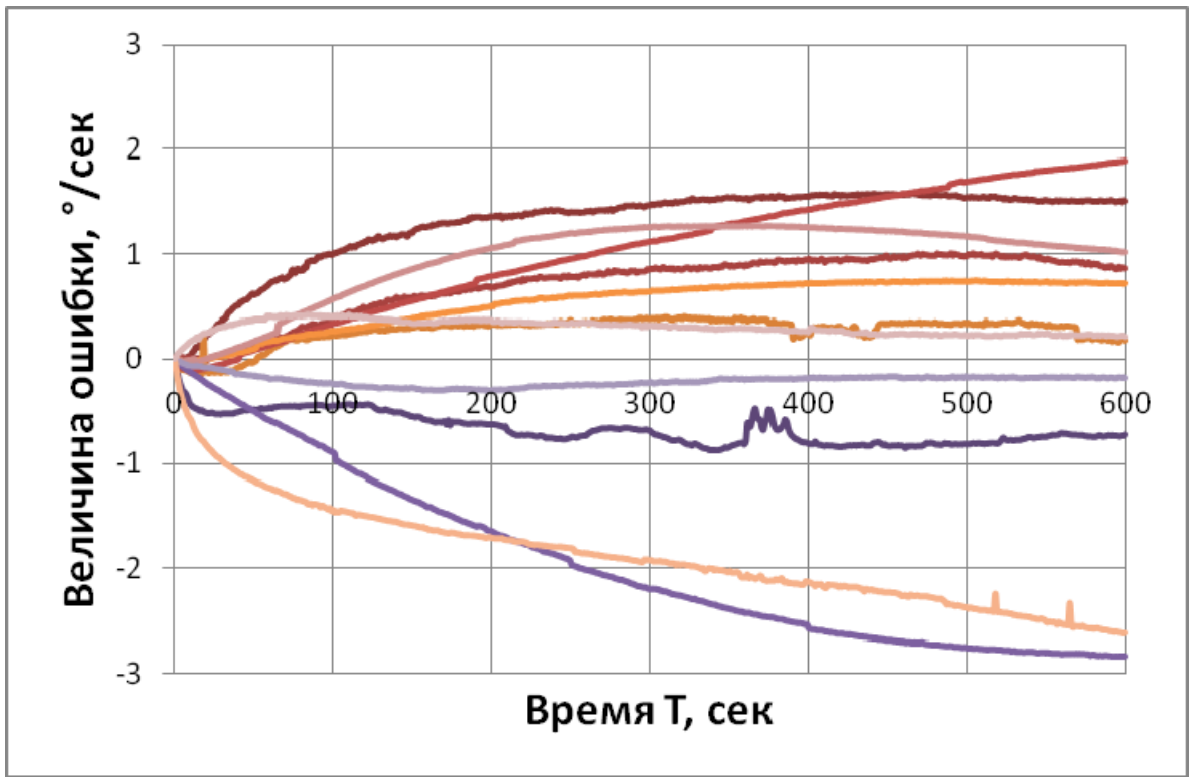


Рис.3. Временные дрейфы выборки из 10 загерметизированных ДУС.

На рис.3 показаны измерения дрейфов выборки из 10 загерметизированных образцов ДУС с диапазоном скоростей ± 60 °/сек.

Дрейфы имеют экспоненциальный характер, их значения в 8 из 10 случаев не превышают 2 °/сек.

Измерения показали, что герметизация уменьшает величину временного дрейфа. Справедливо предположить, что введение в технологический процесс условий, ставших нормой для производства аналогичных изделий на основе других материалов, положительно повлияет на точность и стабильность пьезокерамических балочных датчиков угловых скоростей.

Список литературы

1. А.Я.Сафронов, В.Г.Никифоров, Д.Ю.Шахворостов, А.К.Калифатиди, В.В.Барыкин. Малогабаритные пьезоэлектрические вибрационные гироскопы широкого применения. //Электроника НТБ. – 2006. - №8. с. 62-64;
2. Образцов Р.М. Малогабаритный вибрационный гироскоп с балочным биморфным чувствительным элементом из пьезоэлектрической керамики. //Нано- и микросистемная техника. – 2008. - №10. – с. 52-54;
3. Макан И.И., Шелехов Р.В., Шахворостов Д.Ю. Особенности настройки чувствительного элемента балочного пьезокерамического биморфного датчика угловых скоростей. //Известия вузов. Электроника. – 2012. - №3. С. 84-86;

Малогабаритный акселерометр для диагностики и мониторинга сооружений, оборудования, грунтов и других объектов

В.Н. Зинченко, Н.А. Каширин, В.М. Нечаев, Г.М. Нигметов, Т.В. Щёголева

ОАО «НИИ «Элпа», г. Москва, г. Зеленоград

Акселерометры и сейсмодатчики в настоящее время интенсивно внедряются в различные области народного хозяйства. Это сейсмология, мониторинг зданий и других сооружений, системы охраны периметров, окружающих АЭС, ЛЭП и др., системы навигации необитаемых подводных аппаратов, МЧС и др.

В ОАО «НИИ «Элпа» на протяжении нескольких лет ведутся разработки сейсмодатчиков и акселерометров для этих нужд. В частности, разработан малогабаритный однокоординатный сейсмодатчик-акселерометр МА-1Э (рис.1), не уступающий по эксплуатационным характеристикам лучшим отечественным и зарубежным образцам, а по ряду характеристик, даже их превосходящих (однополярное питание, любое от 5 до 24 В, универсальный выход – как на витую пару, так и обычный и др.).

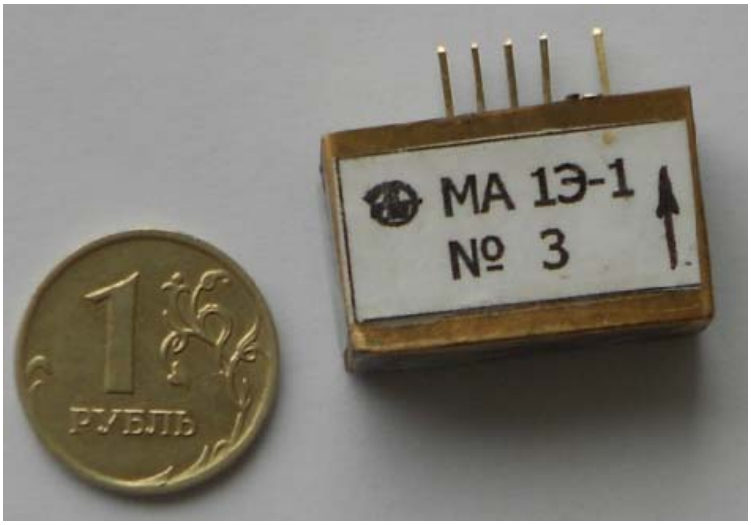


Рис.1. Однокоординатный сейсмодатчик-акселерометр МА-1Э

Таблица – Основные параметры

Параметр	**Ед. изм.**	**Значение**
Рабочий диапазон частот	Гц	0,1 ÷ 400
Коэффициент преобразования	В/g	1 ÷ 50
Эффективное значение собственных шумов в единицах ускорения, приведенных к входу	g	$5 \cdot 10^{-5}$
Интервал рабочих температур	ºС	-40 ÷ +65
Габаритные размеры, не более	мм	30×20×12

С помощью вибростенда 4810 были проведены сравнительные испытания акселерометра МА1Э и датчика фирмы Брюль и Къерр 4513-001. Результаты испытаний представлены на рис.2 и 3.

На рис.2 приведено отношение выходных сигналов акселерометров МА1Э и 4513-001 в зависимости от частоты колебания вибростенда. Уменьшение этого отношения на частотах выше 100 Гц обусловлено уменьшением выходного сигнала МА1Э, что в свою очередь обусловлено наличием фильтра нижних частот в составе МА1Э.

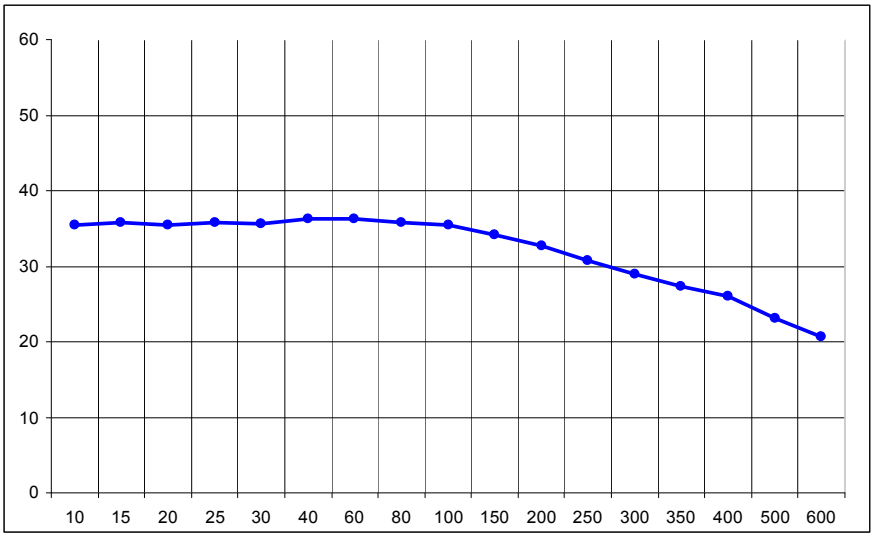
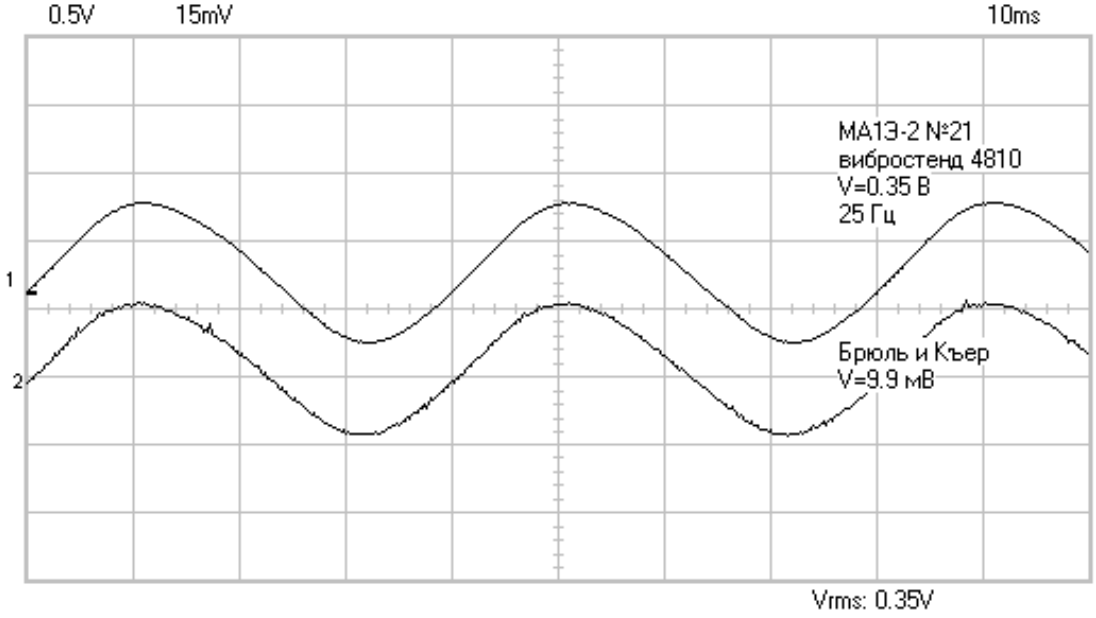


Рис.2. Отношение выходных сигналов акселерометров МА1Э и 4513-001

При приближении частоты колебаний вибростенда к верхней рабочей частоте МА1Э наблюдается увеличение фазового сдвига отклика МА1Э, что объясняется фазовой характеристикой полосы пропускания (для датчика фирмы Брюль и Къерр она достигает 10 кГц). На границах рабочего диапазона частот фаза отклика изменяется максимально.

На рис.3 (а, б) приведены осциллограммы откликов датчиков на разных частотах. Видно совпадение фаз на 25 Гц и усиливающееся их различие с ростом частоты до 400 Гц.

а)



б)

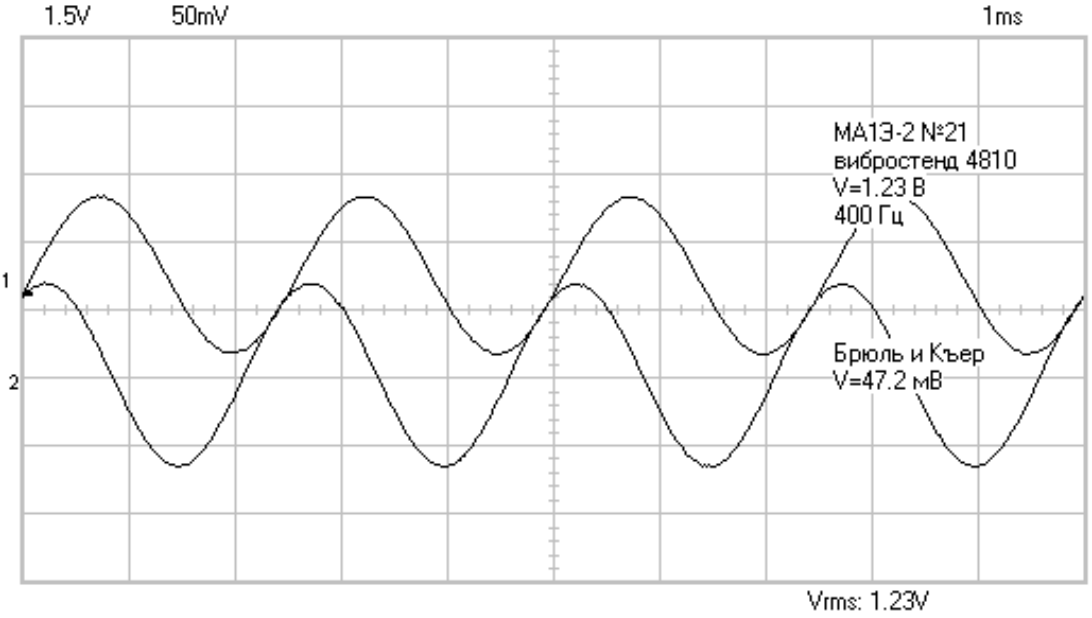


Рис.3. Осциллограммы откликов датчиков на разных частотах

На рис.4 приведены две осциллограммы откликов на слабое ударное воздействие (слабый удар по лабораторному столу) одного из лучших отечественных трёхкоординатных сейсмодатчиков А1633 фирмы ЗАО «Геоакустика» и МА1Э. Идентичность откликов, фиксируемая обоими датчиками свидетельствует об их неискаженном воспроизведении, и их взаимной идентичностью по этой характеристике.

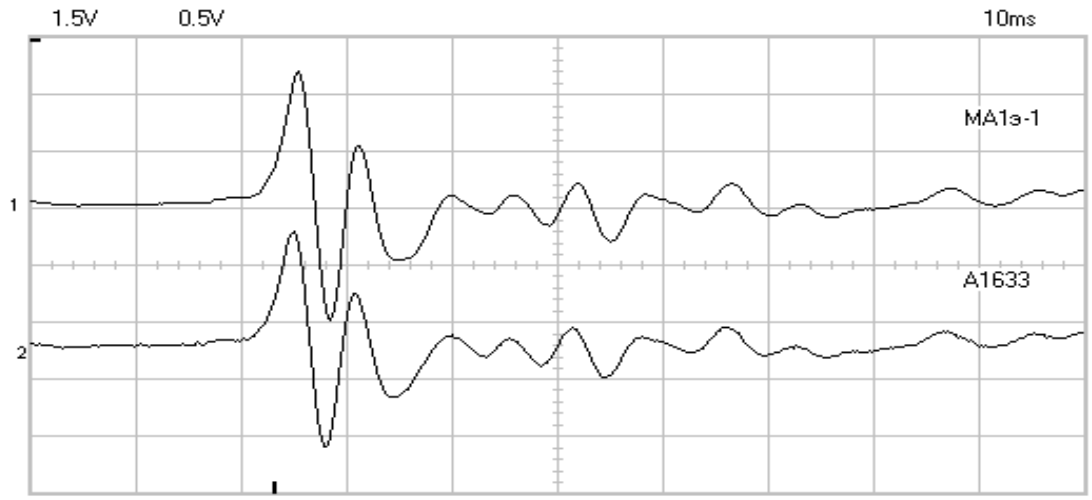


Рис.4. Реакция всей механической системы (стол, приборы и т.д.) на два отдельных слабых удара (внешние воздействия) для пары МА1Э-1 и А1633

Список литературы

1. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник том II, М., «Радиотехника», 2000.
2. Методы калибровки акселерометро
3. вwww.zetms.ru/support/articles/analysers/metodi_kalibrovki/
4. Вибростенд 4810.www.bruel.ru/User Files/File/4290.pdf
5. www.elpapiezo.ru/SD-1E.shtml

Тарировка пьезоэлектрического датчика удара
с использованием многослойных резонаторов

Г.Г. Дольников[1], С.О. Сегеда[2], О.В. Малышкина[2],
Н.В. Иноземцев[3], В.А. Головнин[3]

[1]Институт космических исследований, г. Москва, Россия
[2]Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия
[3]ОАО «Научно-исследовательский институт «ЭЛПА»
, г. Зеленоград, Россия

Одно из применений датчиков на основе пьезокерамики это возможность измерения давления, силы и удара или вибрации и ускорения. В данном направлении представляет интерес изготовление датчика удара, позволяющего фиксировать пылевые частицы в условиях разреженной атмосферы (на Луне, спутниках Марса и др. небесных телах) и оценивать их физические параметры, такие как импульс, скорость, масса. Пьезоэлектрический преобразователь, работающий в режиме прямого пьезоэффекта, реагирует на воздействие внешней силы, на выходе измеряемой величиной является электрическое напряжение (U), которое зависит не только от величины механического воздействия (F), но и от свойств измерительной схемы. Снимаемые на выходе измерительной цепи показания, таким образом, зависят от многих факторов и для определения взаимнооднозначного соответствия между измеряемой величиной U и действующим импульсом $m \cdot V$ необходимо проведение калибровки, называемой в данном случае тарировка.

В настоящей работе предложен метод тарировки пьезокерамических ударных датчиков с использованием многослойных резонаторов. Оптимальным материалом для датчиков является ЦТС-36П – пьезокомпозит со связностью 3-0, обладающий наибольшей пьезочувствительностью среди серийно выпускаемых на производстве ОАО «НИИ Элпа» аналогов. Пористость (23–26)% уменьшает плотность и повышает отношение $d_{33}/\varepsilon_{33}\varepsilon_0$.

Теоретическая основа метода состоит в том, что в нем не используется земное притяжение. Возникающий при механическом воздействии заряд Q не зависит от размеров (S –площадь, h – высота) пьезокерамического элемента, и для датчиков, использующих деформации «сжатия-растяжения» определяется по формуле $Q=Fd_{ij}$, где F – сила, d_{ij} – величина пьезомодуля, в большинстве случаев для пьезокерамических датчиков это пьезомодуль $d_{ij} = d_{33}$. Поскольку емкость рабочего тела датчика $C \sim k\varepsilon_{33}$, где ε_{33} – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрического материала, k – коэффициент, определяемый его геометрией, то разность потенциалов U, возникающая на электродах рабочего тела датчика и равная $U=Q/C$, пропорциональна действующей на датчик силе: $U \sim Fkd_{33}/\varepsilon_{33}$.

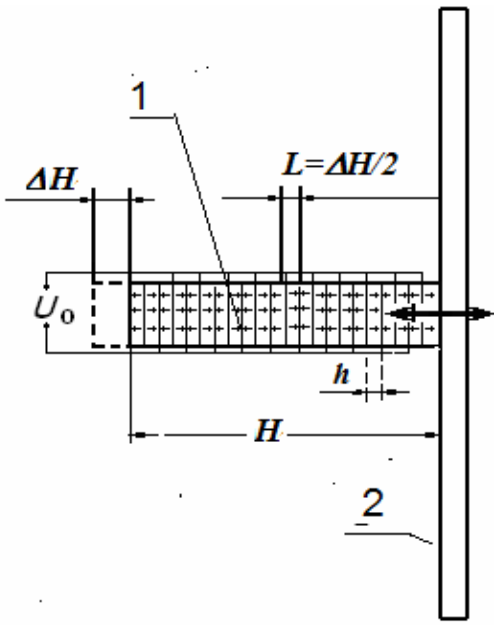


Рис. 1. Схема соединения многослойного пьезорезо-натора (1) и тарируемого датчика удара (2) – пластины керамики ЦТС

В эксперименте (рис.1) многослойный пьезоэлемент–резонатор *1* жестко соединен плоскостью 6х6 с рабочим пьезоэлементом *2*. Многослойный пьезоэлемент (размером 6х6х2,7 мм, массой $m = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ кг) состоит из 50 слоев пьезокерамической пленки толщиной h =50 мкм, расположенными между металлическими электродами толщиной 3÷5 мкм; слои соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

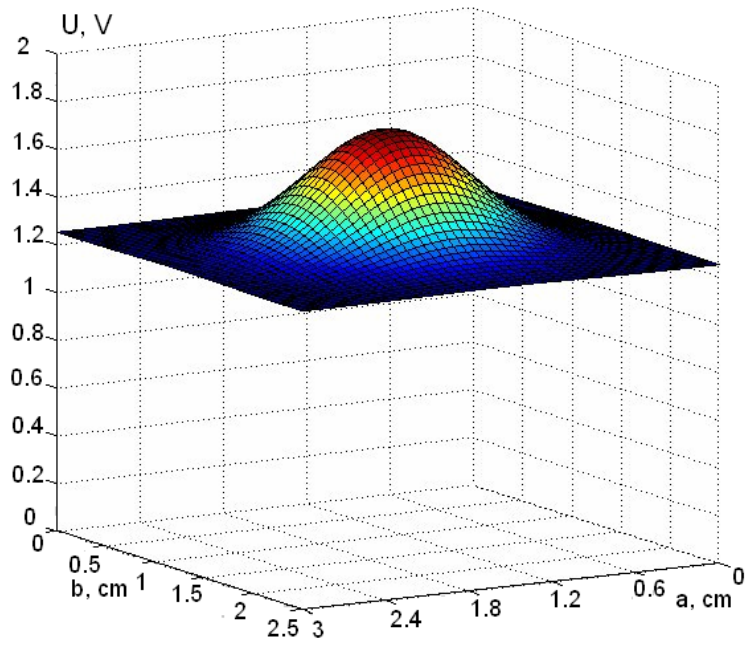


Рис. 2. Зависимость величины выходного напряжения от места попадания шарика

Крепление пьезоэлемента–резонатора производилось в разных местах датчика. Обнаружено, что отклик на внешнее воздействие центральных областей больше, чем с крайних. Это соответствует расчетам зависимости величины выходного напряжения от места удара (рис.2), проведенным на основе статистических данных по экспериментам с металлическим шариком, который кидался в разные места пластины пьезодатчика с помощью электромагнита.

Перемещение центра тяжести пьезоэлемента относительно его первоначального положения начинается со скорости $V_o = 0$ и заканчивается при скорости $V_\tau = a\tau$, где a – ускорение а τ – время движения центра тяжести, его можно характеризовать как время, за которое происходит изменение размеров пьезоэлемента. При подаче напряжения U_o на многослойный пьезоэлемент–резонатор его центр тяжести переместится на расстояние L, равное $L = \Delta H/2 = H \cdot d_{33} \cdot U/2h$, где H и ΔH – длина и удлинение пьезоэлемента–резонатора, d_{33} – пьезомодуль пьезокерамической пленки пьезоэлемента–резонатора ($400 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н). Импульс отдачи можно записать как $p = mV_\tau$, где m – масса пьезоэлемента–резонатора, $V_\tau = a\tau$ – скорость центра тяжести в конце движения, $a = 2L/\tau^2$ –

ускорение центра тяжести, $\tau = h/V$ – время перемещения центра тяжести пьезоэлемента–резонатора равное времени прохождения звуковой волны через пьезокерамичскую пленку пьезоэлемента–резонатора, V – скорость звука в пьезокерамической пленке (3000 м/с). В результате для импульса отдачи имеем:

$$p = U_o \frac{mHd_{33}V}{h^2} = U_o \cdot 0{,}9216\,кг \cdot м / с\,. \qquad (1)$$

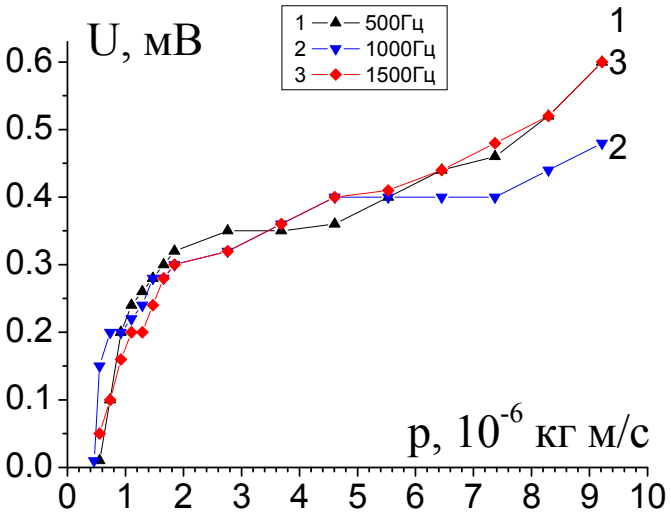


Рис. 3. Чувствительность пьезокомпозита ЦТС-36П к силе удара

На рис. 3 представлены графики зависимости выходного напряжения (для разных частот подаваемого синусоидального напряжения), фиксируемого с датчика удара цифровым осциллографом ADS1202, от импульса отдачи пьезоэлемента–резонатора, рассчитанного по формуле (1). При подаваемом напряжении менее 1 мВ (что соответствует импульсу ~ $0{,}92 \cdot 10^{-6}$ кг·м/с), фиксируемый сигнал сравним по величине с шумовой составляющей измерительной цепи. Поскольку величина шумовой полосы определяется минимальной чувствительностью цифровой платы (для ADS1202 она составляет $4 \cdot 10^{-5}$ В), то использование в регистрирующей аппаратуре микросхемы LMP2012WGL QMLV с шумовой составляющей $35 \cdot 10^{-9}$ В, позволит фиксировать частицы с импульсом до 10^{-10} кг·м/с.

Особенности испытания пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений

Е.А. Мокров, П.Г. Михайлов

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр Контрольные измерительные технологии» (ООО «НПЦ КИТ»), г. Пенза, Россия

Разработка и освоение новейших изделий и систем ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) зачастую инициирует модернизацию существующей метрологической базы на предприятиях – смежниках, которые оснащают изделия головных разработчиков и заводы – изготовители РК и АТ датчиками и измерительными системами [1 - 3].

При стендовых и летно-конструкторских испытаниях, а также при штатной эксплуатации изделий и систем РК и АТ возникает задача измерения быстропеременных и пульсаций давлений в жидких и газообразных средах.

Для измерения быстропеременных давлений и пульсаций давления в РК и АТ традиционно используются пьезоэлектрические датчики (ПЭД), в которых статическая составляющая давления «отфильтровывается» благодаря принципу действия самого датчика (стекание заряда). Это делает невозможной их градуировку, калибровку и поверку традиционным способом при помощи грузопоршневых колонок, предназначенных для калибровки и поверки датчиков статических давлений.

Для преодоления указанного противоречия при измерении метрологических характеристик ПЭД быстропеременного давления на практике используется методика воспроизведения переменного давления в квазистатическом режиме на низкой (40-50 Гц) частоте. При этом используется гидравлический пульсатор - рис. 1. Амплитуда воспроизводимого давления измеряется эталонным кварцевым пьезодатчиком (рис. 2).

Пульсатор закрепляется на столе вибростенда. На датчики воздействует одинаковое давление, состоящее из статического $P_{ст}$ и переменного, амплитуда, частота и форма которого определяется этими параметрами колебаний стола вибростенда.

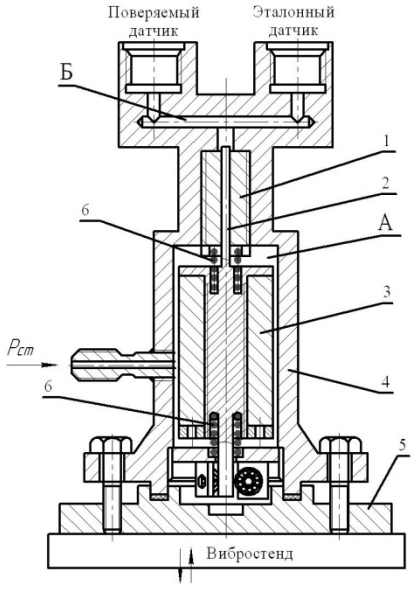


Рис. 1 – Пульсатор: 1 - цилиндр, 2 – поршень, 3 - инерционный груз, 4 – корпус, 5 – основание, 6 – пружины, А – полость, Б - каналы

В качестве эталонного датчика применяется кварцевый датчик (рис. 2) с высокой постоянной времени разряда (около 2 мин.), что позволило градуировать эталонный датчик в статическом режиме на грузопоршневом манометре.

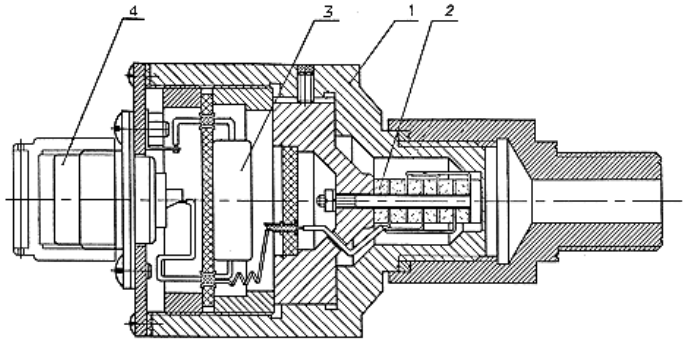


Рис. 2 – Эталонный кварцевый датчик: 1 – корпус, 2 - кварцевые диски, 3 - конденсатор, 4 - электрический разъем

Зарубежные датчиковые фирмы, выпускающие ПЭД («*Kistler*» и «*PCB*») применяют методику градуировки в режиме одиночных импульсов давления или нагружением ступенчатым давлением с использованием эталонного датчика [4].

Достоинством такого метода является простота и небольшие габариты генераторов импульсного давления по сравнению с методом испытания в квазистатическом режиме, но это требует применения дорогостоящих приборов.

На рис. 3 показана схема установки для градуировки пьезодатчиков давления фирмы «*PCB*» с использованием импульсного калибратора.

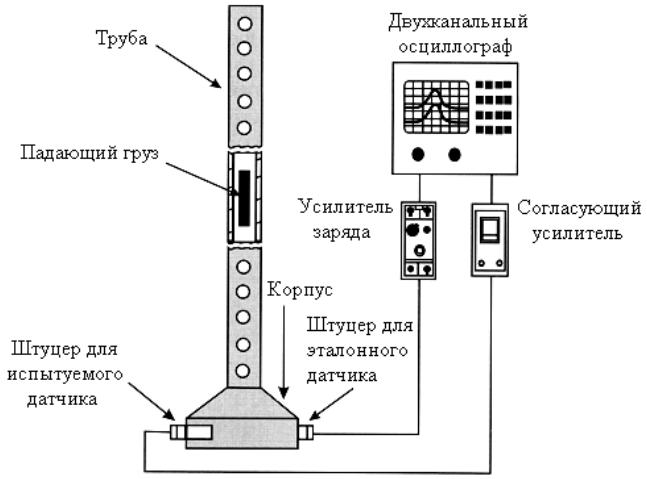


Рис. 3 – Схема системы калибровки пьезоэлектрических датчиков фирмы «*PCB*»

Аналогичная схема градуировки применяется и на фирме «*Kistler*», где кроме импульсного генератора давления используется и гидравлический пресс (рис. 4). Импульсный метод считается весьма перспективным.

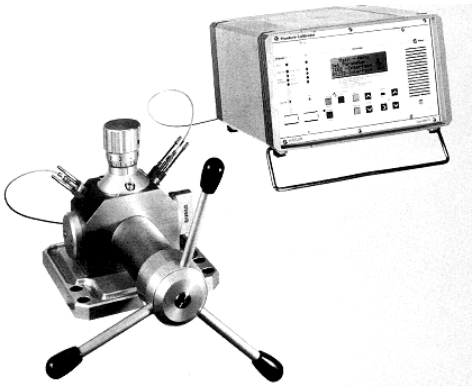


Рис. 4 - Система калибровки пьезодатчиков фирмы «*Kistler*»

Список литературы

1. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник под ред. Багдатьева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В. в 2–х томах / М.: ИПРЖР, 1998.

2. Михайлов П.Г. Пьезодатчики быстропеременных, импульсных и акустических давлений // Радиотехника–1995, № 10 С. 36-37.

3. Михайлов П.Г., Михайлова В.П., Лапшин И.О. Датчики для ракетно–космической и авиационной техники // Авиакосмическое приборостроение 2010 - № 3, с. 16–21.

4. Каталоги продукции фирм «Kistler» и «*PCB*».

Синтез метрологических моделей пьезоэлектрического датчика давления

Е.А. Мокров, П.Г. Михайлов

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр Контрольные измерительные технологии» (ООО «НПЦ КИТ»), г. Пенза, Россия

Математическое моделирование является в настоящее время обязательной процедурой в процессе разработки и модернизации измерительных приборов, в том числе и датчиков физических величин (ДФВ). Так как большинство ДФВ являют собой сложные гетерогенные структуры, состоящие из конструктивных узлов различной конфигурации и назначения, в которых объединены элементы, изготовленные из различных материалов, поэтому единую математическую модель датчика невозможно разработать, поэтому разрабатывают уровневые модели [1].

Разработку одной из таких математических моделей - метрологической модели (ММ), рассмотрим применительно к пьезоэлектрическим датчикам пульсаций давления (ДПД). Синтез такой ММ позволяет установить связи между погрешностями ДПД в целом и погрешностями его отдельных структурных элементов.

1. Синтез метрологической модели упругого элемента

Упругий элемент (УЭ) как измерительный преобразователь ДПД имеет структурную схему, представленную на рис. 1.

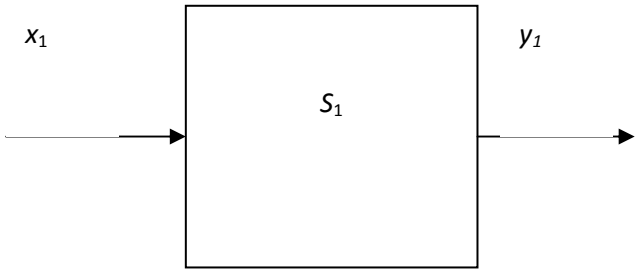


Рис. 1 – Структурная схема упругого элемента

Функция преобразования (ФП) УЭ в общем виде может быть представлена [2]:

$$y_1 = S_1 (x , x_1 , x_2 , \dots , x_n)\, x + b\, (x , x_1 , x_2 , \dots , x_n), \quad (1)$$

где $S_1 (x , x_1 , x_2 , \dots , x_n)$ – коэффициент преобразования УЭ, который в общем случае является функцией измеряемой величины x и совокупности влияющих величин $x_1 \dots x_n$; $b (x , x_1 , x_2 , \dots , x_n)$.

Уравнение (1) можно записать в виде:

$$y_1 = S_1 \cdot (1 + \delta_1) \cdot (x + \Delta_0). \quad (2)$$

где Δ_0 – абсолютная погрешность нуля; δ_1 – относительная погрешность чувствительности.

Считая влияющие величины независимыми, определяем абсолютную систематическую погрешность как полный дифференциал функции (2). Тогда:

$$\gamma_y = \sum_{i=1}^{n} S_{ki} \Delta x_i + (y_{np} / y) \sum_{i=1}^{n} S_{bi} \Delta x_i . \quad (3)$$

В частности, для мембранного УЭ статический коэффициент преобразования:

$$S_1 = \frac{B_M}{E \cdot \frac{s'^2}{4\pi^2 \cdot R^2}} = \frac{4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M}{E \cdot s'^2} . \quad (4)$$

Влияние температуры на УЭ может быть представлено, исходя из (3)

$$\gamma_{yt} = S_{kt} \Delta T + S_{bt} \Delta T \cdot y_{np} / y , \quad (5)$$

где S_{kt}, S_{bt} - соответственно относительные аддитивная и мультипликативная чувствительности мембраны к температуре; ΔT - изменение температуры.

С учетом (4) и (5) относительная мультипликативная чувствительность S_{kt} :

$$S_{kt} = \frac{1}{S_1} \frac{\partial \left(4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M / E \cdot s^2 \right)}{\partial t} = \frac{1}{S_1} \left(- \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{2}{s} \frac{\partial s}{\partial t} \right) \frac{4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M}{E \cdot s^2} , \quad (6)$$

где $\alpha_E = dE/dt$ и $\alpha_s = ds/dt$ - температурные коэффициенты соответственно модуля упругости и линейного расширения (справочные величины).

С учетом введенных обозначений величину S_{kt} можно выразить:

$$S_{kt} = -\frac{\alpha_E}{E} - 2\frac{\alpha_s}{s} \qquad \text{и } \delta_1 = -\alpha_E - 2\alpha_s \tag{7}$$

По справочным данным получаем: $\delta_1 = -0{,}004792\ \% / {}^0\text{C}$

2 Синтез модели функции преобразования пьезоэлектрического модуля

Конструктивная модель пьезомодуля представлена на рис. 2.

Используя уравнения электроупругости и краевые условия, модель коэффициента преобразования S_2 (чувствительности) пьезоэлемента можно представить:

$$S_2 = \frac{Q}{P} = d_{33} + 2|d_{31}|\frac{E_k\nu_n - E_n\nu_k}{E_k(1-\nu_n)\dfrac{h}{H} + \dfrac{C_{33}}{C_{31}}\nu_k E_n}, \tag{8}$$

где d_{33} , d_{31} – продольный и поперечный коэффициенты чувствительности; E_k,ν_k , E_n,ν_n – соответственно модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов пьезоэлемента и упругих прокладок.

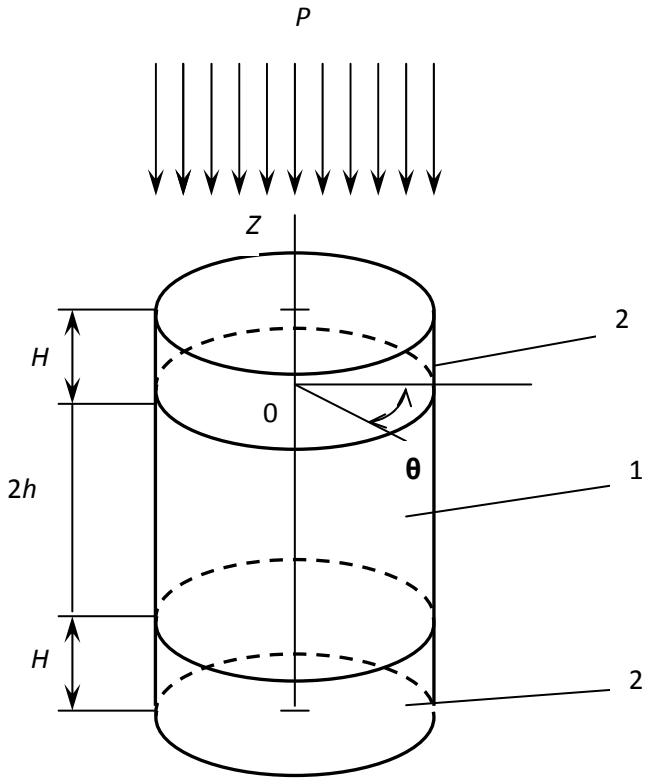


Рис. 2 – Пьезомодуль: 1 - пьезоэлемент, 2 –металлическая прокладка

Величина систематической погрешности пьезомодуля:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta d_{33}}{d_{33}} + \frac{\Delta E_k}{E_k} - 2\frac{\Delta E_n}{E_n} + 2\frac{\Delta \nu_n}{\nu_n} - 2\frac{\Delta \nu_k}{\nu_k} - \frac{\Delta C_{33}}{C_{33}} + \frac{\Delta C_{13}}{C_{13}}. \quad (9)$$

Ввиду малости или равенству нулю некоторых составляющих в (9):

$$\delta_2 = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta d_{33}}{d_{33}} + \frac{\Delta E_k}{E_k} - 2\frac{\Delta E_n}{E_n} = \alpha_d + \alpha_{E_k} - 2\alpha_{E_n}. \quad (10)$$

Согласно данным [3]: α_d = 0,0143 %/ ^{0}C, α_{Ek} = 7,9·10^{-4} %, α_{En} = 24·10^{-4} % / ^{0}C, подставляя их в (10), получаем δ_2 = 0,0143 + 0,00079 – 2·0,0024 = 0,01029 % / ^{0}C.

Общая относительная мультипликативная погрешность во всем температурном диапазоне (от - 196 ^{0}C до 500 ^{0}C) составит 3,82 %, что является вполне допустимым пьезоэлектрических ДПД.

Список литературы

1. Михайлов П.Г. Михайлов А.П. Синтез информационно-энергетических моделей датчиков // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. М, 2003 - № 3 С. 37-40.

2. Мокров Е.А., Тихонов А.И., Тихоненков В.А. Упругие элементы датчиков механических ведичин / Ульяновск: УлГТУ, 1998 – 120 с.

3. Каталог продукции НКТБ Пьезоприбор Ростов на Дону 2005.

Перспективы развития пьезоакселерометров
для ракетно-космической техники

А.Г. Дмитриенко, А.В. Блинов, Е.А. Макаров
Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт физических измерений, г. Пенза, Россия

Современные тенденции развития виброизмерений характеризуются переходом от традиционного точечного виброконтроля, оценивающего соответствие измеренных и установленных уровней вибрации в конкретной точке, к процессам:

- распределённого мониторинга по конструкции объекта контроля;
- пассивного мониторинга с применением методов спектрального анализа;
- исследования закономерностей хаотических изменений, выявленных при проведении мониторинга на определённом множестве датчиков;
- построения моделей диагностики уникальных технических узлов изделий ракетно-космической техники в заданных сечениях (фазовых портретов);
- эспериментальной отработки моделей на базовых несущих конструкциях сложных технических узлов.

Реализация указанных тенденций невозможна без создания унифицированных рядов миниатюрных широкополосных и надёжных виброакселерометров, экспериментально отработанных на типовых базовых несущих конструкциях.

Решению задачи в наибольшей мере соответствуют:

- использование миниатюрных акселерометров серий Delta Shear «Bruiel&Kjaer» и серий 352B, 352A «PCB Piezotronics» с использованием эффекта сдвига и так называемых ICP-технологий, предусматривающих интеграцию в общем корпусе миниатюрного пьезоэлектрического элемента и схемы обработки сигналов для обеспечения независимости результатов измерений от длины кабельной линии;
- определение номенклатуры и конфигурации типовых базовых несущих конст-рукций уникальных технических узлов изделий ракетно-космической техники с последующим их изготовлением и использованием

в целях отработки достовер-ности характеристик виброакселерометров и диагностики базовых несущих конструкций.

Представлены результаты разработки в ОАО «НИИФИ» унифицированного ряда миниатюрных пьезоэлектрических ICP-акселерометров, линейка диапазонов измерений которых уже в настоящее время насчитывает более десятка исполнений, с границами от 100 до 5000 g и верхней границей частотного диапазона до (20000 – 30000) Гц. За исключением СБИС разработки ОАО «РКС» и покупных пьезоэлементов при изготовлении акселерометров используются детали и узлы собственной разработки, включая герметичный разъём.

Метрологическое оборудование Государственного центра испытаний средств измерений в целях утверждения типа ОАО «НИИФИ» (серия вибростендов фирм Bruel&Kjaer, Tira, PCB 396 C1, ударная установка P350 0S, термовиброкамера DP_V100/DSSA1-1K) обеспечивает определение коэффициента преобразования, нелинейности функции преобразования, пределов измерений, границ частотного диапазона, температурных характеристик миниатюрных широкополосных вибродатчиков по методикам соответствующим требованиям ГОСТ Р ИСО 16063-1-2009, 16063-13-2012, 16-63-21-2009. Приводятся результаты испытаний акселерометров. Планируемое приобретение баллистической установки утверждённого типа с максимальной амплитудой удара до 10000 g полностью решит проблемы метрологического обеспечения разработки и производства миниатюрных широкополосных вибродатчиков, включая выполнение процедур утверждения типа.

В рамках ОКР «Сэндвич-Т» сформирована широкая номенклатура базовых несущих конструкций уникальных технических узлов ракетно-космической техники.

Имеющийся комплекс метрологического оборудования и высокая степень осна-щённости производства ОАО «НИИФИ» уже в настоящее время обеспечивают возможность отработки методик испытаний вибродатчиков в условиях, близких к натурным, и решение перспективных проблем развития виброизмерений.

В докладе представлены также условия применения и размещения множества вибродатчиков на поверхностях базовых несущих конструкциях и алгоритмы получения моделей диагностики их состояний.

Предварительная обработка сигналов пьезокварцевых датчиков

В.Ю. Трофимов, Л.Е. Шахмейстер

ФГУП "НИИ "Поиск", г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время выпускается широкая номенклатура пьезокварцевых датчиков различных физических величин (давление, сила, температура и др.) [1].

Выходным сигналом этих датчиков, определяющим значение измеряемой физической величины, является частота. Предварительная обработка сигналов датчика включает в себя учет начальной частоты датчика, соответствующей нулевому значению измеряемой физической величины, и регулировку коэффициента преобразования датчика.

Цифровую обработку выходного сигнала можно осуществлять, преобразовав частоту в цифровой код. Недостатком этого является повышение погрешности измерения при больших скоростях изменения измеряемой физической величины и повышение требований к скорости дальнейшей обработки информации. В наибольшей степени это проявляется при необходимости определения интеграла измеряемой физической величины, в частности в пьезокварцевых акселерометрах.

Другим методом обработки сигналов датчика является отказ от преобразования частоты в цифровой код и осуществление обработки сигналов цифро-частотными методами [2].

В качестве примера, на рис.1 приведена схема предварительной обработки дифференциального пьезокварцевого частотного датчика. Схема позволяет выделить разностную частоту f_1 - f_2 каналов датчика, учесть начальное значение f_H этой разностной частоты и откорректировать коэффициент преобразования. В состав схемы входят блоки F1, F2 защиты от расщепления выходных импульсов датчика, устройство запоминания частоты ЗУF D11, двоичный умножитель D8, схемы вычитания частот D1-D3, D5, D6 и D9. Запоминание начальной разностной частоты осуществляется с использованием элементов D3, D7, D10, D11. Управление запоминанием осуществляется сигналом, подаваемым на шину "А".

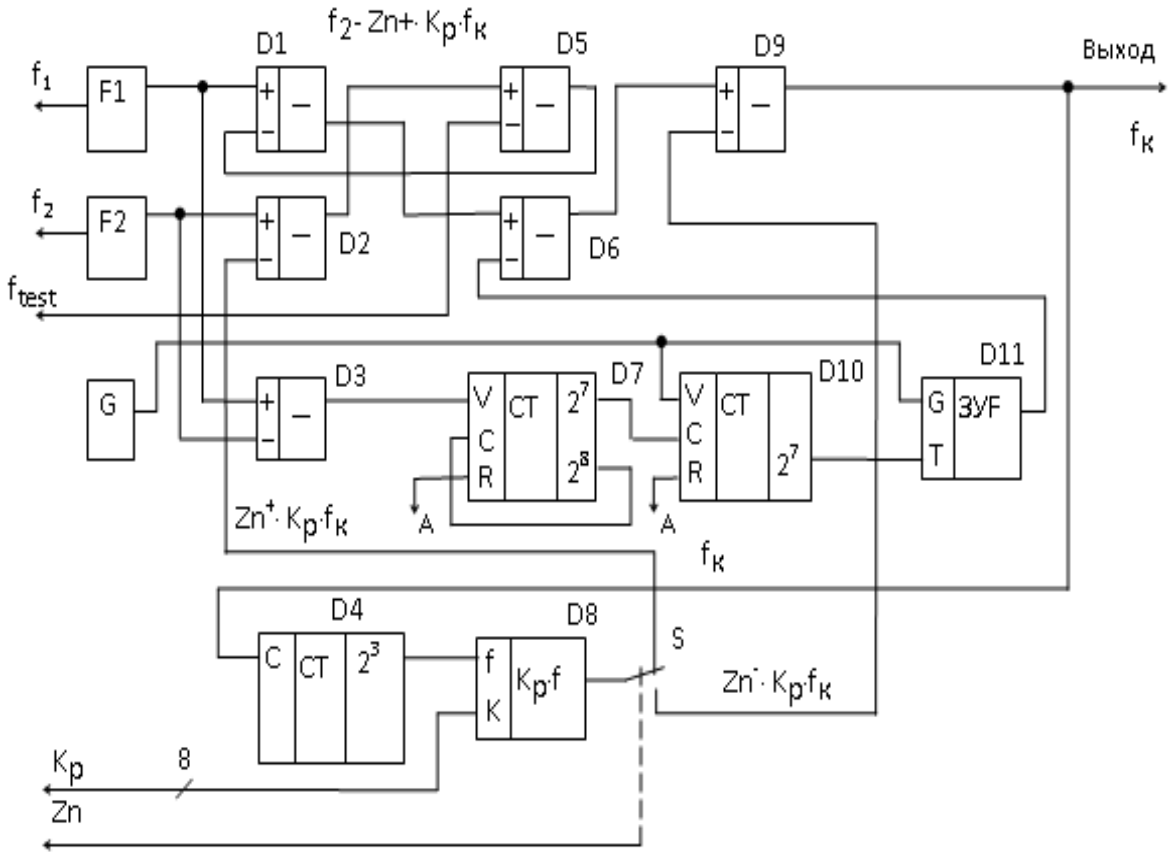


Рис. 1. Схема предварительной обработки

Сигналом логического "0" на шине "А" снимается "сброс" со счетчиков импульсов D7 и D10. При этом на выходе 2^7 счетчика D7 формируется импульс длительностью, равной 128 импульсам начальной разностной частоты датчика. В течение этого времени, соответствующего длительности указанного импульса, поступающего на вход "С" счетчика D10, импульсы задающего генератора G принимаются счетчиком D10, осуществляющим деление частоты генератора на 2^7. С выхода D10 импульсы поступают на вход Т элемента D11 устройства запоминания частоты в течение времени, равного усредненному значению периода начальной разностной частоты датчика. Усреднение осуществляется по 128 периодам начальной разностной частоты. Устройство запоминания частоты ЗУF осуществляет деление частоты задающего генератора на число импульсов, поступивших его вход Т. Таким образом, на выходе ЗУF D11 формируются импульсы, частота $f_{нв}$ следования которых равна среднему

значению начальной разностной частоты сигналов датчика.

Учет коэффициента регулирования $К_р$, определяющего поправку коэффициента преобразования датчика, осуществляется счетчиком импульсов D4 и двоичным умножителем D8.

Проверка правильности работы блока предварительной обработки осуществляется подачей на него тестовой частоты f_{test}, имитирующей изменение разностной частоты датчика на соответствующее значение.

Знак $К_р$ определяется сигналом, подаваемым на вход Zn схемы.

Алгоритм предварительной обработки сигналов датчика:

$$f_к = \frac{f_1 - f_2 - f_{нв} + f_{test}}{1 - Zn^+ \cdot K_p + Zn^- \cdot K_p}.$$

При необходимости, интегрирование выходной частоты датчика осуществляется суммированием выходных импульсов с помощью счетчика импульсов.

Таким образом, схема рис.1:

выделяет разностную частоту дифференциального датчика,

осуществляет измерение, запоминание и воспроизведение начальной разностной частоты,

корректирует значение коэффициента преобразования,

обеспечивает имитацию воздействия измеряемой датчиком физической величины при проведении тестового контроля в процессе подготовки измерений и при производстве.

Реализация операций вычитания, умножения, запоминания, интегрирования и др. цифро-частотными методами рассмотрена в работе [2].

Список литературы

1. Каталог продукции ООО "СКТБ ЭлПА", www.sktbelpa.ru

2. Шахмейстер Л.Е. Цифро-частотные и время-импульсные преобразователи информации. М: Издательство КДУ, 2008 г.

Нормирование вибрации

О.Б.Скворцов

ООО «Диамех 2000», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Российской академии наук

г. Москва, Россия

При измерении вибрации для обоснованного выбора датчиков и методов измерения необходимо определить:цель измерений (диагностика, защита от возможных повреждений из-за вредного воздействия вибрации и т.п.), принципы выбора критериев допустимого уровня вибрации,характер вибрационных сигналов, какие их параметры необходимо контролировать, а также какие датчики, средства обработки и методы оценки следует использовать.

Вопрос использования вибрационных измерений для диагностики состояния является самостоятельной задачей и регламентируется соответствующей группой международных, российских и отраслевых стандартов[1]. В этом случае необходимо реагировать на ранние стадии появления дефектов, когда уровни вибрации малы и не могут реально повредить оборудование, выбор норм определяется критерием достоверного обнаружения дефекта.

При решении задачи защиты оборудования от повреждений вследствие воздействия сильной вибрации необходимо на ограниченном временном интервале получить оценку вибрации и сравнить ее с пороговым значением. Данная задача связана с задачей испытаний на вибрационную прочность[2].В [3] отмечено большое количество противоречий при оценке вибрации длянормировании допустимого уровня и при испытаниях на воздействие вибрации. Основные противоречия сводятся к следующим:

- Защита по вибрации основана на контроле текущего уровня средних значений скорости или перемещения, а при вибрационных испытаниях существенную роль имеют оценки вибрационного ускорения в широкой полосе частот.

- При вибрационных испытаниях важное значение имеет время воздействия вибрации т.е. нормируется интегральное значение, п не мгновенная значение как при контроле допустимого уровня.

Развитие в последние годы исследований в области гигацикловой усталости и вибрационной прочности [4], а также учет того, что именно ускорение в широкой полосе частот адекватно оценкам сил и напряжений, а следовательно и более корректно характеризует процессы циклической прочности может потребовать как существенных изменений в подходах к оценки вибрации и ее пороговых значений, а также соответствующих изменений в используемых аппаратных средствах.

При нормировании допустимого уровня вибрации в стандартах и рекомендациях ряда организаций и фирм предлагается два принципиально разных подхода. Более ранний основан на сравнении уровня вибрации с набором пороговых значений, причем количество порогов (зон) вибрации может доходить до восьми и более. Часто пороги выбираются при этом как кратные доли от некоторого максимального значения. Объективность такого разбиения обычно ничем не подтверждена. В последнее время большее распространение в международных стандартах получает задание всего двух порогов. Верхний основан на оценке уровня, который может свидетельствовать о приближении к пределу физической прочности, а более низкий свидетельствует о наличие вибрационных проблем и его достижение показывает, что необходимо переходить методам вибрационной диагностики для поиска зарождающихся дефектов.

Хотя пиковые оценки важны с точки зрения контроля причин зарождения дефектов и их развития, оценки в виде средних более устойчивы и получают все более широкое распространение[5]. При контроле вибрации оценку дисперсии или среднего квадратичного отклоненияσ можно использовать для оценки предела по которому срабатывает сигнализация или защита. В качестве такой оценки используют $Vrms+K\cdot\sigma$, где К=4 или больше.Использование оценок пикового значения (размаха) затруднительно, поскольку процедура формирования статистических устойчивых средних для них затруднена, а

предлагаемы практические процедуры [6] могут давать неоднозначные результаты из-за некорректного усреднения пиковых значений.

Выводы:

1. При оценке допустимой вибрации оборудования со сложным вибрационным спектром следует контролировать ускорение, как существенный параметр с точки зрения вибрационной порочности.
2. Для оценки вибрационной прочности важна интегральнаяво времени оценка вибрации не используемая в действующих стандартах.
3. В отличие от рекомендации [5] использовать оценку пикового значения только для одночастотного вибросигнала, именно для полигармонического сигнала оценка пикового значения может быть существенной, поскольку даже сравнительно редкие, но большие по амплитуде всплески вибрации могут способствовать скачкообразному росту трещин, развитие которых является основой вибрационных повреждений.

Список литературы

1.ГОСТР ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностики машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации, 2010, 29 с.

2. А.Ленк, Ю.Ренитц. Механические испытания приборов и аппаратов. - Мир, М.: 1976 г., 272 с.

3. Skvorcov O. Estimation of vibrating durability of elements of hydro power turbines under operating conditions by results of vibration control by stationary systems of vibrating monitoring.Международная конференция "Новые тенденции в усталости и разрушений" (NT2F13), Москва, ИМАШ РАН, 2013, p.205-222

4. ClaudeBathias, PaulCroceParis. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice.September 13, 2004 by CRC Press - 328 p.

5. International standard ISO 2954:2012. Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery – Requirements for instruments for measuring vibration severity, ISO, 2012-04-01, 14 p.

6. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. Мир, М.: 1965 г., 446 с.

Боковое поле дуговой антенной решетки

В.Б.Жуков, В.Д.Зубов

ОАО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, Россия

Исследуется характер изменения бокового поля приемной дуговой антенной решетки в зависимости от угла падения сигнала и величины рабочего сектора при различных межэлементных расстояниях.

Известно [1], что боковое поле звукопрозрачной дуговой антенной решетки, расположенной в плоскости горизонта, возрастает , начиная с некоторого значения азимутального угла, и тем значительнее, чем больше межэлементное расстояние. При малых межэлементных расстояниях $\leq 0,25\lambda$ характеристика направленности практически не отличается от характеристики направленности непрерывной дуги. С ростом же межэлементного расстояния, оставаясь практически неизменной в области основного и первых добавочных максимумов, характеристика направленности искажается, начиная с некоторого угла. На месте сравнительно плавно меняющегося ореола, характерного для непрерывной дуги, появляются интерференционные максимумы, размах амплитуды которых увеличивается с ростом межэлементного расстояния. В частности, для рабочего сектора 120° при малых межэлементных расстояниях этот угол составляет ~половину рабочего сектора,т.е ~ 60° .

Расчеты показывают, что при малых межэлементных расстояниях эта тенденция увеличения бокового поля, начиная с углов, составляющих ~ половину рабочего сектора, сохраняется при других величинах рабочих секторов. По мере увеличения межэлементных расстояний этот угол уменьшается, приближаясь к главному максимуму.

Исследуем особенности этого явления в измененной постановке задачи, а именно, для случая расположения элементов на дуге, свойства которой приближены к реальному конструктивному исполнению, когда элементы могут затеняться в области геометрической тени. Расчет

направленных свойств будем по-прежнему вести по формулам [1], но с учетом этого затенения.

Будем рассматривать приемную антенную решетку, элементы которой общим числом $2N$ расположены эквидистантно на дуге сектора с радиусом R и углом раствора α.

Обозначим угол прихода фронта волны через β (рис. 1). Этот угол находится между фронтом падающей плоской волны и нормалью к оси симметрии рабочего сектора α. Будем полагать, что угол β меняется в пределах ±90°. Вследствие влияния дуги при углах прихода $\beta > \left(90^\circ - 0,5\alpha\right)$ часть элементов, расположенных в дальней от фронта волны части рабочего сектора, оказывается в зоне геометрической тени. На рис. 1 эта затененная часть элементов располагается справа от оси симметрии рабочего сектора. При расчете характеристики направленности сигналы от приемников, расположенных в области акустической тени, должны быть приравнены нулю.

Характеристика направленности антенны в плоскости расположения дуги определяется по формуле [1]

$$F(\theta,\varphi) = \frac{\sum_{n=-N}^{N} a_n \exp(-jkRG)}{\sum_{n=-N}^{N} a_n}, \qquad (1)$$

где введены обозначения:

a_n – коэффициенты амплитудного-фозового распределения возбуждения,

k – волновое число,

R – радиус дуги ,

$G = \cos(n\cdot\Delta\psi)(\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0) + \sin(n\cdot\Delta\psi)(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0)$,

$\Delta\psi$ – угловой шаг между соседними элементами,

θ_0, φ_0 – углы, определяющие направление компенсации.

Полагая компенсацию в направлении нулевого курсового угла в плоскости горизонта $\sin\theta_0 = 1$, $\sin\varphi_0 = 0$, $\cos\varphi_0 = 1$, получим следующее выражение для расчета направленных свойств в горизонтальной плоскости

$$G = \cos(n \cdot \delta)(\cos\varphi - 1) + \sin(n \cdot \delta)\sin\varphi,$$

где ввели обозначение $\delta = \Delta\psi$.

С учетом равенств

$$\cos(n\delta)\cos\varphi = 0,5\left[\cos(n\delta - \varphi) + \cos(n\delta + \varphi)\right],$$
$$\sin(n\delta)\sin\varphi = 0,5\left[\cos(n\delta - \varphi) - \cos(n\delta + \varphi)\right],$$

это выражение принимает вид

$$G = \cos(\varphi - n\,\delta) - \cos(n\,\delta).$$

(2)

Для равномерного распределения возбуждения решетки с четным числом элементов характеристика направленности в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$F(\varphi) = \frac{\sum_{n=-N}^{N} \exp(-jkRG)}{2N} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \exp(-jkRG) + \sum_{n=1}^{N} \exp(-jkRG_1)}{2N}, \qquad (3)$$

где

$$G_1 = \cos(\varphi + n\ \delta) - \cos(n\ \delta), \qquad (4)$$

Расчет характеристики направленности по формуле (3) дает точное значение при приходе плоской волны с направления $\varphi = 0$, а при устремлении $(\varphi \pm n\ \delta)$ к $\pm\alpha/2$ дает погрешность, т. к. в вычислениях при этом присутствуют затененные элементы. В целях исключения затененных элементов целесообразно преобразовать формулу (3) к виду, в котором учитываются количества элементов слева (N_1) и справа (N_2) от точки прихода на дугу плоского фронта волны

$$F(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \exp(-jkRG) + \sum_{i=1}^{N_2} \exp(-jkRG_1)}{2N}. \qquad (5)$$

Значение $N_1 = \mathrm{E}(\beta - 0{,}5\alpha)/\delta$, где $\mathrm{E}(x)$ обозначает целую часть вещественного числа x, учитывает число элементов, расположенных слева от элемента, ближайшего к точке прихода фронта волны (точка А на рис. 1). Соответственно число элементов, расположенных справа от этой точки, равно

$N_2 = 2N - N_1$.

(6)

Затененные элементы отсутствуют, когда рабочий сектор удовлетворяет условию $\alpha \le 90^\circ$. При α > 90° некоторое количество элементов, равное N_T, находится в акустической тени, так что вычисление N_2 следует производить по формуле

$N_2 = 2N - N_1 - N_T,$

где $N_T = \mathrm{E}\left(\dfrac{\alpha - 90^\circ}{2\delta}\right)$.

(7)

В качестве примера на рис.2 показаны характеристики направленности, рассчитанные по формулам (3) (красный цвет) и (5) + (7) (черный цвет) для антенной решетки с числом элементов $2N = 128$ и рабочем секторе $\alpha = 150^\circ$. Характеристика направленности красного цвета относится к звукопрозрачной модели, а черный цвет—к антенной решетке той же геометрии, но с элементами, расположенными на незвукопрозрачной дуге, дающей частичное их затенение. Расчет направленных свойств этой антенной решетки по формуле (5) с учетом затененных элементов (7) показывает отсутствие в характеристике направленности возрастания уровня бокового поля, свойственного звукопрозрачной модели.

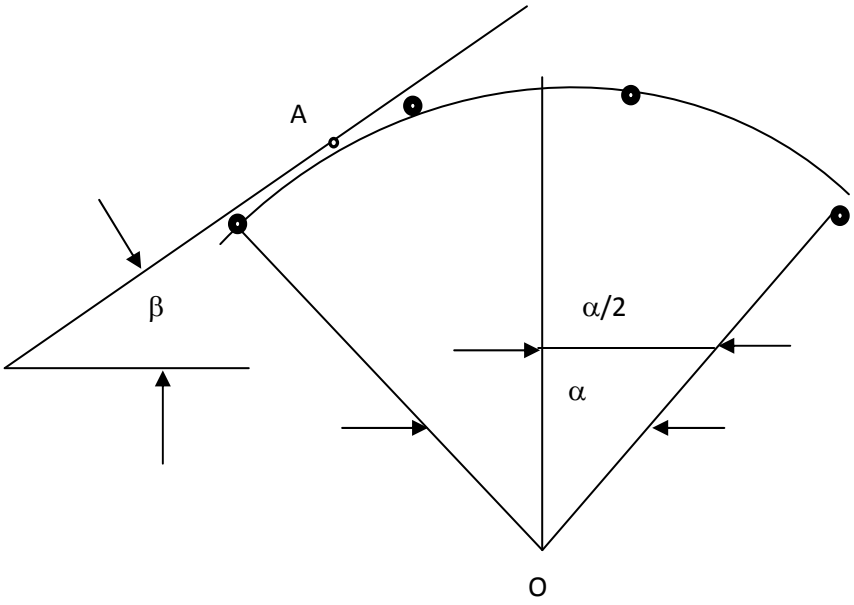


Рис. 1 Рабочий сектор углов

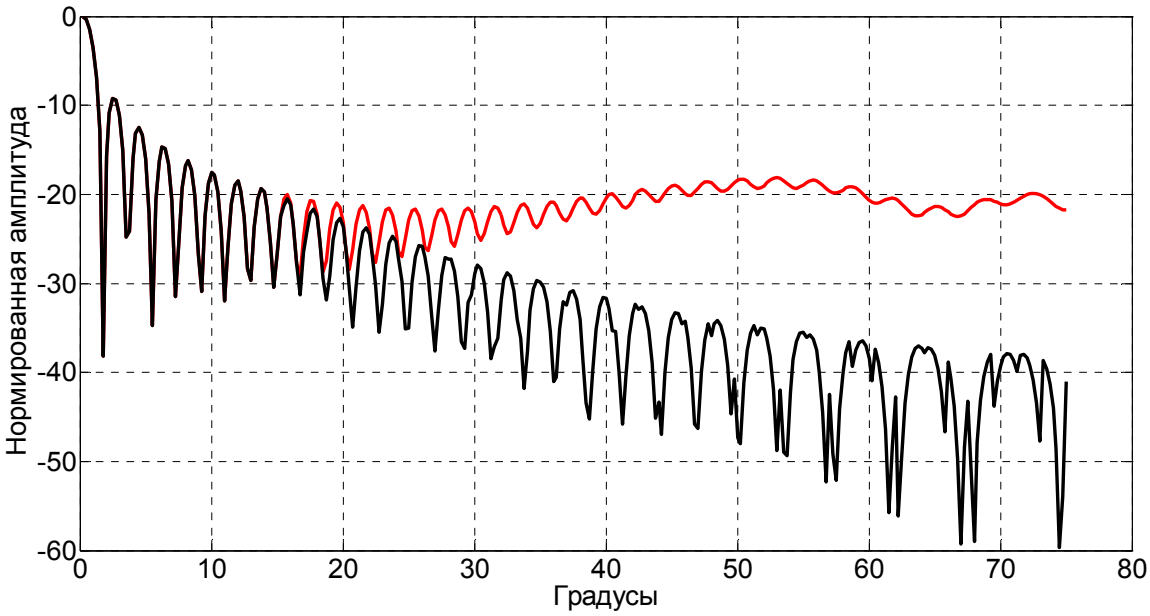


Рис. 2 Сравнение ХН, рассчитанных с учетом затенения преобразователей (черная линия) и без учета (красная линия)

Список литературы

1.Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

Применение пьезокерамики в исследовании космической пыли

Г.Г. Дольников, А.В. Захаров, В.Н. Барке, И.А. Кузнецов, А.Н. Ляш, И.А. Шашакова, А.В. Яковлев

Институт космических исследований РАН, г.Москва, Россия

Одной из важнейших задач в программе исследований Солнечной системы является изучение пылевых частиц и космической пылевой плазмы.

Частицы пыли в космосе встречаются повсеместно – во внешних слоях атмосферы Земли, приповерхностной Лунной и Марсианской экзосфере, межпланетном пространстве. Динамика пылевых частиц у поверхности Луны и Марса оказывает существенное влияние на параметры экзосферы (для Луны), во многом влияет на климат Марса. Исследования динамики пыли на Луне и Марсе чрезвычайно важны не только для создания моделей экзосферы Луны и Марса, но и для оценки влияния пылевых частиц на приборы и оборудование посадочных аппаратов. Лунная пыль обладает чрезвычайно высокой адгезией, устранение ее с рабочих поверхностей приборов и механизмов нетривиально. Помимо негативного влияния на показатели приборов, пыль также представляет существенную опасность для пилотируемых миссий.

Космическая программа, принятая РОСКОСМОСОМ включает проекты исследований Луны и Марса с использованием посадочных аппаратов на эти тела. В состав научной аппаратуры этих аппаратов включены приборы для исследований физических характеристики пылевых частиц близ поверхности Луны и Марса.

Так, одним из ближайших планируемых лунных экспериментов является пылеударный анализатор ПмЛ, призванный решать следующие задачи:

- Исследование пылевой компоненты и ее динамики в приповерхностной экзосфере Луны.

• Регистрация микрометеоритов и вторичных частиц лунного реголита, выбиваемых микрометеоритами, измерение их физических характеристик (масса, скорость).

• Изучение электрического поля, который воздействует на динамику заряженных пылевых частиц вблизи поверхности Луны.

В состав прибора входят:

• Ударный Сенсор (УС), позволяющий измерять импульс пылевых частиц, скорость их перемещения и их электрический заряд.

• Электростатический Датчик (ЭД), позволяющие измерять разность потенциалов электростатического поля вблизи поверхности Луны.

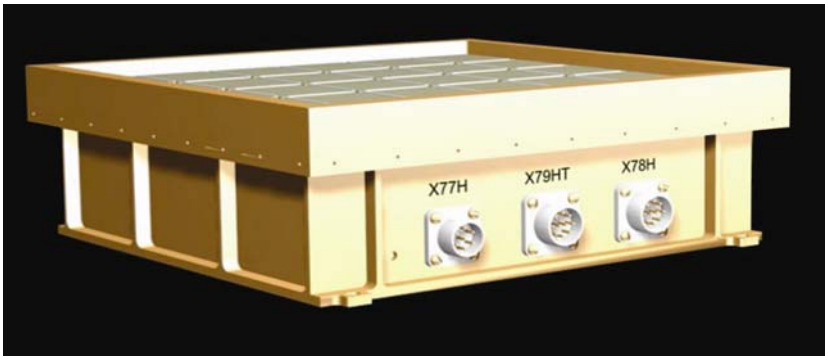


Рис. 1 – Пылеударный анализатор ПмЛ

В качестве чувствительных элементов УС используются пористые пьезокерамические датчики ЦТС-36П. Рабочая поверхность УС включает в себя 30 датчиков размером 25 х 30 мм. Сигнал с датчиков усиливается и преобразовывается в цифровой вид, после чего анализируется аппаратными средствами прибора.

Сигнал отражает импульс попавшей в пластину частицы пыли. Чувствительность прибора лежит в пределах от 10-12 до 10-5 Н·с.

В данной презентации рассказывается о составе, принципах работы и калибровке пылеударного анализатора ПмЛ проекта «Луна-Глоб», а так же о задачах, которые он призван решать и нюансах работы с пьезокерамическими элементами.

Также рассказывается о планируемом пылевом комплексе проекта ExoMars-2018.

Разработка сенсоров динамических деформаций на основе сегнетоэлектрических пленок цирконат-титаната свинца

Д.А. Коваленко, В.В. Петров

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

В современное время с увеличением сбора, обработки и хранения тех или иных данных, возникает необходимость проводить измерения сразу по нескольким физическим величинам. В связи с этим очень большую популярность в последнее время получают гибридные сенсорные системы, то есть системы способные одновременно измерять несколько различных физических величин.

В данной работе рассматривается применение сегнетоэлектрических пленок в качестве сенсоров для гибридных сенсорных систем. Благодаря свойствам сегнетоэлектрических пленок область их применения очень широка. В зависимости от конструкции сенсорного элемента на основе сегнетоэлектрических пленок можно создать различные типы датчиков [1].

Создав сенсорный элемент мембранного типа на основе сегнетоэлектрических пленок можно получить датчик акустических волн, а так же датчик давления высокой чувствительности. Исследования группы ученных из Университета Флориды показали, что диапазон чувствительности такого сенсора шире, чем у существующих пьезорезистеров, а уровень помех ниже [2]. Сенсоры структуры «консольной балки» могут быть использованы в качестве акселерометров. Создав особую структуру из 4 перемычек с присоединенной посередине массой можно получить трехосевой высокочувствительный акселерометр [3]. Так же сам сегнетоэлектрический материал способен реагировать на изменения электромагнитных и электростатических полей.

Таким образом, из выше приведенных примеров можно сделать вывод о том, что на основе одинаковых сегнетоэлектрических пленок, варьируя лишь структурой сенсора, возможно создание гибридной системы сенсоров.

Основным признаком сегнетоэлектрических материалов является наличие спонтанной поляризации, которая происходит в результате смещения иона Ti^{4+} (или замещающего его) в объеме элементарной ячейки из центрального положения и деформации ячейки. При получении твердых растворов на основе таких кристаллов можно получать материал с широким диапазоном свойств. Например при изменении соотношения компонентов твердого раствора $BaTiO_3$ и $SrTiO_3$ диэлектрическая проницаемость изменяется от 2000 до 12000, а точка Кюри от 120^{o}C ($BaTiO_3$) до 250^{o}C (Sr TiO_3) [4]. Из этих соображений в качестве материала для исследования нами был выбран цирконат-титанат свинца (ЦТС).

В лаборатории научно-образовательного центра «Микросистемной техники и мультисенсорных мониторинговых систем» (НОЦ «МСТ и МСМС») на установке высокочастотного реактивного распыления «Плазма – 80СЭ» были получены образцы сегнетоэлектрических пленок. В результате плазменного распыления на подложку высаживается пленка ЦТС в атмосфере кислорода. В качестве подложки мы использовали окисленный кремний.

Рентгенофазовый анализ (РФА) показал прямую зависимость количественного содержания кристаллического ЦТС в структуре пленки от парциального давления кислорода в камере (рисунок 1). По средствам интерференционного микроскопа МИИ-4 были исследованы толщины пленок. Рост толщины пленки прямо пропорционален времени напыления и составляет 600 ± 60 нм/ч, таким образом, диапазон толщин полученных пленок составил 300 – 1000 нм.

Значения емкостей полученных образцов лежит в диапазоне от 200 – 1100 пФ. Наибольшие значения емкостей наблюдались у образцов 8 и 9, что соответствует данным полученным при помощи структурных исследований образцов.

По схеме Сойэра-Тауэра был собран стенд для измерения петель диэлектрического гистерезиса. Сенсорный элемент представлял собой консольную балку. Результаты исследования показали, что диапазон поляризаций образцов лежит в пределах 0,06 – 2,2 мкКл/см^2. Затем после

исследования петель диэлектрического гистерезиса мы создавали внутри пленки полевым и температурным воздействием постоянное поляризованное состояние и исследовали полученные поляризованные образцы на динамические деформации.

После обработки полученных данных, мы расчетным путем находили пьезомодули образцов, величины которых прямо пропорциональны величинам емкостей. Значения рассчитанных пьезомодулей лежали в диапазоне $0{,}04*10^{-12} – 13{,}3*10^{-12}$ Кл/Н. Образцы под номерами 1 – 3 не удалось заполяризовать, мы считаем, это связано с малым количество кристаллического ЦТС в структурах данных образцов.

Таким образом, по результатам исследований можно утверждать, что наилучшими сегенетоэлектрическими свойствами обладали образцы под номерами 8 и 9. Данные образцы можно использовать как сенсорные элементы в гибридных сенсорных системах.

Библиографический список.

1. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 224 с.

2. Kunz K., Enoksson P., Stemme G. Highly sensitive triaxial silicon accelerometer with integrated PZT thin film detectors // Sensors and Actuators 2001. - A 2969. – p. 132-138.

3. Horowitz S. B., Nishida T., Cattafesta L. N. and Sheplak M. Design and Characterization of a Micromachined Piezoelectric Microphone // 26th AIAA Aeroacoustics Conference 2005.

4. Лайнс М., Гласе А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1998. - 736 с.

Частотный диапазон датчиков физических величин
с цепью компенсации паразитных емкостей сенсора

Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

В MEMS-системах, в устройствах автоматики и управления широко используются различные датчики физических величин (ДФВ) с высоким внутренним сопротивлением (R_i) и паразитной емкостью (C_0) сенсора, которые существенно уменьшают быстродействие и частотный диапазон ДФВ и соответствующих систем управления. Поэтому повышение быстродействия датчиков является эффективным средством улучшения качества процессов управления [1, 2]. С этой целью применяют либо специальные методы обработки измерительной информации [2], либо специальные корректирующие устройства [3, 4].

Определим требования к цепи частотной коррекции (ЦК), подключаемой к обобщенной схеме датчика (рис.1) с целью расширения его частотного диапазона при потенциальном выходе.

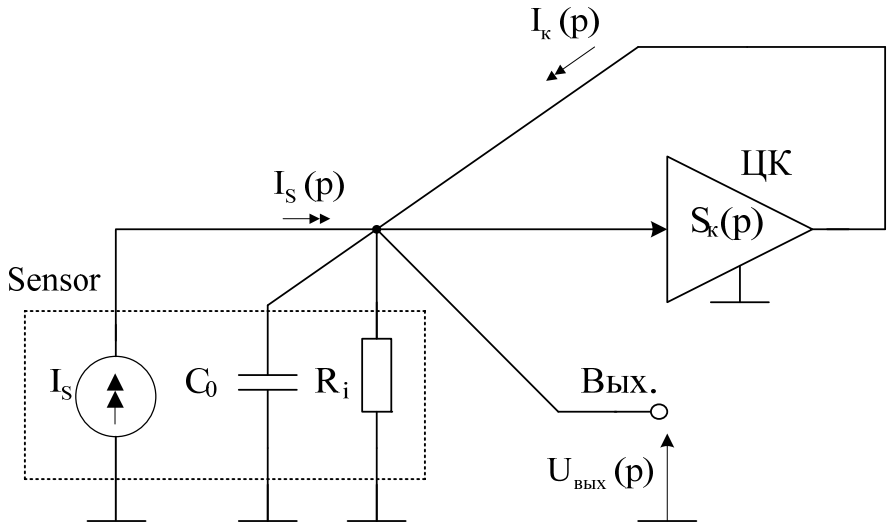


Рис. 1 Частотная коррекция датчика физических величин
с потенциальным выходом

Будем считать, что емкостная и активная составляющие входного и выходного импедансов ЦК учитываются в эквивалентной емкости C_0 и сопротивлении R_i.

Передаточная функция датчика

$$W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{I_S(p)} = \frac{R_i}{1 + p\tau_0 - S_к(p)R_i}. \quad (1)$$

где $\tau_0 = C_0 R_i$ - постоянная времени сенсора, $S_к(p) = I_к(p)/U_{вых}(p)$– передаточная функция корректирующей цепи.

Потребуем, чтобы скорректированный датчик имел передаточную функцию первого порядка $W^*(p)$ с достаточно малой постоянной времени $\tau_в^*$ и, следовательно, был устойчивым:

$$W^*(p) = \frac{R_i}{1 + p\tau_в^*}, \quad (2)$$

где $\tau_в^* << \tau_0$.

При этом верхняя граничная частота скорректированного датчика $f_в^*$ может возрасти в сравнении с верхней граничной частотой датчика до коррекции $f_в$:

$$f_в^* = \frac{1}{2\pi\tau_в^*} >> \frac{1}{2\pi\tau_0}, \quad (3)$$

или

$$f_в^* = \frac{1}{2\pi(\tau_0 - S_к R_i)} = N_f f_в \quad (4)$$

где $f_в = \frac{1}{2\pi\tau_0}$; $N_f = \frac{1}{1 - S_к R_i/\tau_0}$.

Данное условие повышения $f_в^*$ будет выполнено при

$$\tau_0 - \frac{S_к(p)}{p} R_i = \frac{1}{2\pi f_в^*}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) можно найти основные параметры цепи коррекции, обеспечивающей высокое значение $f_в^* >> f_в$ датчика:

$$\begin{cases} S_к(p) = pS_к \\ S_к = C_0(1 - f_в / f_в^*) \end{cases}. \quad (6)$$

Таким образом, цепь коррекции должна быть дифференцирующим звеном и (в идеальном случае при $f_в^* >> f_в$) иметь следующие параметры:

$$\begin{cases} S_к \approx C_0 \\ S_к < C_0 \\ S_к(p) = pS_к \end{cases}. \quad (7)$$

Данным условиям удовлетворяют несколько практических схем ЦК, реализуемых на SiGe транзисторах технологического процесса SGB25VD.

Уравнения (5), (6) и (7) являются основой для схемотехнического синтеза элементов цепи коррекции при заданных значениях $f_в^*$, $f_в$, R_i, C_0 датчика.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет существенно повысить быстродействие датчиков физических величин, имеющих повышенные значения паразитной емкости C_0 и высокое выходное сопротивление R_i сенсора. Он может найти широкое применение в устройствах информационно-измерительной техники и автоматики различного назначения.

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Телешевский В.И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3-7.

2. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Негладкий анализ в задачах обработки информации // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 6-11.

3. Шестаков А.Л. Коррекция динамической погрешности измерительного преобразователя линейным фильтром на основе модели датчика // Известия вузов СССР. Приборостроение. 1991. № 4. С. 8-12

4. Карабегов М.А. Повышение точности аналитических приборов путем структурной оптимизации // Измерительная техника. 2009. № 10. С. 6-11.

Статья подготовлена в рамках гранта №14.B37.21.0781 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

Пьезоэлектрический вибрационный гироскоп как электромеханический преобразователь-шестиполюсник, основные принципы оптимизации

В.К. Доля

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Проблема построения эффективных автономных навигационных систем требует разработки оптимальных датчиков угловых ускорений и, в частности, пьезоэлектрических гироскопов (ПГ).

В настоящее время известно большое количество основных типов ПГ, поэтому при разработке оптимальной конструкции гироскопа, разработчик вынужден решать комплекс сложных задач с использованием аналитических методов математического анализа дифференциальных уравнений или осуществления анализа выбранной конструкции методами конечных элементов. В обоих случаях анализу подвергается конкретная конструкция колебательной системы ПГ. При этом общие закономерности, которые необходимо учитывать при выборе типа ПГ и его конкретной конструкции, остаются вне рамок анализа, т.е. сам выбор анализируемой конструкции может быть осуществлен без учета важных факторов, изначально определяющих низкое качество гироскопа.

В настоящей работе на основе общей теории электромеханических преобразователей представлены обобщенные уравнения взаимного преобразования энергии между электрическими и механическими входами гироскопа, сформулированы общие требования, которым должны удовлетворять оптимальный ПГ независимо от его конкретной конструкции.

Показано, что для резонансного гироскопа величина коэффициента преобразования (чувствительности) при единичной угловой скорости равна

$$M = \left|\frac{U_2}{U_1}\right| = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{\omega_p}\sqrt{\frac{C_1}{C_2}},$$

где

M - чувствительность ПГ;

U_1, U_2 - напряжения на входе возбуждения ПГ и на его приемном входе, соответственно;

K_1, K_2 - коэффициенты электромеханической связи гироскопа со стороны возбуждающего и приемного входов, соответственно;

Q_1, Q_2, C_1, C_2 - механические добротности и емкости гироскопа со стороны возбуждающего и приемного входов, соответственно;

ω_p - частота резонанса ПГ.

Результаты исследования, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобранауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичных производств для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем новигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению провительства № 218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВПО ЮФУ.

Многочастотный гидроакустический модуль как основа построения фазированных антенных решеток

Ю.К. Милославский, В.Н. Митько, П.П. Пивнев, С.П. Тарасов, Ю.В. Душенин, В.В. Гурский, И.И. Маркович

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог, Россия

Развитие гидроакустической антенной техники, как средства получения первичной информации в гидроакустике, идет по пути расширения диапазона рабочих частот, повышения удельной мощности и чувствительности, увеличения помехоустойчивости, формирования антенн различных конфигураций и др. Особое внимание уделяется созданию антенных систем в комплексе с устройствами первичной обработки сигналов. Заманчиво получение такого универсального элемента, с

помощью которого, как из кирпичиков, может монтироваться практически любая гидроакустическая антенна.

В настоящей работе рассматриваются результаты разработки гидроакустических модулей фазированных антенных систем с электронным блоком в моноблочном исполнении. Исследования и создание модуля выполнены совместными усилиями сотрудников НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, кафедры электрогидроакустической и медицинской техники (ЭГА и МТ) ЮФУ и НКТБ «Цифровой обработки сигналов» (ЦОС) ЮФУ. Разработанные модули, являясь законченными устройствами (рис.1), позволяют собирать фазированные антенные (ФАР) различных гидроакустических систем (многолучевых эхолотов, гидролокаторов и пр.).

Уникальность разработанных модулей состоит в том, что они работают на двух существенно отличающихся частотах (60 и 300 кГц). Причем каждый из модулей ФАР должен быть безукоризненным элементом двухчастотной антенной решетки с точки зрения создания классической характеристики направленности при совместном размещении модулей в антенне. Из этих и ряда других соображений было выбрано количество приемно – излучающих каналов в модуле.

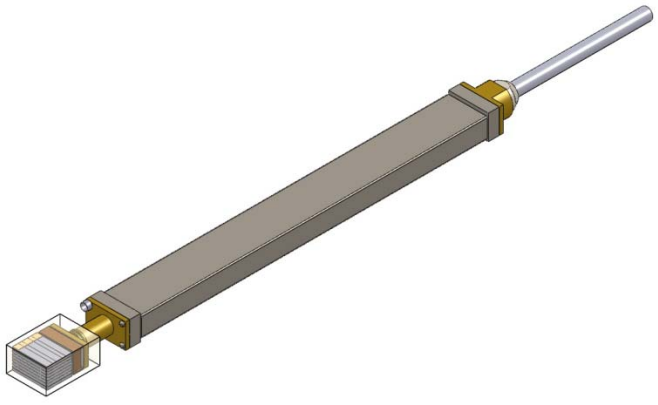


Рис. 1 Модуль фазированной антенной решетки

Особая роль при проектировании двухчастотного акустического модуля, состоящего из набора преобразователей, отводится выбору двухчастотного пьезоэлемента, позволяющего удовлетворить

противоречивым требованиям при формировании акустического блока, работающего на двух частотах.

В нашем случае отдельный пьезоэлемент для блока преобразователей изготовлен из пьезокерамики ЦТС-83Г в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами: ***l*** – по оси *X*, ***b*** – по оси *Y*, ***h*** – по оси *Z* (рис.2).

Элемент поляризовался перпендикулярно большим поверхностям в направлении наименьшего размера ***l***. Для излучения использовались продольные колебания пьезоэлемента в направлении размера ***h***, перпендикулярно направлению поляризации элемента. Для обеспечения требуемых рабочих частот выбирались первая и пятая моды продольных колебаний пьезоэлемента.

Для оптимизации пьезоэлемента применялось математическое моделирование методом конечных элементов, реализованным в программе ANSYS Multiphysics.

Акустический модуль, в состав которого входит восемь пьезоэлементов, представляет собой герметичную конструкцию, показанную на рис.3.

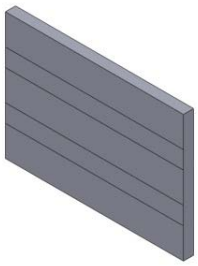


Рис. 2 Пьезоэлемент

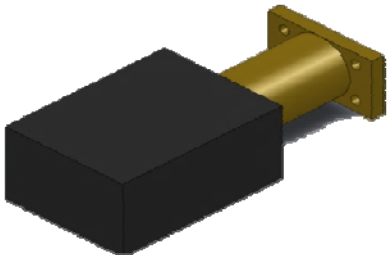


Рис. 3 Антенный модуль

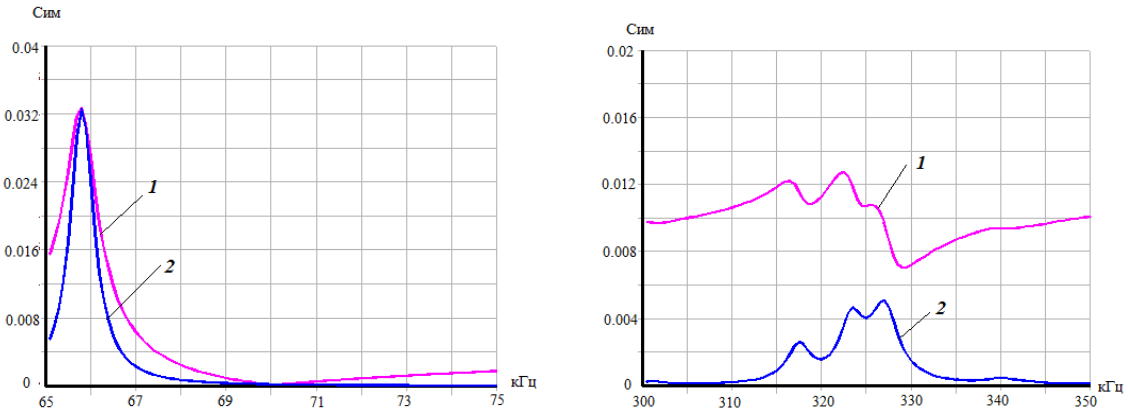
На рис. 4 приведены рассчитанные АЧХ полной и активной проводимости пьезоэлемента для выбранных мод колебаний при однородной поляризации пьезоэлемента, большие поверхности элемента были полностью электродированы.

Как видно из рис. 4б, пятая мода колебаний не изолирована и не эффективна при выбранной поляризации и заданных электродах пьезоэлемента.

Путем использования измененной специальной формы электродов, корректировки размеров и специальной поляризации пьезоэлемента удалось значительно улучшить эффективность пятой моды колебаний. Результаты одного из модельных экспериментов представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5б, пятая мода колебаний улучшенной модели изолирована и эффективна, и может быть использована в качестве второй рабочей частоты преобразователя.

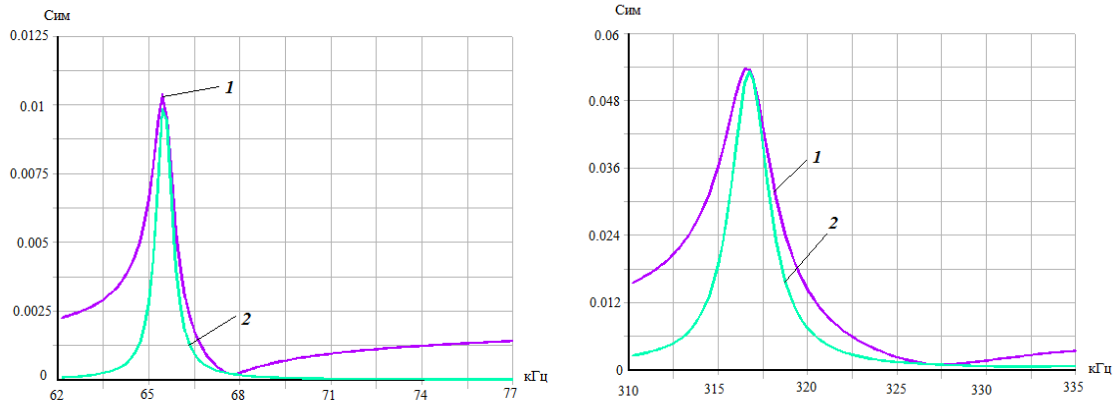
При проверке изготовленных пьезоэлементов результаты моделирования совпали с полученными экспериментальными данными.



а б

Рис. 4 АЧХ модуля полной (кривая 1) и активной (кривая 2) проводимостей
в окрестности первой и второй рабочей частот для исходной модели пьезоэлемента: первый резонанс (а), второй резонанс (б)

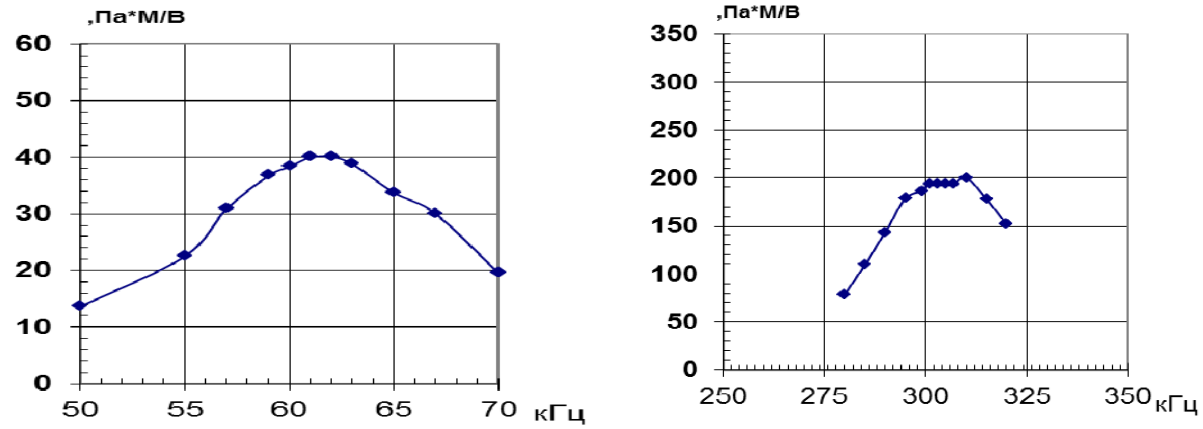
Разработанные и изготовленные на основе этих пьезоэлементов акустические модули по характеристикам соответствуют предъявляемым требованиям. На рис. 6 показаны измеренные амплитудно-частотные характеристики акустического модуля вблизи частот 60 кГц и 300 кГц. Как видно, полоса пропускания составляет более 10% от значения частот.



а б

Рис. 5 АЧХ модуля полной (кривая 1) и активной (кривая 2) проводимостей
в окрестности первой и второй рабочей частот для улучшенной модели пьезоэлемента: первый резонанс (а), второй резонанс (б)

Электрическая схема модуля многочастотной фазированной антенной решётки выполнена на печатной плате и помещена в специальный герметичный контейнер. Схема функциональная электрическая многочастотной фазированной антенной решётки (МГЦФАР) приведена на рис. 7. Для простоты вспомогательные устройства (супервизоры, загрузочное ПЗУ, тактовые генераторы и т.д.) не показаны.



а б

Рис. 6 Чувствительности акустического модуля в режиме излучения на средних частотах (а) и на высоких частотах (б)

В её состав входят контроллер сети EthernetU1, контроллер порта RS-422U2, специализированное быстродействующее вычислительное устройство U3, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) U4 и восемь идентичных аналоговых приёмоизлучающих трактов B1 - B8.

В свою очередь, каждый аналоговый приёмоизлучающий тракт включает в себя ключевой усилитель мощности U7, управляемый коммутатор приём-передача U9, малошумящий предварительный усилитель U8, усилитель с управляемым коэффициентом передачи U6, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) U5 и приёмоизлучающий многочастотный микропреобразовательU10.

Специализированное быстродействующее вычислительное устройство U3, выполненное на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС),включает в себя специализированный центральный процессор U3-1, многопортовое быстродействующее статическое оперативное запоминающее устройство U3-14 (ОЗУ) и восемь идентичных каналов цифрового формирования зондирующих сигналов (ЦФЗС) и предварительной цифровой обработки эхосигналов (ЦОС) A1 ÷ A8.

В свою очередь, каждый канал ЦФЗС включает в себя локальный контроллер зондирующих сигналов U3-7, генератор зондирующих сигналов U3-11 и контроллер прямого доступа к памяти U3-10.

Каждый канал ЦОС включает в себя вычислители синусной и косинусной квадратурных составляющих комплексной огибающей эхосигнала U3-12 и U3-13 соответственно, модули децимации данных первого уровня U3-8 и U3-9, цифровые фильтры нижних частот U3-4 и U3-5 и модули децимации данных второго уровня U3-2 и U3-3.

Проведенные исследования и испытания многочастотного гидроакустического модуля показали возможность его использования в качестве элемента фазированных антенных решеток различных типов гидроакустической поисковой аппаратуры.

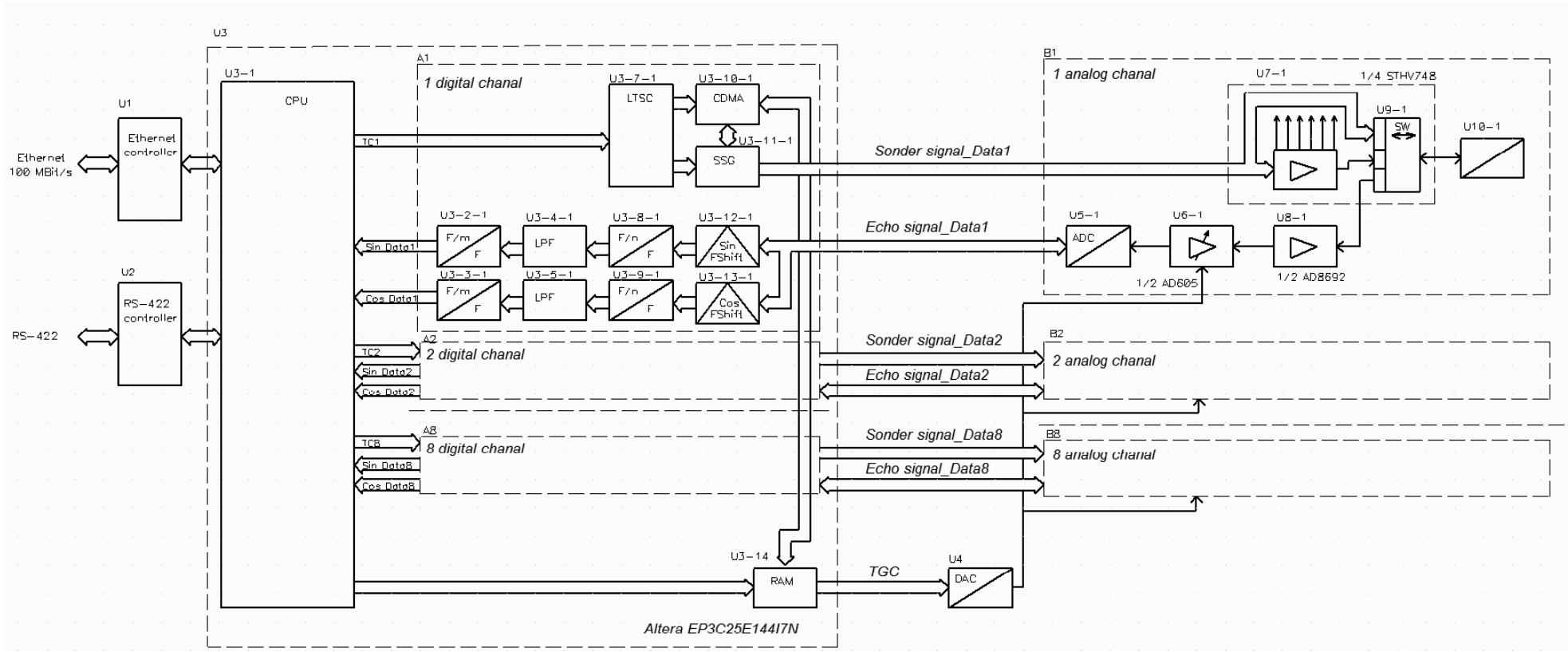


Рис. 7 Схема функциональная электрическая МГЦФАР

Разработка, серийный выпуск и внедрение аппаратуры ряда «Цензурка» для контроля параметров пьезоэлементов, пьезопреобразователей и гидроакустических антенных решеток

Н.М. Иванов, Е.В. Кондаков, Ю.К. Милославский

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

В 90-е годы в ВМФ России сложилась ситуация, когда многочисленные надводные и подводные носители имели большое число многоэлементных г.а. антенных решеток (ГААР), рабочие параметры которых невозможно было проконтролировать оперативно. Контроль электрической ёмкости пьезопреобразователей ГААР, проводившийся в ручную или отдельными встроенными системами контроля, был недостаточен для оценки работоспособности антенн. Контрольная аппаратура на носителях отсутствовала. Вместе с тем в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ был накоплен опыт разработки и применения аппаратуры для контроля электрофизических параметров пьезопреобразователей («Акустика», «Лиман», «Лира» и т.д.) динамическим методом. Они были созданы в виде комплексов с максимальным использованием стандартных приборов.

На основании имеющегося опыта РТУ ВМФ поручило НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ выполнение НИР, а затем ОКР по разработке и изготовлению компактной переносной автоматизированной аппаратуры для контроля непосредственно на объектах параметров пьезопреобразователей в составе многоэлементных ГААР. В течение 1996 – 2005г. были выполнены НИР и ОКР, на основании которых разработана аппаратура «Цензурка-2». Внешний вид аппаратуры показан на рис. 1. Принцип измерений, реализованный в аппаратуре показан на рис 2. В аппаратуре реализован цифровой способ измерений, позволяющий возбуждать преобразователь (пьезоэлемент) широкополосным сигналом, спектр которого охватывает заданную область частот. В качестве такого сигнала в аппаратуре «Цензурка-2» используется сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), формируемый программно ЭВМ в виде

массива длиной N. Напряжения $U_0(t)$ и $U(t)$ подаются на вход 2-х канального АЦП и через буферное ОЗУ в управляющую ЭВМ. С помощью алгоритма БПФ получаем два комплексных массива $U_0(f_k)$ и $U(f_k)$, длинной $1+N/2$ каждый, $f_k = F_d k/N$, $k \in [0, N/2]$, F_d–частота дискретизации . Значения комплексной проводимости в полосе частот от 0 до $F_d/2$ рассчитываются с использованием измеренных величин.

Рис. 1.

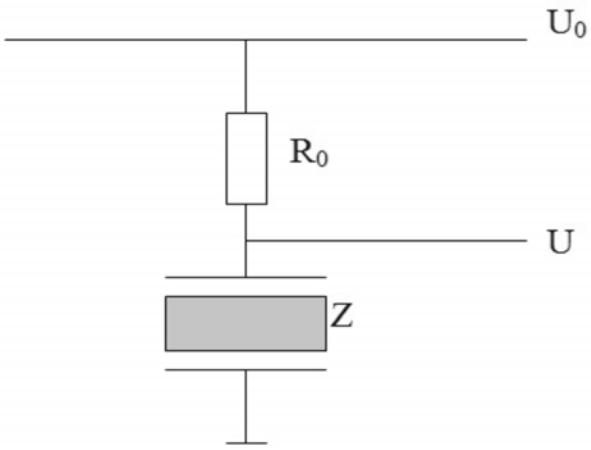


Рис. 2.

Режимы работы и основные технические характеристики аппаратуры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы работы	Основные измеряемые параметры
1. Измерение в резонансной области	- Частоты резонансов и антирезонансов; - Динамические емкость и сопротивление; - Добротность; - Коэффициент электро-мех. связи;
2. Измерения на постоянной низкой частоте (1 кГц, 100 Гц)	- Ёмкость и сопротивление на низкой частоте; - Тангенс угла диэлектрических потерь;
3. Измерение на постоянном токе при напряжении 100 В.	- Сопротивление постоянному току; - Сопротивление изоляции.

Основные технические характеристики

Параметры	Диапазон значений	Пределы допускаемой относительной погрешности
Диапазон рабочих частот	(0.3 - 500)кГц	± 0.5%
Электрическая ёмкость на низ. част.	$(5*10^{-10} - 5*10^{-6})$Ф	± 0.5%
Активная составляющая полного электрического сопротивления в резонансной области	(5 - 10)Ом (10 - 10000)Ом	± 25% ± 10%
Сопротивление постоянному току и сопротивление изоляции при 100 В	$(10^3 - 10^6)$Ом $(10^6 - 10^{10})$Ом	± 10% ± 30%
Тангенс угла диэлектрических потерь	(1 - 6)% (6 - 100)%	± 20% ± 10%
Динамическая емкость	$(1 - 50)*10^{-9}$Ф	± 10%
Динамическая индуктивность	(0.5 - 20)мГ	± 10%
Добротность	2 - 300	± 20%

a

Время измерения полного набора параметров одного преобразователя составляет 20 – 25 сек. Такая скорость измерений позволяет оперативно контролировать параметры многоэлементных гидроакустических антенн. Аппаратура выпускается серийно с 2005 г. и позволяет реализовать оперативный контроль приборов 1 МГК-400, МГК-500(520), МГК-540, ГАК «Звезда-2», ГАК «Заря-2».

Внешний вид аппаратуры «Цензурка-2», развёрнутой на объекте, показан на рис. 3.

Рис. 3.

Аппаратура «Цензурка-2» прошла испытания на утверждение типа средств измерений и имеет соответствующий сертификат.

По запросам представителей промышленности были разработаны одноканальные варианты аппаратуры «Цензурка-М» и «Цензурка-МА2». Внешний вид аппаратуры показан на рис. 4.

Рис.4

Список измеряемых параметров представлен в таблице 2.

Таблица 2

Цензурка-МА2	Цензурка-М
Пьезоматериалы (измерения на штатных образцах пьезоэлементов из пьезоматериала)	Пьезопреобразователи
- частоты резонансов и антирезонансов - статическая емкость - тангенс угла диэлектрических потерь - добротность - пьезомодуль в динамическом режиме - диэлектрическая проницаемость - скорость звука - коэффициент электромеханической связи - статическая обработка по результатам контроля партии однотипных элементов	- частоты резонансов и антирезонансов - статическая емкость - сопротивление постоянному току - сопротивление изоляции - динамические емкость и сопротивление - тангенс угла диэлектрических потерь - добротность - коэффициент электромеханической связи

Время измерений – от 5-12 сек для всего перечня параметров. Измерения полностью соответствуют требованиям действующих российских и международных стандартов. По желанию Заказчика могут быть проведены доработки в аппаратуре, алгоритмах получения результатов измерений, а также перечне измеряемых и контролируемых параметров.

Изделия «Цензурка-М» и «Цензурка-МА2» прошли все испытания и имеют сертификат об утверждении типа средств измерений. На аппаратуре «Цензурка-МА2» достигнуты наилучшие метрологические характеристики, что позволяет измерять статическую емкость и тангенс угла диэлектрических потерь с относительной погрешностью на уровне около ±1%.

Аппаратура ряда «Цензурка» внедрена:

– «Цензурка-2» – на флотах ВМФ, в концерне «Океанприбор»;
– «Цензурка-М» и «Цензурка-МА2» – в концернах «Океанприбор», «Электроприбор» и «Гидроприбор», г. С.-Петербург, НПП «Регион», г. Москва, на заводе «Аврора-Элма», г. Волгоград, на Таганрогском заводе «Прибой», в ЮФУ – на хим. факультете, на ФВТ, в НКТБ «Пьезоприбор».

Таким образом, успешная разработка и модификации аппаратуры ряда «Цензурка» позволили НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ осуществить ее внедрение не только на флотах, но также на предприятиях судостроительной промышленности и на производствах, выпускающих пьезокерамическую продукцию.

Метод измерения матрицы собственных и взаимных импедансов излучения многоэлементных антенных решёток

Н.М. Иванов, Е.В. Кондаков, Ю.К. Милославский

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов–на–Дону, Россия

Давление, развиваемое пьезоэлектрическим преобразователем в составе антенной решётки, зависит не только от напряжения, приложенного к электродам его пьезоэлемента, но и от напряжений, подаваемых на все остальные преобразователи антенной решётки. Это обусловлено тем, что мощность, потребляемая каждым преобразователем, расходуется не только на возбуждение колебаний среды, но и на преодоление суммарного давления, развиваемого всеми остальными преобразователями на поверхности данного элемента. Если антенная решётка содержит N преобразователей с колебательными скоростями w_n, $n \in [1, N]$, а F_n – электромеханические силы, возбуждающие колебания элементов решётки, то связь между ними определяется уравнением

$$\mathbf{Zw} = \mathbf{F}, \tag{1}$$

где $\mathbf{Z}$ – матрица размером $N \times N$ с элементами $Z_{nk} = \varsigma_n \delta_{nk} + \Xi_{nk}$, $n, k \in [1, N]$, ς_n – механический импеданс n–го преобразователя, δ_{nk} – символ Кронекера, $\mathbf{O} = \mathbf{z} + \mathbf{z}'$ – $N \times N$ матрица собственных и взаимных сопротивлений излучения [1], которая складывается из матрицы $\mathbf{z}$ взаимного влияния через среду распространения и матрицы $\mathbf{z}'$ взаимного влияния через конструктивные элементы антенны, $\mathbf{w}$ и $\mathbf{F}$ – матрицы–столбцы размером $N \times 1$.

Полная акустическая мощность, излучаемая антенной решёткой, может быть найдена по формуле

$$P = \frac{1}{2} \mathbf{w}^{+} \mathbf{z} \mathbf{w}, \tag{2}$$

где $(\cdot)^{+}$ – символ эрмитова сопряжения.

В выражения (1,2) входят исключительно механические величины. Переход на электрическую сторону осуществляется по формулам

$$I_n / w_n = F_n / u_n = m_n, \tag{3}$$

где I_n, u_n – ток и падение напряжения на n–ом элементе, m_n – коэффициент электромеханической трансформации. Выразив с помощью соотношений (3) w_n, F_n через I_n и u_n, перепишем уравнение (1) в виде

$$\sum_{k=1}^{N} \left(\frac{\varsigma_n \delta_{nk} + \Xi_{nk}}{m_n m_k} \right) I_k = u_n,$$

или в обобщенном матричном виде

$$\widetilde{\mathbf{Z}}\mathbf{I} = \mathbf{U}, \tag{4}$$

где $\widetilde{\mathbf{Z}}$ – матрица размером $N \times N$ с элементами

$$\widetilde{Z}_{nk} = \frac{Z_{nk}}{m_n m_k} = \delta_{nk} \frac{\varsigma_n}{m_n^2} + \frac{\Xi_{nk}}{m_n m_k}, \tag{5}$$

$\mathbf{I}$ и $\mathbf{U}$ – векторы–столбцы размером $N \times 1$ с элементами I_n и U_n соответственно. Формула (2) принимает следующий вид:

$$P = \frac{1}{2}\mathbf{I}^{+}\widetilde{\mathbf{z}}\mathbf{I} = \frac{1}{2}\left(\widetilde{\mathbf{Z}}^{-1}\mathbf{U}\right)^{+}\widetilde{\mathbf{z}}\left(\widetilde{\mathbf{Z}}^{-1}\mathbf{U}\right), \tag{6}$$

где $\widetilde{\mathbf{z}}$ – модифицированная матрица собственных и взаимных сопротивлений излучения с элементами $\widetilde{z}_{nk} = \widetilde{z}_{nk} / m_n m_k$. Таким образом, для получения оценки излучаемой антенной акустической мощности необходимо определение матрицы $\widetilde{\mathbf{z}}$, которое может быть выполнено следующим образом.

С электрической стороны антенная решётка может рассматриваться как система, имеющая N входов. Для каждого входа могут быть измерены комплексные амплитуды напряжений u_n, гармонически зависящих от времени, и комплексные амплитуды токов I_n, линейная связь между которыми описывается формулой (3).

Чтобы измерить матицу $\widetilde{\mathbf{Z}}$, содержащую N^2 комплексных элементов, положим $\mathbf{U} = \mathbf{u}_j$, где $j \in [1, N]$ имеет некоторое фиксированное значение, $\mathbf{u}_j$ – вектор с компонентами $u_{jn} = U_j \delta_{jn}$, U_j – подлежащая измерению амплитуда напряжения в j–ом канале. Измерительная процедура состоит из N шагов, нумеруемых индексом j, на каждом из которых напряжение подаётся на j–ый вход и измеряются комплексные амплитуды токов во всех N каналах, которые образуют вектор $\mathbf{i}_j$ с компонентами i_{jn}. При этом выходы всех каналов, кроме j–го, предполагаются закороченными, чем обеспечивается выполнение условия $u_{jn} = 0$ при $n \neq j$. В результате получаем N векторов $\mathbf{i}_j$, $j \in [1, N]$, которые объединяем в матрицу $\hat{\mathbf{I}} = (\mathbf{i}_1, \ldots, \mathbf{i}_N)$. Тогда формула (4) принимает вид

$$\widetilde{\mathbf{Z}}\hat{\mathbf{I}} = \hat{\mathbf{U}},$$

где $N \times N$ матрица $\hat{\mathbf{U}} = (\mathbf{u}_1, \ldots, \mathbf{u}_N)$. Отсюда

$$\widetilde{\mathbf{Z}} = \hat{\mathbf{U}}\hat{\mathbf{I}}^{-1}. \qquad (7)$$

Для антенной решётки в соответствии с формулой (5) пишем

$$\widetilde{Z}_{nk} = \delta_{nk} \frac{\varsigma_n}{m_n^2} + \widetilde{z}_{nk} + \widetilde{z}'_{nk}.$$

Интерес представляет матрица $\widetilde{\mathbf{z}}$, поскольку именно она согласно выражению (6) определяет излучаемую антенной акустическую мощность.

Чтобы измерить матрицу $\widetilde{\mathbf{z}}$, можно поступить следующим образом. Для антенны, не нагруженной на рабочую среду, $\widetilde{\mathbf{z}} = \mathbf{0}$. Следовательно, измерив предварительно матрицу $\widetilde{\mathbf{Z}}_0$ для ненагруженной антенны, а затем матрицу $\widetilde{\mathbf{Z}}_1$ антенны, помещенной в рабочую среду, можно определить матрицу $\widetilde{\mathbf{z}}$:

$$\widetilde{\mathbf{z}} = \widetilde{\mathbf{Z}}_1 - \widetilde{\mathbf{Z}}_0.$$

Таким образом, аппаратура для измерения матрицы собственных и взаимных импедансов излучения многоэлементных антенных решёток должна иметь в своём составе ЭВМ и N–канальный коммутатор, с помощью которого первый из измеряемой пары преобразователей, коих имеется N^2, подключается к цифровому генератору измерительного напряжения, а выходы второго и всех остальных закорачиваются. Измеряются напряжение и ток первого преобразователя и ток, протекающий во втором преобразователе. Результаты в цифровом виде поступают в ЭВМ, где накапливаются для формирования матриц $\hat{\mathbf{I}}$ и $\hat{\mathbf{U}}$ с последующим вычислением матрицы $\widetilde{\mathbf{Z}}$ по формуле (7). Полный цикл измерений как с антенной, помещенной в рабочую среду, так и с ненагруженной антенной позволяет получить оценки матриц $\widetilde{\mathbf{Z}}_0$, $\widetilde{\mathbf{Z}}_1$ и $\widetilde{\mathbf{z}}$, а в дальнейшем вычислять по формуле (6) акустическую мощность антенны при любых условиях её возбуждения. Прототипом такой аппаратуры может служить аппаратура «Цензурка–2», принципы функционирования которой описаны в работе [2].

Список литературы

1. М.Д. Смарышев. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

Иванов Н.М., Кондаков Е.В., Милославский Ю.К. Цифровая аппаратура и алгоритмы оперативного измерения параметров изделий пьезотехники. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т: 46. № 2 . С: 78-83.

Анализ источников погрешностей измерения параметров пьезоэлментов и пути их снижения

Е.В. Кондаков

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

При разработке и производстве современных пьезоэлементов требуется аппаратура для измерения их параметров, обладающая высокой точностью. Допустимые значения погрешностей основных измеряемых величин приведены в таблице.

Таблица. Измеряемые параметры пьезоэлементов

Параметр	Обозначение	Диапазон значений	Допустимая погрешность
Ёмкость на частоте 1 кГц	C_0	20..100000 пФ	0,5%
Тангенс угла потерь на частоте 1 кГц	$tg\delta$	0,002..0,1	0,002
Частота резонанса	f_r	1..500 кГц	0,25%
Частота антирезонанса	f_a	1..500 кГц	0,5%

Настоящая работа посвящена анализу и путям преодоления некоторых причин, препятствующих достижению требуемой точности измерения параметров пьезоэлементов.

Погрешности измерений можно условно разделить на три категории:

- погрешности, связанные с внешними условиями;
- погрешности, связанные с условиями подключения пьезоэлемента к измерительному прибору;
- внутренние погрешности измерительной схемы.

Эти погрешности сопоставимы по величине, поэтому для достижения высокой точности требуется их одновременный учёт и компенсация.

Погрешности, обусловленные внешними условиями измерений (температурой, влажностью). Экспериментально установлено, что ёмкость некоторых образцов иногда испытывает значительный дрейф с характерным временем в десятки секунд, который обусловлен, как правило, нагревом элемента рукой оператора при установке его в держатель. Величина этого дрейфа для миниатюрных образцов с малой теплоёмкость может значительно превышать допустимую погрешность измерений. Значительные кратковременные

отклонения величины $tg\delta$ таких образцов отмечены также под воздействием дыхания оператора. Поэтому при измерении миниатюрных пьезоэлементов следует ограждать их от любых внешних источников тепла и повышенной влажности.

Погрешности, связанные с условиями подключения. Образец, как правило, подключается к измерительному прибору через соединительное устройство (держатель), обладающее упругими электрическими контактами. Поэтому измеряются не характеристики пьезоэлемента как такового, а характеристики электромеханической системы пьезоэлемент+держатель, подключенной к измерительному прибору через пассивный четырёхполюсник, образованный паразитными ёмкостью, индуктивностью и сопротивлением держателя (см. рисунок).

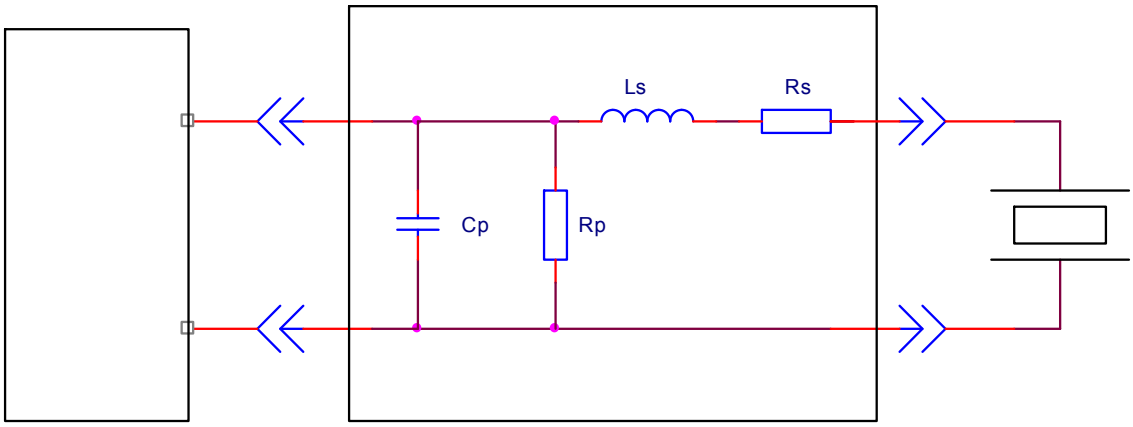


Рис. Эквивалентная схема подключения измеряемого пьезоэлемента.

Механическое влияние держателя может проявляться в смещении частот f_r, f_a, причём это смещение может меняться при повторной установке образца. Возникающие разбросы f_r, f_a, имеют типичную относительную величину порядка 0,1%, но могут значительно увеличиваться при неудачных сочетаниях конструкции держателя и пьезоэлемента. Если образец из-за неправильного зажима касается, помимо контактов, каких-либо других твёрдых поверхностей, то могут возникать дополнительные резонансы и/или может расщепляться основной резонанс. Для достижения максимальной точности держатель должен соответствовать конструкции и размерам измеряемого пьезоэлемента и оказывать минимальное механическое влияние на его колебания.

Паразитная ёмкость монтажа держателя и кабеля, соединяющего его с измерительным прибором C_p, имеет типичное значение в несколько десятков пФ и создаёт не только аддитивную ошибку измерения C_0, но и уменьшает частоту антирезонанса f_a на относительную величину $\frac{\Delta f_a}{f_a} = \frac{C_d}{2(C_d + C_t)} \frac{\Delta C_t}{C_t}$, где C_t и C_d – соответственно ёмкость статической и динамической части эквивалентной схемы. Для пьезоэлемента, обладающего малой ёмкостью, например $C_t = 40$ пФ, $C_d = 10$ пФ, неучтённая ёмкость C_p величиной 1 пФ приводит к дополнительной относительной погрешности измерения f_a около 0,3%.

Обладая собственными потерями и, соответственно, ненулевым значением $tg\delta_p$, ёмкость монтажа держателя C_p вносит дополнительную погрешность в измерение диэлектрических потерь образца: $\Delta tg\delta = \frac{C_p}{C_0} tg\delta_p$. Например, наиболее распространённый материал для изготовления печатных плат FR-4 имеет $tg\delta < 0{,}03$. Некоторые материалы изоляции проводов также имеют потери с $tg\delta \approx 0{,}01$, что при малых ёмкостях образца может привести к результатам измерения $tg\delta$, кратно отличающимся от их истинных значений.

Индуктивность монтажа L_S и последовательное сопротивление R_S сказываются при измерениях малых импедансов на высоких частотах. При больших ёмкостях пьезоэлемента $C_0 \sim 1$ мкФ и характерной величине $L_S \approx 1$ мкГн частота паразитного резонансного контура $L_S C_t$ оказывается в диапазоне сотен килогерц, а вызванное им влияние сопротивления R_S распространяется на значительно более низкие частоты, искажая результат измерения активной составляющей проводимости.

Для обеспечения требуемой точности измерений держатель должен обладать столь малыми значениями паразитных компонентов, которых не удаётся достичь на практике по конструктивным причинам. Поэтому в измерительном приборе должна быть предусмотрена математическая коррекция результатов измерений на основании подходящей модели паразитных компонентов держателя, а также процедура измерения параметров этой модели.

Внутренние погрешности измерительной схемы. Точность работы двухканальной измерительной схемы [1] существенно зависит от неидентичности амплитудно- и фазочастотных характеристик каналов. При наибольшей величине нагрузочного резистора R = 30 кОм допустимая относительная амплитудная неидентичность каналов, ограниченная допустимой погрешностью измерения ёмкости в 1 пФ на частоте 1 кГц, имеет величину $\sim 10^{-4}$. Аналогично, допустимая неидентичность задержек в каналах не должна превышать 1 нс. Столь малые значения указанных параметров конструктивно недостижимы, но могут быть измерены в рамках той же двухканальной схемы с точностью, достаточной для их математической компенсации.

Таким образом, для достижения требуемой точности измерений должны быть тщательно учтены и скомпенсированы все источники погрешностей (температура образца, механические и электрические условия его подключения) и откалиброваны параметры измерительной схемы.

Список литературы

1. Иванов Н.М., Кондаков Е.В., Милославский Ю.К. Цифровая аппаратура и алгоритмы оперативного измерения параметров изделий пьезотехники. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т: 46. № 2 . С: 78-83.

Трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр

Янчич В.В., Джения Д.В., Янчич Вл.В., Крамаров Ю.А.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Для определения значения и направления в пространстве вектора виброускорения необходимо одновременное измерение трех его составляющих, что особенно важно в условиях нестационарной пространственной вибрации. С этой целью используют три однокомпонентных акселерометра, или один трехкомпонентный. Точность измерений повышается, если трехкомпонентный акселерометр имеет общий, для трех координат, центр чувствительности [1].

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка работоспособности трехкомпонентного пьезоэлектрического

преобразователя виброускорения (рис. 1), схема построения которого рассмотрена в работе [2].

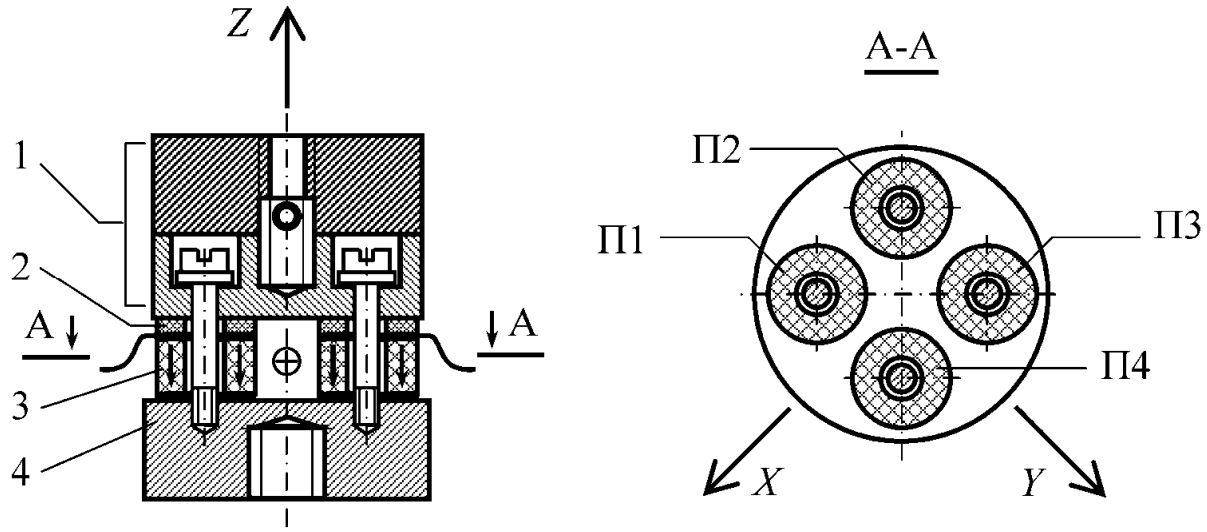


Рис. 1. Конструктивная схема трехкомпонентного преобразователя:
1 – инерционный элемент; 2 – изолятор; 3 – пьезоэлемент; 4 –основание;
⊙, ⊕ – центры масс инерционного элемента и группы пьезоэлементов;
П1–П4 – обозначение пьезоэлементов в соответствии с рис. 2

В основе работы преобразователя лежит возникновение деформаций растяжения-сжатия противоположного знака симметрично оси преобразователя при поперечном направлении ускорения. Воздействие ускорения, например по оси *X*, приводит к деформации сжатия пьезоэлементов П2, П3 и растяжения П1, П4. При этом на выводах пьезоэлементов П2, П3 индуцируются равные положительные сигналы, а на выводах П1, П4 – отрицательные. Аналогично ускорение по оси *Y* индуцирует положительные заряды на выводах пьезоэлементов П1, П2 и отрицательные на П3, П4. При ускорении по оси *Z* на выводах всех пьезоэлементов фазы и значения сигналов равны. Изменение направления ускорения на противоположное вызывает изменение знаков деформаций и сигналов. Таким образом, совокупность амплитуд и фаз сигналов на выводах пьезоэлементов П1–П4 несет информацию о значении и направлении ускорения.

Для одновременного измерения трех компонентов вектора ускорения преобразователь в составе акселерометра должен быть подключен к обрабатывающему электронному устройству (рис. 2).

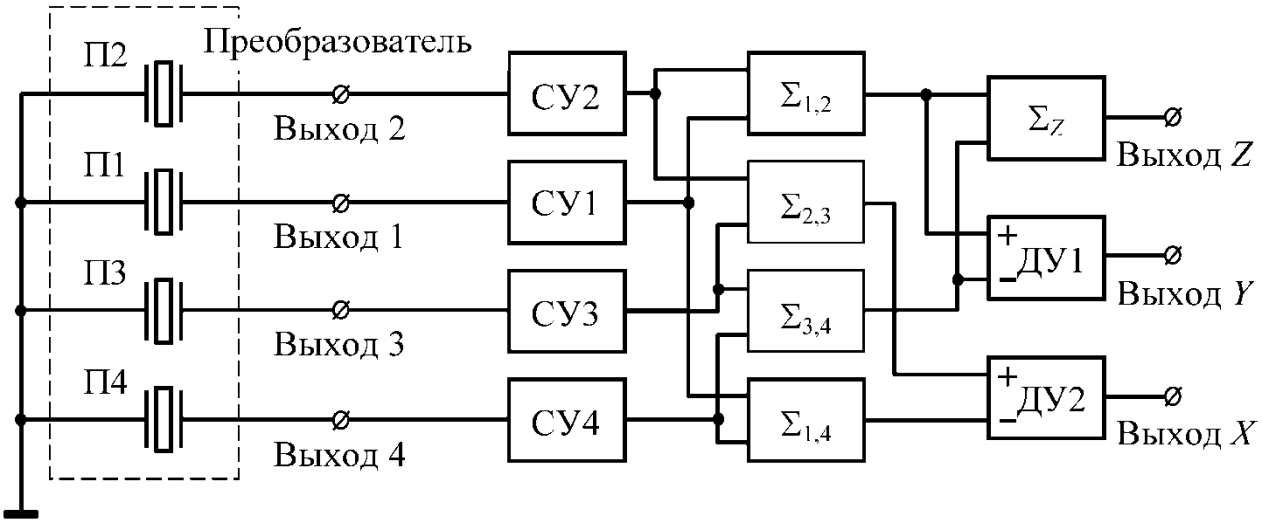


Рис. 2. Функциональная схема трехкомпонентного акселерометра: П1–П4 – пьезоактивная функциональная зона; СУ – согласующий усилитель; Σ – сумматор; ДУ – дифференциальный усилитель

В табл. 1 представлены расчетные значения и полярность электрического напряжения на выходах преобразователя и обрабатывающего электронного устройства. Для удобства представления значения ускорения и напряжения на выходах СУ нормированы и приведены к единице.

Таблица 1. Полярность и напряжение при различных направлениях ускорения

Направление ускорения по оси	На выходе согласующего усилителя				На выходе акселерометра		
	СУ1	СУ2	СУ3	СУ4	*X*	*Y*	*Z*
X	–1	+1	+1	–1	+4	0	0
Y	+1	+1	–1	–1	0	+4	0
Z	+1	+1	+1	+1	0	0	+4

В табл. 2 приведены результаты, полученные при испытании экспериментального макетного образца трехкомпонентного акселерометра.

Таблица 2. Напряжение на выходах акселерометра при ускорении 10 м·с$^{-2}$

Направление ускорения по оси	Напряжение выходе, В		
	X	*Y*	*Z*
X	6,74	0,2	0,28
Y	0,24	6,85	0,31
Z	0,046	0,039	4,01
XY (45°)	4,81	4,8	0,18

Отличие значений коэффициентов преобразования в продольном и поперечном направлениях связано с отношением расстояния между центрами масс инерционного элемента и пьезоэлементов к расстоянию между осями последних от оси симметрии преобразователя. Нормирование чувствительностей по осям может осуществляться подбором коэффициентов усиления усилителей ДУ1 и ДУ2.

Полученные результаты подтверждают практическую работоспособность трехкомпонентного преобразователя, принцип работы которого может использоваться и в трехкоординатных датчиках силы.

Список литературы

1. Янчич В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение. – Т. 7).

2. Митько В. Н., Крамаров Ю. А., Панич А. А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 240 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение. – Т. 6).

Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь

Янчич Вл. В., Панич А.Е.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Монокерамический преобразователь (рис. 1) предназначен для одновременного измерения линейного *a* и углового α вибрационных ускорений. Вместо линейного ускорения измеряемым параметром может быть динамическое усилие *F*, направленное вдоль продольной оси преобразователя.

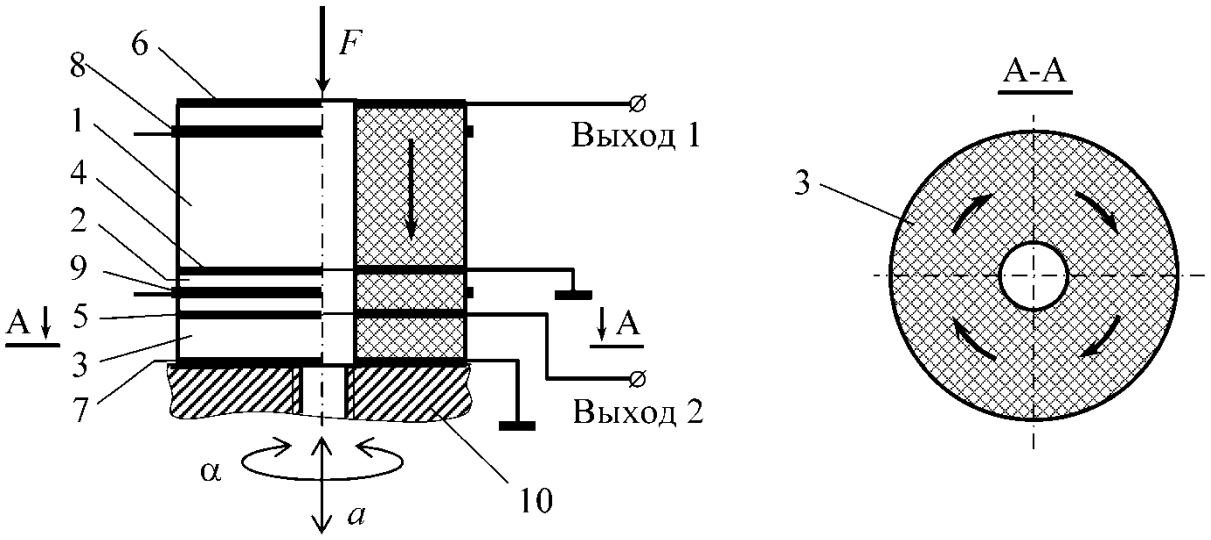


Рис. 1. Двухпараметровый преобразователь: 1, 3 – пьезоактивный слой; 2 – промежуточный слой; 4, 5 – внутренний электрод; 6, 7 – внешний рабочий электрод; 8, 9 – дополнительный электрод; 10 – основание датчика; направление поляризации показано стрелками

Преобразователь представляет собой цилиндрический блок из ПКМ со слоями 1–3, соединенными термодиффузионной сваркой через внутренние электроды 4, 5. Слой 1 имеет продольное направление поляризации, слой 2 не поляризован, а слой 3 наполяризован тангенциально. На торцы блока нанесены внешние электроды 6, 7, на внешней образующей поверхности выполнены дополнительные электроды 8, 9, предназначенные для компенсации температурного изменения коэффициентов преобразования по заряду, соответствующих выходам 1 и 2.

Осевое отверстие блока предназначено для его крепления к основанию датчика 10.

Работа преобразователя основана на прямом пьезоэффекте. Линейное ускорение a (эффективная масса инерционного элемента равна половине массы слоя 1) или усилие F вызывают деформацию растяжения-сжатия пьезоактивного слоя 1 и приводят к возникновению разности потенциалов на его электродах 4, 6 (активный пьезомодуль d_{33}). Генерируемые при этом заряды в слое 3 взаимно компенсируются. При угловом ускорения α под воздействием момента силы инерции (эффективная масса инерционного элемента равна сумме масс слоев 1, 2 и половине массы слоя 3), в слое 3 создается деформация кручения со сдвиговой тангенциальной составляющей. Это приводит к возникновению разности потенциалов на электродах 5, 7 (активный пьезомодуль d_{15}). В данном случае заряды на электродах 4, 6 отсутствуют. Таким образом, электрический сигнал на выходе 1 пропорционален линейному ускорению или приложенному продольному усилию, а на выходе 2 – угловому ускорению. Для повышения чувствительности к ускорениям на блок может быть установлен дополнительный инерционный элемент.

Области между электродами 6, 8 и 5, 9 играют роль дополнительных функциональных зон с термозависимой электрической емкостью. Компенсация температурной зависимости коэффициентов преобразования по заряду осуществляется путем включения электродов 8 и 9 в цепи отрицательной обратной связи операционных усилителей соответствующих согласующих зарядовых усилителей, подключенных к выходам 1 и 2 [1].

Литература

1. Янчич В. В., Панич А. Е. Управление характеристиками пьезоэлектрических датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Междунар. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 329–334.

Математическая модель двухзонного электромеханического интегрированного преобразователя с калибратором

Янчич Вл. В., Панич А.Е., Митько В.Н.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Использование встроенного устройства тестирования пьезоэлектрического датчика механической величины (ПДМВ) позволяет без его демонтажа на контролируемом объекте проверять работоспособность и исправность всех цепей измерительной системы. В работе [1] рассмотрен преобразователь усилия с функцией тестирования, выполненный в виде монолитного блока из пьезоэлектрического керамического материала (ПКМ) ЦТС-83. В настоящей работе приведены результаты исследования осесимметричной математической модели конструктивного варианта такого преобразователя (рис. 1) методом конечных элементов с использованием программного пакета ANSYS. Моделирование проведено с целью оптимизации режимов поляризации и оценки основных технических характеристик.

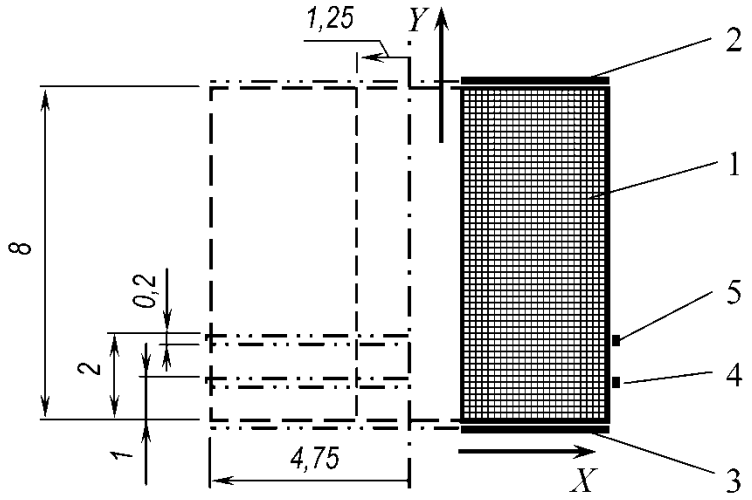


Рис. 1. Расчетная осесимметричная модель преобразователя: 1 – сечение блока; 2, 3 – основные электроды; 4, 5 – дополнительные электроды

Образование основной и дополнительной пьезоактивных функциональных зон основано на получении заданного характера распределения поляризованного состояния ПКМ в блоке, для чего

использовался двухэтапный процесс поляризации в сочетании с технологической коммутацией электродов. На первом этапе осуществляется поляризация основной зоны подачей постоянного напряжения на электроды 2, 3. На втором этапе – дополнительной зоны, с использованием электродов 4 и 5. Поскольку электрическое поле в объеме блока неоднородно, то при рассмотрении модели использовано понятие напряженности эффективного однородного поляризующего поля $E_{оп}$, равной отношению разности потенциалов на электродах к эффективному расстоянию между ними. В этом случае результат поляризации зависит от отношения $E_{оп}/E_{эк}$, где $E_{эк}$ – эффективное коэрцитивное поле. Результаты поляризации блока показаны на рис. 2. При оптимальных режимах обе зоны наполяризованы, практически, однородно (рис. 2*б*).

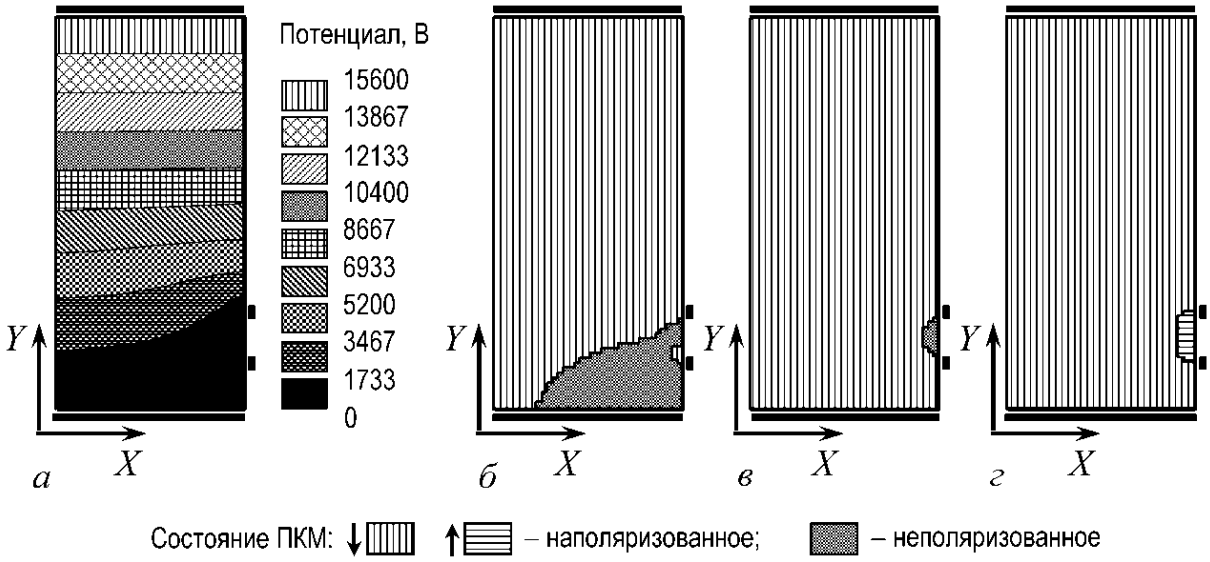


Рис. 2. Примеры распределения электрического потенциала (*а*) и поляризованного состояния (*б – г*) в осесимметричной модели: *а*, *б* – $E_{оп}/E_{эк}$ = 1,5, электроды 3, 4 и 5 замкнуты; *в* – $E_{оп}/E_{эк}$ = 2, электроды 4, 5 замкнуты; *г* – $E_{оп}/E_{эк}$ = 1,5

При анализе рабочих состояний рассматривается преобразователь, закрепленный поверхностью с электродом 3 (см. рис. 1). Тестирование осуществляется подачей переменного напряжения 1 В на электрод 4 относительно соединенных вместе электродов 3 и 5. На частотах, в несколько раз меньших частоты механического резонанса блока, под

действием электрического поля в дополнительной функциональной зоне возникают сжимающие механические напряжения, а остальная часть блока деформируется практически однородно (рис. 3).

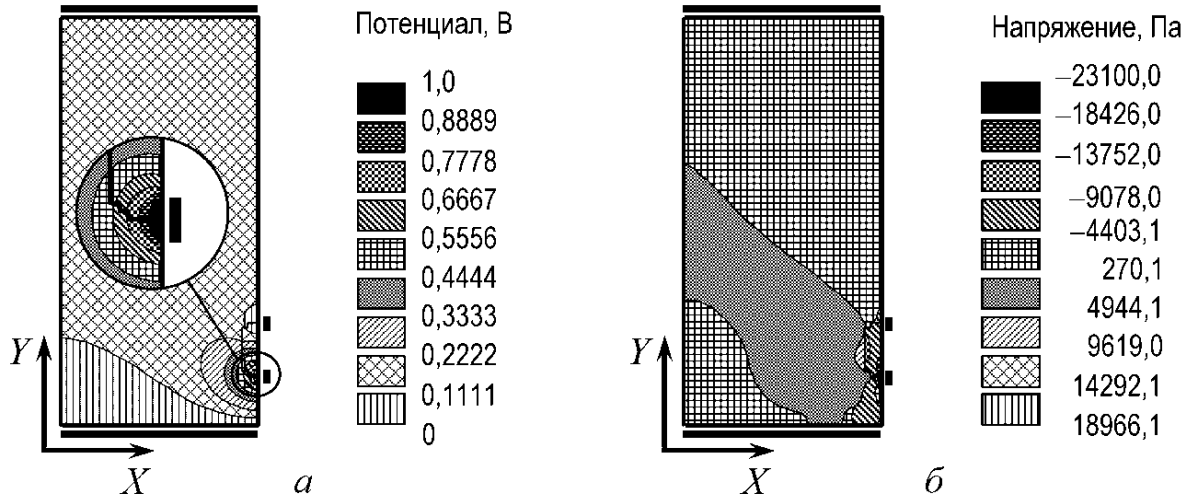


Рис. 3. Распределение электрического потенциала (*а*) и продольных механических напряжений (*б*) в объеме преобразователя

Сигнал отклика на частотах приблизительно до одной десятой частоты установочного резонанса однозначно связан со значением коэффициента преобразования и может использоваться для его калибровки. Максимум сигнала отклика соответствует частоте установочного резонанса датчика.

Преобразователь имеет следующие рассчитанные характеристики: коэффициенты преобразования 0,46 пКл·м$^{-1}$·с^2 и 4,37 мВ·м$^{-1}$·с^2; максимальная рабочая частота (при неравномерности АЧХ 5 %) 20 кГц; частота установочного резонанса не менее 96 кГц; калибровочные коэффициенты 136 мВ/В и 16,88 пКл/В.

Аналогичные конструкции преобразователей могут использоваться в датчиках виброускорения, силы, динамического и акустического давления.

Список литературы

1. Янчич Вл. В. Монолитный пьезоэлектрический преобразователь усилия с функцией калибровки // Сб. тез. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов н/Д: Изд-воЮФУ, 2012. – С. 59–62.

Средства измерения давления, уровня, расхода, плотности и температуры

М.В. Богуш

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, ООО «Пьезоэлектрик»,

г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: piezo@inbox.ru

Целью настоящей работы является обзор средств измерения давления, уровня, расхода, плотности и температуры, серийно выпускаемых нашим предприятием и успешно работающих более, чем на 3000 предприятиях различных отраслей народного хозяйства, в том числе в энергетике, машиностроении, газовой, нефтеперерабатывающей, пищевой и других во всех регионах России от Владивостока до Калининграда и за рубежом.

Научно-производственное предприятие «Пьезоэлектрик» специализируется на разработке и производстве измерительных преобразователей механических и теплофизических величин и вторичной аппаратуры. Основные виды выпускаемой продукции [1,2]:

- датчики избыточного, абсолютного, гидростатического давления, разрежения и разности давления с аналоговым и цифровым выходным сигналом;

- пьезоэлектрические преобразователи и датчики для измерения импульсных и быстропеременных процессов, в том числе для ультразвуковых и вихревых расходомеров энергоносителей;

- датчики и системы контроля и регулирования уровня в резервуарах и колодцах;

- расходомеры и счетчики для измерения расхода жидкости, тепла, газа, пара;

- плотномеры жидкости и газа вибрационные;

- датчики и системы для измерения температуры с аналоговыми и цифровыми выходными сигналами.

Многие технические решения защищены патентами РФ, а выпускаемые приборы стали дипломантами конкурсов «100 лучших товаров России». В докладе дается сравнение выпускаемой продукции с лучшими отечественными и зарубежными аналогами.

ООО «Пьезоэлектрик» имеет лицензию на право выпуска средств измерений Агентства по техническому регулированию и метрологии РФ и разрешение ФСЭТАН (Госгортехнадзора) РФ на выпуск взрывозащищенного оборудования. Все серийные изделия, являющиеся средствами измерений, внесены в Государственный реестр России.

Создание новых образцов продукции ведется в тесном сотрудничестве с НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, имеющим лицензии на разработку и производство вооружения, военной и космической техники, а также заключение о соответствии производства стандарту менеджмента качества ISO 9001.

Мы заинтересованы в сотрудничестве со всеми организациями, занимающимися проектированием, производством, монтажом и эксплуатацией систем измерений и автоматики энергетического оборудования в различных отраслях промышленности и народного хозяйства.

Список литературы

1. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах Т.3.Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.

2. Средства измерения давления, уровня, расхода, плотности и температуры. Каталог продукции НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ и ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону, 2012 – 90 с.

Датчики температуры с аналоговыми, цифровыми и энергосберегающими выходными сигналами

О.В. Шатуновский

ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: shov@piezo.su

Развитие современной техники в промышленности и в быту идет в направлении «зеленых» технологий, которые требуют применение новых эффективных решений в области снижения энергопотребления. Наряду с этим, появляются приборы с большей производительностью, с новыми сервисными функциями. Вместе с этим, ужесточаются требования к точности измерений и совершенствованию метрологического обеспечения.

На рынке измерительных датчиков и приборов, наиболее востребованы датчики температуры с унифицированными токовыми выходными сигналами. Однако эти датчики имеют значительно энергопотребление, которое может доходить до 0,72Вт при питании 36В и выходном токе 0,02А.

Целью данной работы являлись анализ выходных унифицированных сигналов для датчиков температуры и разработка электронных преобразователей для термометров с этими унифицированными сигналами.

Любой преобразователь физических сигналов состоит из электронного преобразователя, аналогового или цифрового, и драйвера интерфейса. Если электронный преобразователь имеет фиксированное потребление, потребление драйверов интерфейсов зависит от нагрузочной способности и их спецификации. Как показано в работе [1], наименее энергопотребляемыми интерфейсами являются аналоговые вольтовые сигналы 0,4-2 и 0-1В, и цифровые USART и RS485 нетерминированная линия. Диапазон питания датчиков с этими интерфейсами может быть от 2,7 до 5 (12) В, что применимо для батарейного питания.

К электронному преобразователю были предъявлены следующие требования:

- питание ядра преобразователя от вторичного стабилизатора напряжением не более 3В;
- потребление не более 1мА;
- цифровые выходы должны быть согласованы с уровнями ТТЛ и КМОП (3В);

- напряжение питания от источника постоянного тока от 3,2 до 12В;
- время готовности данных при включении не более 300мс.

В результате были созданы электронные преобразователи для термопреобразователей по классификации ГОСТ Р 52931 [2, 3]:

- по метрологическим свойствам	- к рабочим средствам измерения;
- по выходному сигналу	- с выходным сигналом по напряжению от 0,4 до 2 В; - с цифровым выходным сигналом по интерфейсу RS-485; - с цифровым выходным сигналом по интерфейсу USART; - с цифровым выходным сигналом HART и 4-20 мА
- по конструктивному исполнению	- с головкой из прессматериала АГ-4В; - с алюминиевой головкой (все модели); - с головкой из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т
- по устойчивости к климатическим воздействиям	- к группе исполнения С4 (от минус 40 до 85°С)
- по защищенности от воздействия окружающей среды	- к герметичному исполнению со стороны погружаемой части, выдерживающему со стороны защитной арматуры гидравлическое условное давление от 0,4 до 25,0 МПа в зависимости от конструктивного исполнения термопреобразователя. Степень защиты от пыли и воды наружной части защитной арматуры и головки термопреобразователя – не хуже IP54 по ГОСТ 14254.

Преобразователи с аналоговым выходным сигналом 0,4-2В однопредельные, настроены на одну статическую характеристику первичного преобразователя.

Преобразователи с цифровыми выходными сигналами могут быть перенастроены на следующие номинальные статические характеристики по:

ГОСТ Р 8.585 [4] – ТХА, ТХК и др. и
ГОСТ Р 8.625 [5] – П100, Pt100, М100 и др.

Предел допускаемой основной погрешности не белее ±0,15%

Преобразователи с цифровым выходным сигналом линеаризуют выходной сигнал первичных преобразователей, таких как ТХА, П, Pt и др., расчетным методом не более ±0,02%. Внешний вид преобразователей показан на рисунке 1.

Рис. 1 – внешний вид преобразователей с аналоговым и цифровым выходными сигналами.

Преобразователи прошли испытания на утверждение типа, включены в государственный реестр средств измерений РФ и готовятся к серийному выпуску.

Список литературы

1. Шатуновский М.О. «Датчики давления для автономных измерительных систем» //ЮФУ. Сборник тезисов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения», 2012, с.41

2. Термопреобразователи с унифицированными выходными сигналами. // ТУ 4211-066-12150638-2013.

3. Национальный стандарт Российской Федерации, ГОСТ Р 52931-2008, «Приборы контроля и регулирования технологических процессов».

4. Национальный стандарт Российской Федерации, ГОСТ Р 8.585-2001, «Термопары».

5. Национальный стандарт Российской Федерации, ГОСТ Р 8.625-2006, «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля».

Исследование метрологических характеристик вибрационного плотномера 804

О.В. Зацерклянный

ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону, Россия, zov@piezo.su

В вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте некоторого тела (вибратора), взаимодействующего с измеряемой средой [1]. На основе этого принципа разработана конструкция плотномера 804 со следующими характеристиками:

- диапазон измеряемых плотностей жидкости: 0 .. 2000 кг/м^3;
- погрешность измерения ±0,5; 1,0 кг/м^3;
- диапазон рабочих температур: -70º .. +80 ºС;
- диапазон рабочих давлений: от 0 до 16 МПа.

Расширение спектра применений плотномера 804 привело к необходимости как уточнения метрологических характеристик в различных средах, так и существенного их улучшения. Особенности измеряемых сред и условий эксплуатации в нефтедобыче, пищевой промышленности, строительстве и транспорте не всегда позволяли применять плотномер 804 без дополнительных исследований возможности применения. В ходе проведенных исследований изучалась работа плотномера в различных концентрациях соляных растворов, в том числе морской воде, смесях неоднородных жидкостей и жидкостях с вязкостью более 1000 спз. По результатам испытаний были внесены изменения в конструкцию первичного преобразователя, электронную схему и алгоритмы обработки данных.

Целью исследования являлось экспериментальное подтверждение снижение погрешности измерения Плотномера при работе в вязких средах и различных растворах.

В ходе исследования решались следующие задачи:

Определение основной погрешности плотномера в соответствии методикой [2]. Измерения проводились при температуре 20 ±0,1 ^{o}C на жидкостях с плотностями от 680 до 1630 кг/м^3.

- Определение основной погрешности плотномера по методике поверки [2] в неоднородных жидкостных смесях, морской воде и пульпах.
- Исследование метрологических характеристик плотномера в жидкостях с вязкостью от 100 до 10000 спз и выше.

В качестве образцов для испытаний, использовались плотномеры 804 с усовершенствованными схемотехническими характеристиками. Испытания проводились на стенде для проверки плотномера 804 с эталонными (поверочными) жидкостями в нормальных условиях. Температура в термостате поддерживалась с погрешностью ±0,05 ^{o}C в требуемом диапазоне температур. Измерялась плотность чистых однородных жидкостей, водных растворов различных солей и кислот, светлых нефтепродуктов, растительных масел и полиметилсилоксанов.

Измерения плотности жидкости основывались на непосредственном сличении результатов измерений плотности жидкости-компаратора выполненных при одинаковых условиях поверяемым плотномером 804 и эталонным лабораторным плотномером. Погрешность измерения эталонного плотномера составляет ±0,1 кг/м^3.

Результаты измерений основной погрешности плотномеров 804 в жидкостях с различной плотностью и вязкостью приведены в таблице.

Из приведенных данных следует, что:

- Основная погрешность измерения плотности, полученная по стандартной методике поверки плотномеров [2] не превышает ±1 кг/м^3 или примерно $\pm$0,1% ;
- Погрешность измерения плотности водных растворов различных солей и кислот, светлых нефтепродуктов также не превышает ±1 кг/м^3;
- Погрешность измерения плотности вязких жидкостей не превышает ±1 кг/м^3 в диапазоне до 1000 спз, и ±3 кг/м^3 в диапазоне до 10000 спз;

Таблица. Основная погрешность плотномера 804 в различных жидкостях.

Наименование	Плотность, по эталону кг/м^3	Вязкость, спз	Измеренная плотность кг/м^3	Погрешность кг/м^3
Вода [3]	998,2	1,00	998,1	0,1
Бензин	687,9	0,54	688,1	0,2
Спирт	820,2	1,19	820,5	0,3
Хлористый метилен	1324,2	0,46	1324,3	0,1
Перхлорэтилен	1625,2	0,68	1625,5	0,3
Раствор вода+NaCl	1027,5	~1	1027,5	0,0
Керосин	826,4	~1,4	826,5	0,1
ПМС-5	921,5	5	921,8	0,3
ПМС-20	945,3	20	945,5	0,2
ПМС-100	961,7	100	961,9	0,2
ПМС-200	963,5	200	963,8	0,3
ПМС-1000	966,4	1000	967,0	0,4
ПМС-10000	971	10000	973,5	2,5

Список литературы

1. Зацерклянный О.В. Вибрационные плотномеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин. // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. 2011 - №2
2. Плотномеры 804, Методика поверки. МП № 2302-051-2010
3. Физические величины: Справочник/ А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. -1232 с.

О температурных напряжениях в деталях гидроакустических антенн

О.М. Богуш, Э.М. Пикалев

Факультет высоких технологий ЮФУ

г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: piezo@inbox.ru

В работе рассматриваются температурные напряжения в деталях гидроакустических антенн, которые возникают в элементах конструкции при их изготовлении и испытаниях и могут приводить к разрушению изделия.

Антенна представляет собой пакет, содержащий пьезоэлемент из керамики ЦТБС-3, размещенный между двумя прокладками из стали, плюс дополнительно протектор из алюминия. Причем сборка пакета происходит с помощью клея с температурой полимеризации 65^{o}C. Антенны должны выдерживать испытание на транспортирование при температурах $\pm$50^{o}C.

Нами было проведено исследование температурных напряжений в деталях антенны с помощью математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и программного пакета ANSYS [1].

Геометрическая модель антенны показана на рис.1. Материалы слоев сверху вниз – алюминиевый сплав Д16, сталь 35, пьезокерамика ЦТБС-3, сталь 35, Считаем антенну механически свободной от внешних сил и не закрепленной.

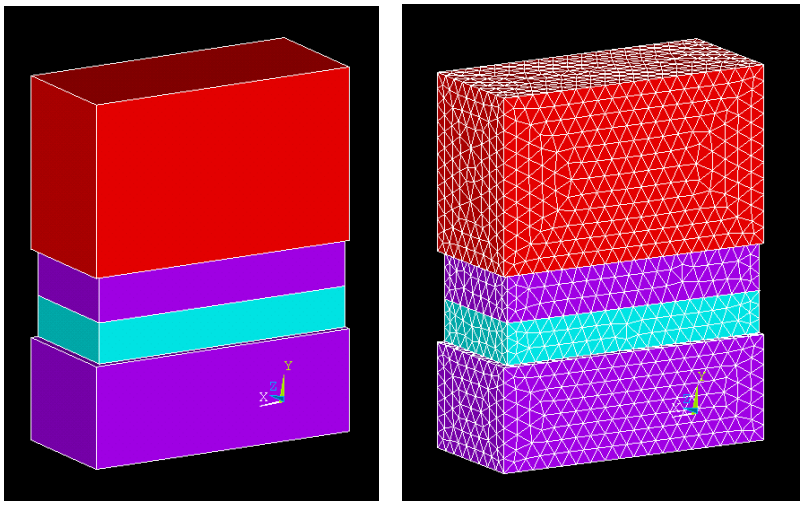


Рис. 1. Геометрическая и конечноэлементная модели антенны

Температура сборки антенны принимается равной 65ºС, поскольку детали соединяются между собой с помощью клея при этой температуре. При более низких температурах возникают термические напряжения.

Целью последующих расчетов была оценка действующих температурных напряжений в элементах конструкции антенны и сравнение их с пределами прочности соответствующих материалов.

Прочность металлов определяется интенсивностью механических напряжений S_{int}. Прочность керамических материалов определяется главными значениями напряжений: наибольшим по абсолютной величине сжимающим и наибольшим растягивающим напряжениями [1].

Расчеты показали, что наибольшая интенсивность напряжений в деталях из металлов достигается в слое стали на границе с алюминиевым сплавом, в углу. При T = - 50ºС максимальное значение S_{int} = 381 МПа, что лежит в допустимых пределах для металлов.

Главное значение планарной компоненты напряжений в керамике S1 при T = -50ºС содержит максимальное растягивающее напряжение $S1_{max} = S^{+}$ = 181 МПа на вертикальном ребре пьезокерамического слоя. Последнее значение почти на порядок превышает предел прочности керамики на растяжение (21.6 МПа).

Далее аналогичным путем исследовались модели антенны, в которых варьировались различные конструктивные и технологические параметры:

а) введены два слоя из титанового сплава ВТ1-0 с двух сторон пьезокерамического слоя, который имеет промежуточные значения КЛТР между пьезокерамикой и сталью;

б) скруглены ребра пьезокерамического слоя, где наблюдается концентрация механических напряжений;.

в) введены разрезы в слое алюминиевого сплава (протектора);

г) исследовано влияние тонких клеевых прослоек между деталями.

Расчеты показали, что конструктивные приемы, указанные в п.п. а) – в) не приводят к существенному снижению температурных напряжений в пьезокерамике.

При учете влияния клеевой прослойки напряжения S^+ примерно линейно снижаются с ростом толщины клея, причем это снижение более значительно для растягивающих напряжений S^+, рис.2. При толщине клея 100 мкм растягивающие напряжения в керамике снижаются почти вдвое. Однако, этого еще не достаточно для обеспечения прочности конструкции при температуре минус 50°С.

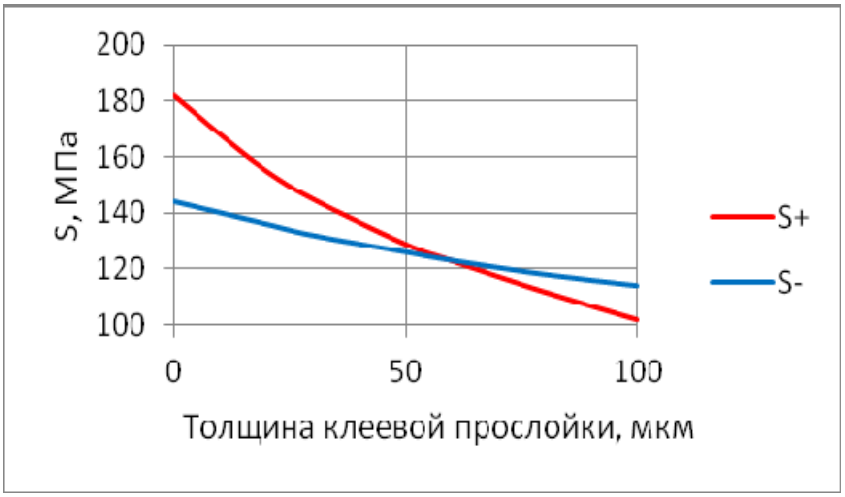


Рис. 4. Снижение максимальных растягивающих (S^+) и сжимающих (S^-) напряжений в керамике за счет клеевых прослоек

Другая возможность уменьшения температурных напряжений – снижение температуры сборки антенны (полимеризации клея) на 20-30°С [1]. Именно столько не хватало базовой конструкции антенны для соответствия транспортным испытаниям при минус 50°С.

В результате выполненных расчетов были сформулированы предложения по повышению технологичности и надежности гидроакустических антенн в процессе производства и эксплуатации, которые подтвердились на практике.

Список литературы

1. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах Т.3.Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.

Обзор уровнемеров для криогенных жидкостей и сжиженных газов

А.О. Шатуновский

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Уровнемер — прибор, предназначенный для определения уровня жидкости или сыпучих веществ в открытых и закрытых сосудах, резервуарах, хранилищах и других ёмкостях.

В последнее время актуален вопрос измерения уровня сжиженного газа при его транспортировке морским или железнодорожным транспортом. Сжиженный газ имеет низкую температуру и/или находится под высоким давлением в транспортировочной емкости. Следовательно, необходимо внедрять в емкость измерительного устройства.

Целью настоящей работы является анализ состояния и тенденций развития методов и средств измерения уровня криогенных жидкостей и сжиженных газов в России и за рубежом.

К наиболее распространённым методам измерения уровня, которые позволяют преобразовать значение уровня в электрическую величину и передавать её значение в АСУТП относятся: радарный, поплавковый, ультразвуковой, магнитострикционный, см. таблицу.

Уровнемеры российских производителей представлены в основном приборами на основе поплавкового и ультразвукового принципа. Поплавковые уровнемеры в связи с конструктивными особенностями используются при температуре не ниже минус 40 градусов по Цельсию, обладают основной погрешностью порядка $\pm$ 2-5 мм. Не используются с пузырящимися и пенящими жидкостями.

В отличии от них ультразвуковые уровнемеры применяются для криогенных сред, с температурой до минус 250 градусов по Цельсию. Турбулентный поток, пузырьки воздуха, вибрации системы не влияют на функциональные показатели ультразвуковых датчиков уровня.

Таблица. Основные методы измерения уровня жидких сред.

Название	Производитель	Страна/ Город	Принцип	Диапазон измерений мм	Погрешн. +-,мм	Рабочее давление не более	Температура измеряемой среды, °С
VEGAPULS 62	VEGA	UK	Радар	0…35 000	2	16 МПа	-200 +450
976 SmartRadar	Honeywell	Европа	Радар	50…30 000	3	---	---
Levelflex M FMP45	Endress+Hauser	Швейцария	Радар	50…35 000	3	400 бар	-200 +400
Level Plus M-Series Model	MTS Sensors	USA	Магн.стрикционный	0… 12192	---	19 бар	-40 +125
СЖУ-1	ООО "АИС - НН "	Россия/ Нижний Новгород	Ультразвук	100 ... 4 000	10	20 МПа	-194 +400
ДУЕ-1В-0	Старорусприбор	Россия/ Нижний Новгород	Ультразвук	100 …6 000	2	0,6 МПа	-256 + 60
УЗС-М4	Газовик	Россия/ Саратов	Ультразвук	0…6 000	4	16 МПа	---
УЗИ-0.8*	ТС Сенсор	Россия/ Москва	Ультразвук	100 …800	0,5 %	---	-40 ... +80
СУГ-М	Ризур	Россия/ Рязань	Поплавковый	0…10 000	2	10 МПа	-50 +120
ДУУ-4	Химстальконн	Россия/ Саратов	Поплавковый	50 …25 000	5	---	-45 +200

Основным методом измерения уровня среди иностранных производителей является радарный метод. Уровнемеры использующие радарный метод не соприкасаются с измеряемой средой, следовательно не испытывают влияния температуры и давления измеряемой среды, обладает широким диапазоном измерения, высокой точностью, используются в агрессивных средах. Уровнемеры радарного типа по большинству характеристик (диапазон измерений: 0…35 м, погрешность +-3мм, температура измеряемой среды -200…400 °С) являются наиболее универсальными.

Однако недостатками радарным уровнемеров являются сложность монтажа и настройки в герметичной емкости, и высокая стоимость. Для

измерения уровня при транспортировке газового конденсата железнодорожный или морским транспортом такой тип датчиков не подходит. Радарный метод предполагает положение уровнемера внутри емкости, что нарушает условие неинвазивности и требует значительных затрат для внедрения прибора в емкость с криогенной жидкостью.

Ультразвуковой метод лучше подходит для неивазивного измерения уровня, так как ультразвуковые волны могут проникать через стенки резервуаров не повреждая их, и возвращаться с изменившимися характеристиками, зависящими от уровня измеряемой среды.

Список литературы

1. Бармин А. Радарные системы контроля уровня // Современные технологии автоматизации. 2002.

2. Карандеев К. Б., Гриневич Ф. Б., Новик А. И. Емкостные самокомпенсированные уровнемеры. — (Библиотека по автоматике, вып. 195). — М.: Энергия, 1966.

3. Википедия, «Уровнемер», 2013г. http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%80

Методы определения пьезомодуля пьезокерамических материалов по параметрам эквивалентной электрической схемы пьезоэлемента

В.Л. Земляков

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Пьезокерамические элементы (ПКЭ) – тела простой геометрической формы, изготовленные из пьезокерамических материалов (ПКМ). На основе ПКЭ изготавливают пьезопреобразователи и различные средства, широко применяемые в науке и технике – радиоэлектронике, виброметрии, ультразвуковой технике и т. д.

В настоящее время, как для исследовательских целей, так и для решения практических задач, связанных с диагностикой ПКЭ, широко

применяют одни и те же методы испытаний в динамическом режиме. Для реализации этих методов используют характерные точки на частотной характеристике проводимости в области резонанса.

Наиболее распространенными методами, реализующими динамический режим измерений, являются метод «резонанса–антирезонанса» [1] и GBW–метод [2], являющийся развитием метода круговых диаграмм для комплексной проводимости.

Метод «резонанса–антирезонанса» регламентирован стандартами и требует, например, для определения пьезомодуля первичных измерений в трех частотных областях: область низких частот (100 Гц или 1 кГц), область частот механического резонанса ПКЭ, область частот электромеханического резонанса (антирезонанса). Применение GBW–метода связано с измерением частотной зависимости активной составляющей проводимости, определением по характерным точкам ширины резонансной кривой на уровне половинной мощности (0,5 от максимального значения) и проводимости на частоте резонанса с последующими расчетами по определенным формулам.

Учитывая, что количество методов испытаний ПКЭ в динамическом режиме ограничено, возможность выбора эффективного метода в зависимости от специфики конкретной задачи отсутствует.

Перенос исследовательских методов в область диагностики приводит к тому, что процедура испытаний становится неэффективной, а средства измерений сложны в реализации, не достаточно быстродействующие и не позволяют автоматически сразу после измерений формировать на выходе электрический сигнал, амплитуда которого была бы пропорциональна, например, величине пьезомодуля, что позволит автоматически управлять исполнительными устройствами разбраковки.

Таким образом, актуальной является задача разработки новых методов определения пьезомодуля ПКМ, одни из которых будут устранять недостатки известных методов, другие станут основой создания автоматизированных средств измерений, эффективно решающих практические задачи.

Представленные в работе результаты позволяют сформировать новый подход к определению пьезомодуля. Этот подход позволяет сформулировать, с одной стороны, аналоги уже известных методов (применяемые в них расчетные формулы можно рассматривать как частный случай нового подхода) и методы, представляющие собой развитие известных методов, с другой стороны – новые методы определения величины пьезомодуля.

Представление ПКЭ в виде эквивалентных схем

На практике реальный ПКЭ на определенной моде колебаний часто заменяют его эквивалентной электромеханической схемой с сосредоточенными параметрами (рис. 1, *а*). Эта схема содержит трансформатор с коэффициентом электромеханической трансформации n_e, связывающий механическую и электрическую стороны. Этот коэффициент зависит от пьезоэлектрических и упругих свойств материала ПКЭ и его формы.

Приведенная к электрической стороне эквивалентная схема ПКЭ показана на рис. 1, *б*. Емкость $C = c_э\, n_e^2$, индуктивность $L = m_э / n_e^2$ и активное сопротивление $R = r_{мп} / n_e^2$ характеризуют динамические свойства ПКЭ и поэтому называют динамическими.

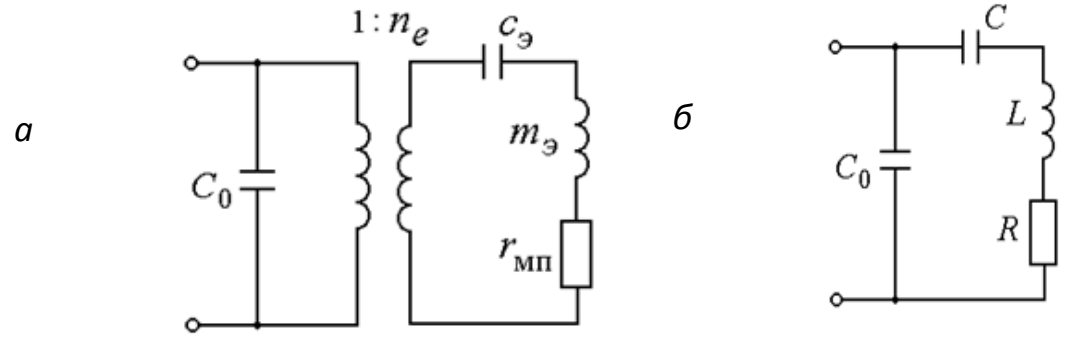


Рис. 1. Эквивалентные электромеханическая и электрическая схемы ПКЭ

В литературе, например [1], можно найти связь между константами (параметрами) пьезокерамики и параметрами элементов эквивалентной

схемы ПКЭ. Пример таких данных для стержня массой m, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Связь между константами пьезокерамики и параметрами элементов эквивалентной схемы ПКЭ в форме стержня

C_0	n_e	L	C
$\frac{wl}{t}\varepsilon_{33}^{T}(1-k_{31}^2)$	$\frac{wd_{31}}{S_{11}^{E}}$	$\frac{m}{8n_s^2}$	$\frac{8n_s^2 S_{11}^{E} t}{\pi^2 wl}$

Определения пьезомодуля пьезокерамических материалов по параметрам эквивалентной электрической схемы пьезоэлемента

Возьмем за основу связь пьезомодуля d_{ij} с коэффициентом электромеханической трансформации n_e.

Учитывая связь параметров эквивалентной электрической схемы ПКЭ с коэффициентом электромеханической трансформации, в частности, с динамической индуктивностью и емкостью, в [3] получена формула:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij}\frac{1}{\omega_p^2 L} = \beta_{ij} C, \qquad (1)$$

где β_{ij} – некоторая константа, зависящая от геометрии и размеров ПКЭ, а также компонент упругой податливости пьезокерамического материала S_{ij}^{E}.

Например, для стержня и столбика соответственно выражения для β_{ij} поперечной и продольной мод колебаний имеют вид:

$$\beta_{31}^{c} = \frac{\pi^2}{8}\frac{t}{wl} S_{11}^{\mathrm{E}}, \quad \beta_{33}^{c} = \frac{\pi^2}{8}\frac{l}{wt} S_{33}^{\mathrm{E}}.$$

Для тонкого кольца и шайбы константы β_{ij} будут иметь вид:

$$\beta_{31}^{k} = \frac{R-r}{\pi(R+r)\,w} S_{11}^{\mathrm{E}}, \quad \beta_{31}^{ш} = \frac{t}{\pi(R^2-r^2)} S_{11}^{\mathrm{E}}.$$

В последних формулах в числителе расстояние между электродами, в знаменателе – площадь электродов.

Как следует из (1), для ПКЭ заданной формы и размеров можно определить пьезомодуль материала, если измерить каким-либо методом один из динамических параметров (L или C) его эквивалентной электрической схемы. Это создает условия для разработки большого числа методов определения пьезомодуля благодаря хорошо разработанной теории линейных электрических цепей.

Соотношения, используемые и в методе «резонанса–антирезонанса», и в GBW–методе, являются частным случаем формулы (1). Покажем это на примере преобразований (сверху вниз) известных формул метода «резонанса–антирезонанса», имеющихся, например, в справочнике [1], для ПКЭ в виде стержня (рис. 2).

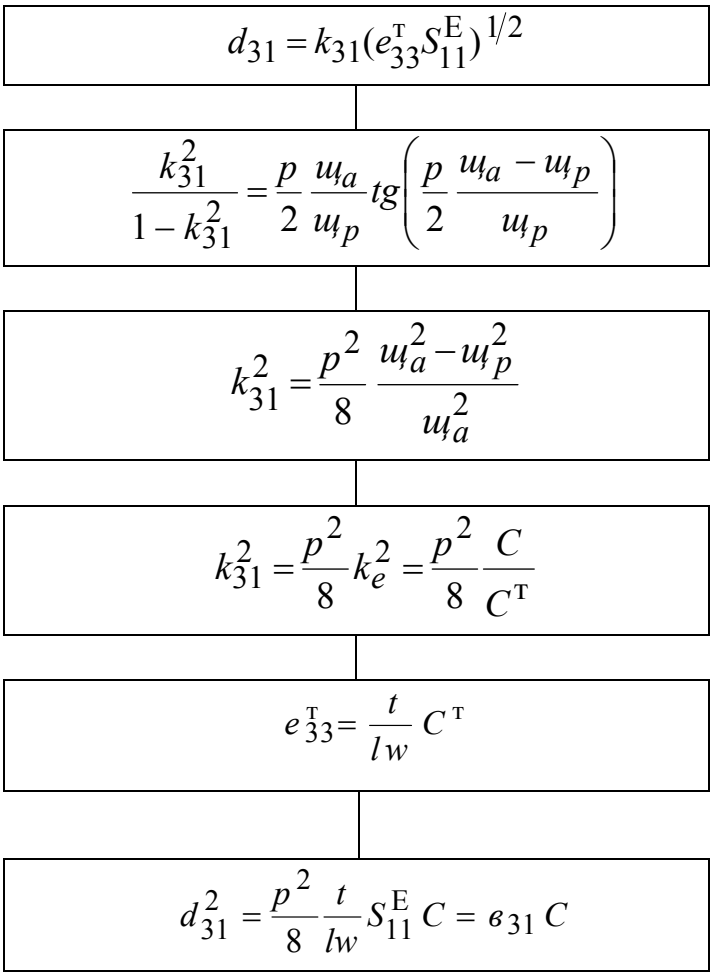


Рис. 2. Преобразование формул метода «резонанса-антирезонанса»

Используя известные, например, [4] соотношения для определения

динамической емкости можно записать следующие формулы для определения пьезомодуля:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{C^{\text{т}}(\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2}, \tag{2}$$

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{\Delta\omega}{\omega_p^2 R}, \tag{3}$$

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} |Y_m| \frac{\Delta\omega_Y}{\omega_p^2}, \tag{4}$$

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{C^{\text{т}}}{r_c + 1}, \tag{5}$$

$$d_{ij}^2 = \frac{2}{\pi} \beta_{ij} \int_0^\infty \frac{G(\omega)}{\omega_p^2} d\omega, \tag{6}$$

Формула (2) аналогична применяемой в методе «резонанса–антирезонанса», а формула, аналогичная (3), применяется в GBW–методе, который, как и метод «резонанса–антирезонанса» предполагает решение электромеханической задачи об одномерных колебаниях ПКЭ.

Это подтверждает факт согласованности результатов, получаемых либо путем решения электромеханической задачи, либо путем привлечения эквивалентной электрической схемы для установления связи между пьезомодулем и частотными характеристиками ПКЭ.

Формула (4) позволяют сформулировать метод определения пьезомодуля по ширине резонансной кривой модуля проводимости на уровне 0,7. Согласно этому методу, все измерения проводятся по модулю проводимости в области механического резонанса ПКЭ.

Рассмотренный метод, как и метод «резонанса–антирезонанса», не учитывает механические потери в пьезокерамическом материале, т. е. применим только для ПКЭ с высокой добротностью. Учесть механические потери и расширить возможности применения метода «резонанса–антирезонанса» для ПКЭ с невысокой добротностью позволит метод, опирающийся на формулу (5). Для реализации метода, использующего расчетную формулу (5), необходимо вначале выполнить те же первичные измерения, что и в методе «резонанса–антирезонанса», затем измерить

сами значения модуля проводимости на частотах максимума и минимума, определить емкостное отношение, а пьезомодуль определить по формуле (5).

Опираясь на формулу (6), можно сформулировать метод определения пьезомодуля через площадь под кривой активной составляющей проводимости (интеграл). В результате применения метода за одно качание частоты в области механического резонанса ПКЭ формируется напряжение постоянного уровня, равное площади под кривой активной составляющей проводимости и пропорциональное квадрату пьезомодуля. Это напряжение позволяет автоматически управлять исполнительными механизмами для разбраковки ПКЭ.

Таким образом, в работе сформулирован новый подход к определению пьезомодуля, в соответствии с которым модель ПКЭ в виде эквивалентной электрической схемы используется как связующее звено между пьезомодулем пьезокерамического материала и частотными или временными характеристиками ПКЭ: любой метод определения емкости или индуктивности динамической ветви эквивалентной электрической схемы ПКЭ является методом определения пьезомодуля. Этот подход создает условия для разработки большого числа методов определения пьезомодуля ПКМ благодаря возможности использовать хорошо разработанный аппарат теории линейных электрических цепей для определения параметров элементов динамической ветви эквивалентной электрической схемы ПКЭ.

Список литературы

1. Пьезокерамические преобразователи: справочник / под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 356 с.
2. Hollang R., Eernisse E. Accurate measurement of coefficient in ferroelectric ceramic // IEEE transact. on sonics and ultrasonics, 1969. V. SU–16. № 4. P. 173–181.
3. Земляков В. В., Земляков В. Л. Новый подход к измерению пьезомодуля пьезокерамических материалов в динамическом режиме // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 52−55.
4. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с.

Программно-аппаратный комплекс для исследования импульсного метода определения пьезомодуля

С.Н. Галий, В.Л. Земляков

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

В последнее время получил распространение импульсный метод определения пьезомодуля по известным параметрам элементов эквивалентной электрической схемы пьезокерамического элемента (ПКЭ) [1], когда на него воздействуют радиоимпульсом с прямоугольной огибающей и частотой заполнения, равной частоте его механического резонанса, и анализируют переходной процесс.

Суть метода состоит в следующем. Рассмотрим форму переходного процесса как амплитудно–модулированный (АМ) сигнал со стопроцентной модуляцией: несущее колебание частоты ω_p модулируется по амплитуде импульсом экспоненциальной формы.

Если к такому АМ сигналу применить операцию амплитудного линейного детектирования, то сигнал на выходе детектора будет повторять по форме огибающую: будем иметь экспоненциальный импульс тока, с амплитудой в π раз меньше амплитуды тока в начале переходного процесса.

Таким образом, в результате детектирования форма тока на выходе детектора будет описываться формулой $i_\partial(t) = \dfrac{U_0}{\pi R} e^{-\alpha t}$.

Если теперь выполнить операцию дифференцирования этого сигнала, а за начало отсчета взять момент начала переходного процесса $t = 0$, то величина скорости изменения тока по огибающей в начале переходного процесса будет определяться формулой $-\left.\dfrac{di_\partial(t)}{dt}\right|_{t=0} = \dfrac{U_0}{2\pi L}$.

Из последней формулы следует, что

$$\frac{1}{L} = 2\pi \frac{1}{U_0}\left(-\left.\frac{di_\partial(t)}{dt}\right|_{t=0}\right). \qquad (1)$$

где L – динамическая индуктивность, U_0 – амплитуда напряжения радиоимпульса.

Из формулы (1) следует, что при возбуждении ПКЭ радиоимпульсом с частотой синусоидального заполнения, совпадающей с частотой механического резонанса, обратная величина динамической индуктивности, а, следовательно, и величина квадрата пьезомодуля пропорциональна скорости изменения тока в начале переходного процесса и определяется формулой [1]

$$d_{ij}^2 = \frac{2\pi\beta_{ij}}{\omega_p^2}\frac{1}{U_0}\left(-\frac{di_\partial(t)}{dt}\bigg|_{t=0}\right). \qquad (2)$$

Для исследования импульсного метода был разработан программно-аппаратный комплекс на основе LabVIEW 8.6.

На рис.1 представлено окно, в котором видны возбуждающий радиоимпульс, переходной процесс, огибающая тока переходного процесса. Внизу располагается результат дифференцирование тока, по которому, используя «курсорный» инструмент определяется максимум производной. В результате получаем все необходимые величины, используя которые, можно рассчитать динамическую индуктивность по формуле (1).

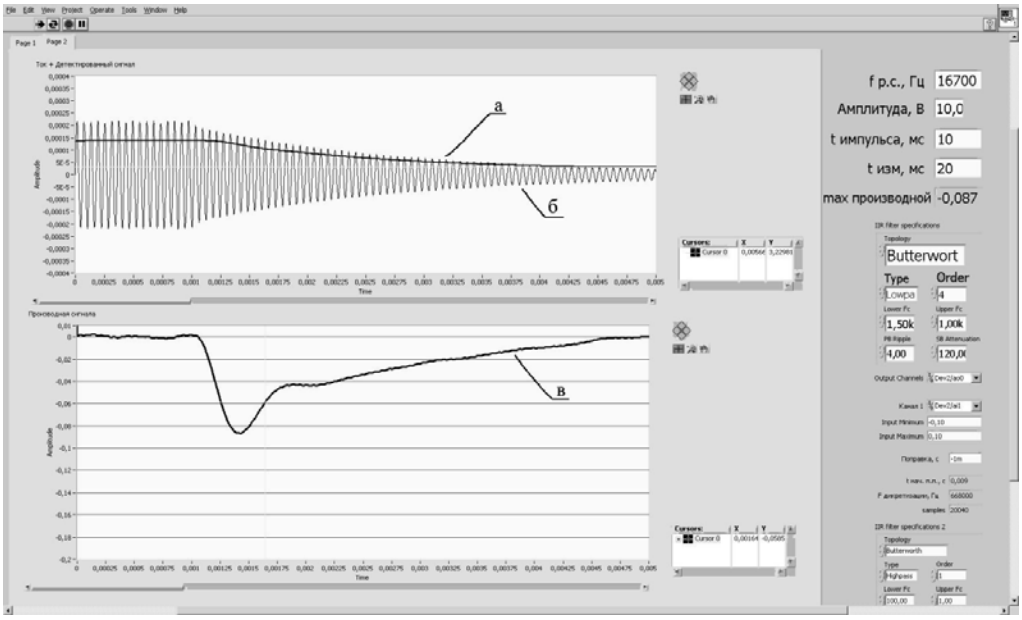


Рис. 1. Окно программы исследования импульсного метода

В системе реализующей импульсный метод измерения пьезомодуля присутствует ФНЧ, требующий дополнительной настройки параметров: существует проблема правильного выбора параметров ФНЧ (F_{CP}, порядок и тип фильтра).

Компьютерное моделирование с различными типами и параметрами ФНЧ (рис. 2), подтверждает правильность критерия выбора параметров ФНЧ, предложенного в [1].

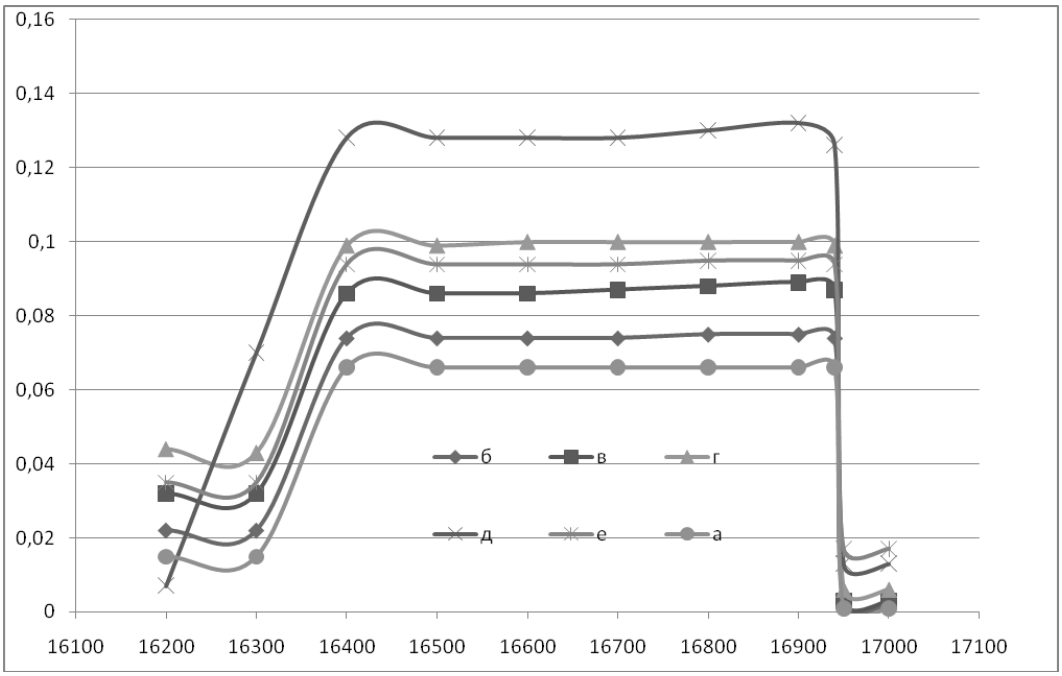


Рис. 2. Зависимость результата измерения от частоты синусоидального заполнения радиоимпульса при различных настройках фильтра.

На рис. 2: а – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 1 кГц 4 порядок, б – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 1,5 кГц 4 порядок, в – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 2 кГц 4 порядок, г – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 3 кГц 4 порядок, д – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 1 кГц 2 порядок, е – ФНЧ Баттерворта F_{CP}= 0,7 кГц 4 порядок.

Для испытуемого ПКЭ наиболее оптимальной настройкой фильтра является ФНЧ Баттерворта 4 порядка, F_{CP}= 1,5 кГц (Рис.2, б).

Список литературы

1. Земляков В.Л. Измерение пьезомодуля при импульсном возбуждении пьезокерамических элементов // Измерительная техника. 2006. № 10. С. 71–72.

Приближенное определение пьезомодуля на образцах пьезоэлементов в форме диска

В.Л. Земляков, С.Н. Ключников

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Определение параметров пьезокерамических материалов в динамическом режиме осуществляется на образцах элементов определенной формы и размеров, регламентированных стандартом [1, 2]. Чаще всего для этих целей используют пьезокерамические элементы (ПКЭ) в форме столбика, стержня и диска. Для первых двух типов ПКЭ достаточно просто. Для элементов в форме диска ситуация более сложная, поскольку необходимо дополнительно проводить измерения частоты первого обертона f_{p1}, затем рассчитывать коэффициент Пуассона σ, а также находить наименьший (первый) корень частотного уравнения, содержащего функции Бесселя нулевого и первого порядков [2]. Формула для расчетов получается громоздкой и не удобной для инженерных расчетов. Возможность определения пьезомодуля пьезокерамического материала по приближенным формулам рассматривается в данной работе.

Будем использовать следующие исходные соотношения [3]:

$$\sigma = \frac{5{,}33 - 1{,}86(f_{p1}/f_p)}{0{,}633(f_{p1}/f_p) - 0{,}2} \tag{1}$$

$$S_{11}^E = \frac{\eta^2}{\rho(\pi d f_p)^2(1-\sigma^2)} \tag{2}$$

$$K_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - 1 - \sigma^2}{2(1+\sigma)} \frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2}} \tag{3}$$

$$d_{31} = k_p \left(\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} S_{11}^E (1-\sigma)/2\right)^{1/2} \tag{4}$$

где S_{11}^E – упругая податливость, ρ - плотность, d – диаметр диска, η – наименьший положительный корень частотного уравнения, k_p – планарный коэффициент электромеханической связи пьезокерамического материала, d_{31} – пьезомодуль, $\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}}$ – диэлектрическая проницаемость .

С учетом выражений (2) и (3), преобразуем (4) к виду:

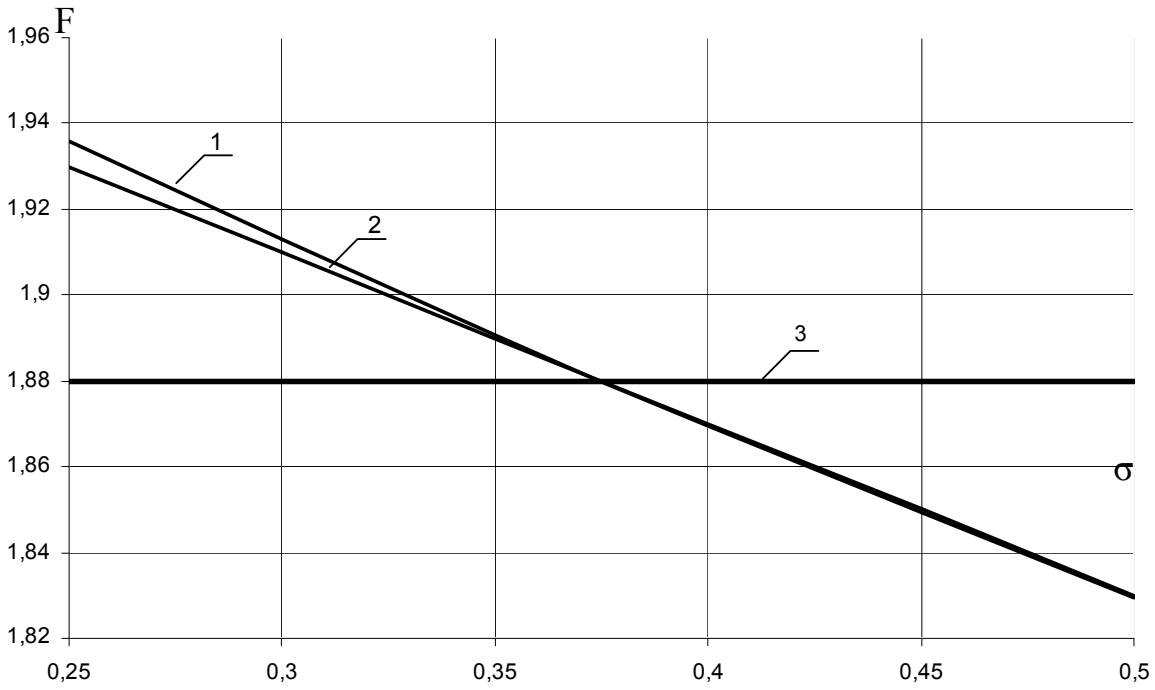
$$d_{31}^2 = \left(\frac{\eta^2 - 1 - \sigma^2}{2(1+\sigma)} \frac{1-\sigma}{2} \frac{\eta^2}{(1-\sigma^2)} \right) \cdot \varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} \frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2} \frac{1}{\rho(\pi d f_p)^2} \qquad (5)$$

обозначим

$$F = \frac{\eta^2 - 1 - \sigma^2}{2(1+\sigma)} \frac{1-\sigma}{2} \frac{\eta^2}{(1-\sigma^2)} \qquad (6)$$

Видно, что расчеты по (5) являются сложными и неудобными для практического использования. Поэтому представляет интерес более простая аналитическая запись для d_{31}. Ее можно получить упростив выражение (6).

Сформулированная задача, решалась путем графического построения зависимости F от σ. Затем, методом наименьших квадратов выполнялась аппроксимация данных. График зависимости F от σ, построенный по (6) показан на рис.1 линией 1 и по внешнему виду близок к прямой.



1 – формула (6), 2 – формула (7), 3 – F = 1,88.

Рис.1 Зависимость F от σ

Поэтому для аппроксимации использовалась функция вида $F = a\sigma + b$ и была получена следующая аппроксимирующая функция:

$$F = -0{,}4\sigma + 2{,}03 \qquad (7)$$

Результаты расчетов по формуле (7) приведены на рис.1 линией 2 и практически совпадают линией 1.

Подстановка (7) вместо (6) дает следующую формулу:

$$d_{31}^2 = (-0{,}4\sigma + 2{,}03) \cdot \varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} \cdot \frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2} \cdot \frac{}{\rho(\pi d f_p)^2} \qquad (8)$$

Поскольку функция F меняется незначительно, то ее можно приближенно заменить константой, равной 1,88 (линия 3 на рис.1). Тогда формула (5) будет иметь простой вид:

$$d_{31}^2 = 1{,}88 \cdot \varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} \frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2} \frac{1}{\rho(\pi d f_p)^2} \qquad (9)$$

Последняя формула позволяет сделать вывод о том, что в практике измерений пьезомодуля иногда можно вообще отказаться от измерений частоты первого обертона f_{p1} и определения σ, а расчет d_{31} вести по приближенной формуле (9), в которой коэффициент 1,18 соответствует среднему значению при изменении σ от 0,24 до 0,5.

Список литературы

1. ГОСТ 12370 - 80. Материалы пьезокерамические. Методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1980.

2. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.

3. Смажевская Е.Г., Фельдман И.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971, 182с.

Разработка программно-аппаратных комплексов на основе LabVIEW для исследования пьезокерамических элементов

Т.А. Бодрикова, С.Н. Ключников

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

В пьезоэлектрическом приборостроении в процессе производства и в исследовательских целях часто приходится определять параметры пьезокерамических элементов (ПКЭ). Для этого необходимо проводить измерения частотных характеристик ПКЭ и проводить дальнейшие расчеты.

На базе аппаратно-программного комплекса LabView удобно выполнять реализацию различных методов определения параметров ПКЭ. Среду графического программирования LabVIEW, широко используют технические специалисты, инженеры, преподаватели и ученые по всему миру для быстрого создания комплексных приложений в задачах измерения, тестирования, управления, автоматизации научного эксперимента и образования [1].

Применительно к задаче нахождения параметров ПКЭ, создание програмно-аппаратных комплексов можно разделить на следующие этапы:

- генерирование сигнала воздействия;
- подача сигнала на исследуемый образец;
- измерение падения напряжения на нагрузочном сопротивлении и ПКЭ;
- обработка массива полученных данных.

Для исследования частотных характеристик ПКЭ в пьезоэлектрическом приборостроении часто используется сигнал с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ). В среде графического программирования LabView, ЛЧМ удобно реализовать с помощью стандартного блока генерации сигнала синусоидальной формы, частота которого в цикле увеличивается с определенным шагом по частоте. Процесс нахождения параметров ПКЭ часто требует контролировать разность фаз между сигналом воздействия и сигналом, который снимается с нагрузочного сопротивления, для этого необходимо синхронизировать порты вывода и ввода во времени. Для выполнения синхронизации в среде графического программирования LabView применяется целая группа функциональных блоков, использование которых варьируется в зависимости от способа сбора данных с ПКЭ. На рис. 1 показан пример

блок-схемы отвечающей за настройку и синхронизацию портов вывода и ввода сигнала.

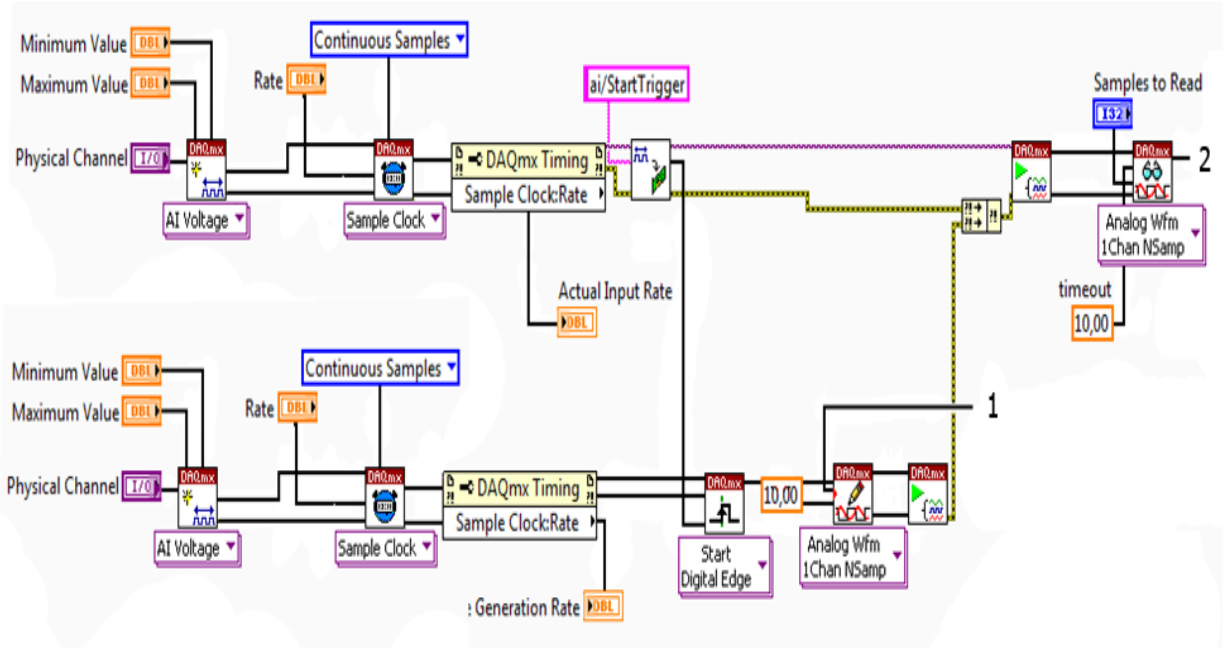


Рис. 1 Блок-схема синхронного сбора данных с ПКЭ
(1 – точка подачи сигнала воздействия, 2 – вывод полученного на входе сигнала.)

Среда графического программирования LabView устроена таким образом, что действие любого функционального блока входящего в состав устройства будет осуществляться только тогда, когда определены все его входы. Это дает возможность создавать алгоритмы, позволяющие в процессе сбора данных анализировать принятые сигналы и в автоматическом режиме корректировать сигнал воздействия.

Совокупность рассмотренных и ряда других возможностей LabView позволяет создавать быстродействующие устройства контроля параметров ПКЭ и исследовательские комплексы в пьезоэлектрическом приборостроении.

Список литературы

1. Виноградова Н.А., Листратов Я.И., Свиридов Е.В. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW // М. Издательство МЭИ, 2005. – 50 с..
2. Галий С. Н., Копелиович М. Б. Программное и аппаратное обеспечение National Instruments: разработка инженерных приложений // Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 170 с.

Метод определения параметров пьезорезонаторов для построения быстродействующих устройств их разбраковки

С.Н. Ключников

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

В работах [1,2] рассматривается возможность определения добротности пьезокерамических элементов по результатам измерения частотной характеристики активной составляющей проводимости и ее производной на одной частоте, соответствующей максимуму производной. Выражение для определения добротности имеет вид:

$$Q_{\text{м}} = 0{,}58\,\frac{\omega_{\max} G^{|}(\omega_{\max})}{G(\omega_{\max})}\,. \qquad (1)$$

Если определять пьезомодуль пьезоматериала по формуле

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} C \text{ , где } C = \frac{1}{\omega_p R Q} \approx 2{,}3 \cdot \frac{1}{\omega_{\max}^2} \cdot \frac{G(\omega_{\max})}{\dfrac{G^{|}(\omega_{\max})}{G(\omega_{\max})}}\,,$$

то можно находить квадрат пьезомодуля с помощью выражения [3]:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \cdot 2{,}3 \cdot \frac{1}{\omega_{\max}^2} \cdot \frac{G(\omega_{\max})}{\dfrac{G^{|}(\omega_{\max})}{G(\omega_{\max})}}\,. \qquad (2)$$

Опираясь на формулы (1),(2) сформулируем метод определения параметров пьезорезонаторов, который заключается в следующем.

Возбуждают колебания пьезорезонатора в области резонанса путем воздействия на него электрическим синусоидальным напряжением с линейно-частотной модуляцией, с одновременным выделением активной составляющей проводимости и ее дифференцированием, измеряют частоту, соответствующую максимальному значению производной от активной составляющей проводимости, максимальное значение этой производной, значение активной составляющей проводимости на частоте максимума производной, а вычисление добротности и пьезомодуля осуществляют в соответствии с выражениями (1) и (2).

На основании описанного метода удобно создавать быстродействующие устройства для разбраковки пьезорезонаторов в процессе серийного производства. Структурная схема такого устройства, приведена на рис. 1.

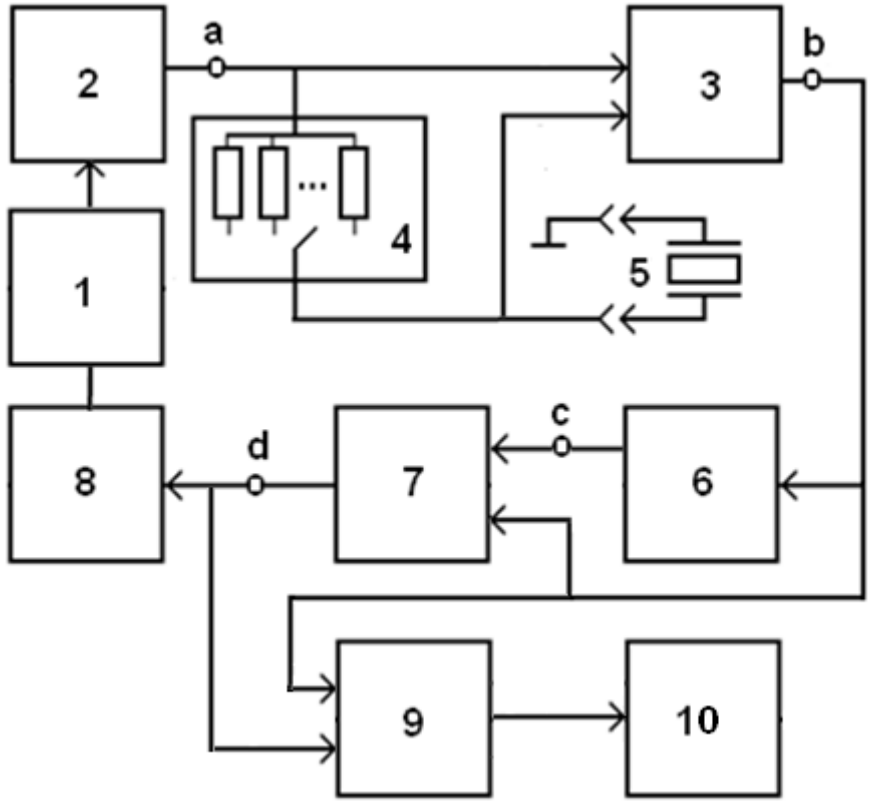


Рис. 1 Структурная схема прибора для контроля добротности и величины пьезомодуля материала пьезорезонаторов.
(1 – генератор качающейся частоты (ГКЧ), 2 – усилитель мощности, 3 – синхронный детектор, 4 – токовый резистор, 5 – ПКЭ, 6 – дифференциатор, 7,9 – делитель,
8 – индикатор величины добротности, 10 – индикатор величины пьезомодуля)

Усилитель мощности на выходе ГКЧ играет роль буфера, разделяющего источник сигнала и цепочку из последовательно включенных токового резистора и ПКЭ. Синхронный детектор формирует на своем выходе активную составляющую проводимости. Дифференциатор позволяет сформировать производную от активной составляющей проводимости. На выходе делителя формируется итоговый электрический сигнал,

соответствующий отношению производной к активной составляющей проводимости. Этот сигнал несет информацию о добротности ПКЭ и управляет работой индикатора величины добротности. После подключения ПКЭ, устанавливается на ГКЧ время качания частоты и границы частотного диапазона, в которых находится область резонанса ПКЭ. Запускается качание частоты на выходе ГКЧ. На выходе синхронного детектора формируется частотная характеристика активной составляющей проводимости. Одновременно на выходе дифференциатора формируется производная от активной составляющей проводимости. Одновременно на выходе делителя формируется электрический сигнал, равный отношению производной к активной составляющей проводимости, который поступает на вход индикатора величины добротности. По мере возрастания частоты синусоидального сигнала с ГКЧ, возрастает амплитуда сигнала на выходе делителя. При достижении максимального значения сигнала на выходе делителя индикаторы величины добротности и пьезомодуля фиксируют значения, и отключается дальнейшее качание частоты.

Описанный прибор позволяет автоматизировать процесс измерений и обеспечивает возможность автоматически формировать на выходе электрический сигнал, соответствующий контролируемому параметру. Что позволяет эффективно вести разбраковку пьезорезонаторов в процессе серийного производства.

Список литературы

1. В.Л.Земляков, С.Н. Ключников Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям // Измерительная техника.2010.№3.С.38-40.
2. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение добротности пьезорезонаторов // Измерительная техника. 2012. № 10. – С. 64–66.
3. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение пьезомодуля материала пьезокерамического элемента [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2012. №2. – Режим доступа: http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/803.

Контроль пьезорезонаторов по частотной характеристике активной составляющей проводимости

Ерусалимский Ю.А., Толмачев С.А.

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

В настоящее время, как для исследовательских целей, так и для решения практических задач, связанных с диагностикой ПКЭ и пьезопреобразователей, широко применяют одни и те же методы испытаний в динамическом режиме. Для реализации этих методов используют частотные характеристики проводимости в области резонанса.

Независимо от метода исследований, определение параметров ПКЭ происходит по результатам измерений либо модуля, либо активной составляющей проводимости в дискретных точках. При этом в различных измерительных задачах важно определять максимально возможный шаг дискретизации.

В работе рассматриваются три измерительных задачи, встречающихся при контроле качества ПКЭ по частотной характеристике активной составляющей проводимости:

1. Восстановление непрерывной частотной зависимости активной составляющей проводимости по последовательности отсчетов (в соответствии с теоремой В.А. Котельникова);
2. Определение добротности ПКЭ и пьезомодуля материала через интеграл от активной составляющей проводимости (площадь под кривой);
3. Определение добротности ПКЭ и пьезомодуля материала по максимальному значению производной от активной составляющей проводимости.

В предположении, что в зависимости от цели исследований ПКЭ, значение максимального шага дискретизации $\Delta\omega_k$ может быть различным, представлены результаты компьютерного моделирования.

Для проведения исследования трех рассмотренных измерительных задач с использованием среды программирования Matlab были разработаны соответствующие приложения.

В результате компьютерного эксперимента для эквивалентной электрической схемы ПКЭ с исходной добротностью $Q_{исх} = 100$ были получены результаты, представленные на рис. 1 *а, б*: рис. 1 *а* соответствует погрешности определения добротности через интеграл от активной составляющей проводимости, а рис. 1 *б* – определения добротности через производную от активной составляющей проводимости.

Погрешность определения величины добротности в зависимости от числа точек N в диапазоне значений, равном ширине резонансной кривой активной составляющей проводимости рассчитывалась по формуле

$$\Delta\% = 100\% \frac{\left| Q_{\text{м}} - Q_{исх} \right|}{Q_{исх}}.$$

Поскольку при определении добротности путем интегрирования результат зависит от расположения точек измерения, на рис. 1 *а* приведены наибольшие значения погрешности при фиксированном N.

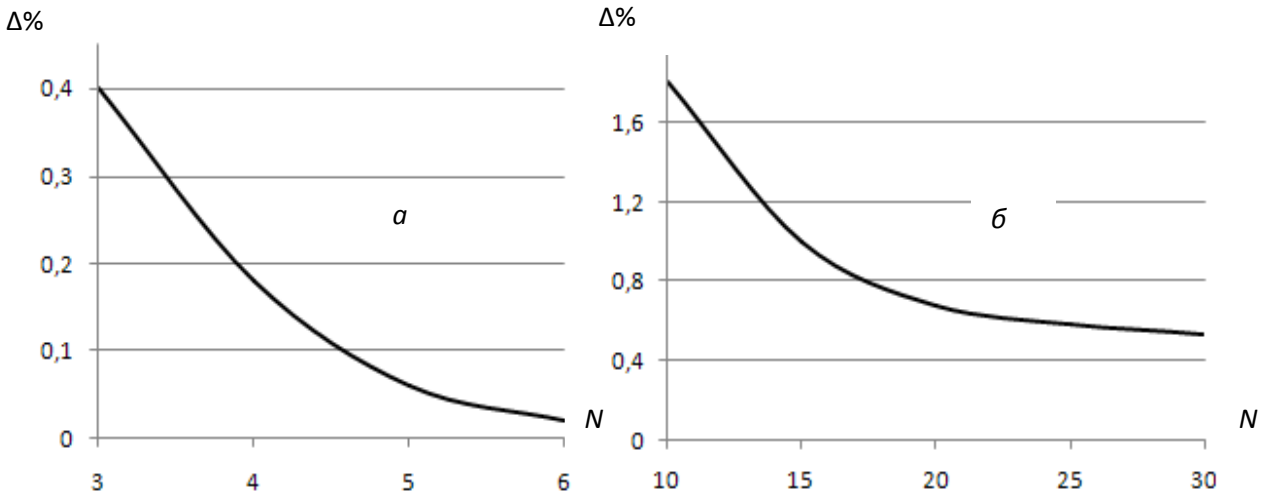


Рис. 1. Зависимость погрешности определения добротности от числа точек в диапазоне значений, равном ширине резонансной кривой

Из представленного материала следует, что, в зависимости от цели исследований ПКЭ, количество точек измерения активной составляющей проводимости (значение шага дискретизации) может быть различным:

Таким образом, установлено, что

- для восстановления непрерывной частотной зависимости активной составляющей проводимости по последовательности отсчетов (в соответствии с теоремой В.А. Котельникова) необходимо иметь шаг дискретизации по частоте соответствующий наличию примерно 10 точек в диапазоне значений, равном ширине резонансной кривой активной составляющей проводимости;
- для определения добротности ПКЭ через интеграл от активной составляющей проводимости (площадь под кривой) необходимое количество точек измерения в том же диапазоне не менее 5 – 6;
- для определения добротности ПКЭ по максимальному значению производной от активной составляющей проводимости количество точек в диапазоне значений, равном ширине резонансной кривой активной составляющей проводимости составляет не менее 15 – 20.

Полученая оценка шага дискретизации по частоте при решении задач диагностики пьезокерамического элемента разными методами по измерениям активной составляющей проводимости в ряде дискретных точек позволит не потерять в точности и, в то же время, сократить объем измерений и количество вычислительных операций.

Список литературы

1. Земляков В.Л., Толмачев С.А. Диагностика пьезокерамического элемента по активной составляющей проводимости [Электронный ресурс]. Инженерный вестник Дона. – 2013. №2. – Режим доступа: http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1622.

Расчетная модель теплообмена платы в стационарном воздушном потоке

Е.В. Корохова, Н.И. Горбачев, Е.С. Алексюнин

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Увеличение вычислительной мощности современных информационных систем определяет актуальность проблемы обеспечения требуемого теплового режима работы электронных компонентов. Для ее решения чаще всего используют системы охлаждения, которые можно разделить на следующие основные группы: системы воздушного, жидкостного охлаждения и комбинированные системы.

Наибольшую популярность, имеют системы воздушного охлаждения. Это связано с тем, что они гораздо проще в производстве, в установке и обслуживании, а также имеют сравнительно небольшую стоимость. Воздушное охлаждение бывает пассивным, в этом случае отвод тепла от радиатора осуществляется за счет излучения тепла и естественной конвекции; и активным, в котором тепло также отводится за счет излучения, но основную роль в охлаждении играет принудительная конвекция.

Наиболее часто используемым видом вентиляторов является осевой вентилятор. Эффективность его работы зависит от геометрических размеров и частоты вращения лопастей. В случае их применения в компьютерах необходимо использование компактных устройств, особенно если речь идет об охлаждении отдельных компонентов, например таких, как интегральные схемы. Помимо больших размеров вентиляторы имеют следующие недостатки: являются основным источником шума в процессе работы; имеют низкие показатели эффективности работы по сравнению с другими активными системами охлаждения; обладают низкой надежностью.

Альтернативой применения данного вида вентиляторов является использование пьезоэлектрических микро-вентиляторов (далее МВ), представляющие собой миниатюрные меха, выдувающие порции воздуха

на частоте порядка 25 кГц, что несколько выше верхней границы слышимого диапазона, следовательно, не издают шума в процессе работы. Основным недостатком МВ является их значительно меньшая производительность, чем у электромеханических вентиляторов, а именно 0,7 л/с. Таким образом, применение МВ возможно лишь при создании локальных систем охлаждения для отдельных электронных компонентов компьютера. В качестве примера подобного использования МВ рассмотрим систему охлаждения платы памяти в замкнутом контуре, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

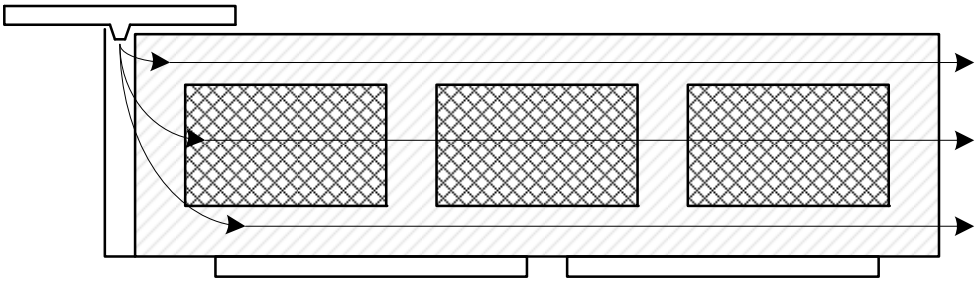


Рис. 1. Принципиальная схема модели охлаждения платы памяти

На основе принципиальной схемы создана трехмерная модель теплообмена платы памяти в замкнутом контуре. Для создания и расчета модели использовался модуль Heat Transfer программы COMSOL Multirhysics, рассматривающий теплоперенос при помощи теплопроводности, конвекции и излучения.

Модель использует два стационарных прикладных режима: режим теплопереноса и режим неизотермического потока [2].

Режим неизотермического потока моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих связь скорости жидкости u и давления p [2-3]:

$$\rho(u*\nabla)u = \nabla*\left[-pI+\eta(\nabla u+(\nabla u)^T)-\left(\tfrac{2}{3}\eta-k\right)(\nabla*u)I\right]+(\rho-\rho_0)g$$

,

$$\nabla*(\rho u)-0,\ \nabla*(\rho u)-0.$$

Из-за нагрева жидкости возникают отклонения локальной плотности ρ, по сравнению с плотностью на входе ρ_0. В результате создается местная

выталкивающая сила, выраженная как $(\rho - \rho_0)g$. Модель также рассматривает вязкость η, зависящую от температуры.

Режим теплопереноса основан на уравнении баланса энергии, учитывающего скорость теплоносителя:

$$\nabla * (-k\nabla T) = Q - \rho C_p T u * \nabla T,$$

где k - теплопроводность; C_p - удельная теплоемкость и Q - тепловая мощность в единице объема, устанавливается равной 1,25 МВт/м^3 (1 Вт/микросхему).

Граничные условия для потока на входе устанавливаются как ламинарный входной поток с давлением 1,5 кПа и температурой 300 К. На выходе потока используется конвективный теплообмен.

Результаты решения модели показывают, что температура крайних микросхемы больше, чем температура первых. Так перегрев самой первой составляет всего 4 К, а верхней более 10 К. Это связано с тем, что часть потока уходящего с источника тепла попадает на крайние микросхемы. Расчет поля скоростей показал, что исходный поток перестраивается и максимальная скорость возникает по краям микросхем.

Анализ результатов расчета градиента температур и распределения скоростей в замкнутом воздушном слое модели теплообмена платы позволяет сделать вывод о возможности применения МВ в качестве основного элемента активной воздушной системы охлаждения электронных компонентов вычислительных систем.

Список литературы

1. Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А., Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении. [Текст]:Монография / А.Е. Панич. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2009. – 168 с.

2. Бирюлин Г.В., Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB, Методическое пособие, СПбГУИТМО 2006

3. Темам Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ. — 2-е изд. — М.: Мир, 1981. — 408с.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

Роль радиотелеметрической информационно-измерительной техники в построении экономики в ракетно-космической отрасли

А.В.Гориш, Д.В.Панов

НОУ «ИПК Машприбор», г. Королев, Россия

В ракетно-космической отрасли радиотелеметрическая информационно-измерительная техника (РТИИТ) занимала ведущую роль в процессах создания и эксплуатации различных изделий ракетно-космической техники.

Следует особо отметить, что измерения играют важную роль в жизни человечества.

Основоположник отечественной метрологии Д.И.Мендеелев выразил значение измерений следующими словами: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять …»[1-4].

В философском плане измерения – один из способов познания материального мира. На эту роль измерений указали великие ученые всех стран и народов: Г.Галилей: «Измеряй все доступные измерению и делай доступным все недоступное ему», Т.Кельвин: «Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить». Русский ученый Б.С.Якоби писал: «Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему государству» [5,6].

Современное общество немыслимо без измерений. Высокая точность управления полетами космических аппаратов достигнута благодаря современным средствам измерений, установленным как на космических аппаратах, так и на Земле. Здесь уместно привести любимую поговорку основоположника отечественной космонавтики С.П.Королева: «Семь раз отмерь, хорошенько проверь, один раз отрежь и снова проверь» [7].

В производственной деятельности измерения служат обеспечению взаимозаменяемости и современности деталей компонентов изделий,

позволяют вести контроль технологических процессов и качества продукции. На предприятиях осуществляют большое число измерений на всех стадиях производства: подготовка (входной контроль) исходных материалов, комплектующих, измерение параметров технологических процессов, приемка продукции, расходы энергоресурсов, контроль параметров окружающей среды.

В день в мире производится миллиарды измерений. Особое место занимают измерений в точном приборостроении. Дело в том, что большинство изделий точного приборостроения сами являются прецизионными средствами измерений. В процессе создания, испытаний и эксплуатации изделий точного приборостроения приходится иметь с большим количеством измеряемых физических величин, разнообразных по физической природе, пределам измерений и точности.

В ракетно-космической отрасли (РКО) ведущая роль в области проектирования, создания, испытаний и эксплуатации принадлежала радиотелеметрической информационно-измерительной техники (датчико-преобразовательная аппаратура, радиотелеметрические наземные и бортовые информационно-измерительные системы, средства сбора информации, ее обработка, средства представления информации специалистам, волоконно-оптические линии связи и программно-математические продукты с вычислительными комплексами и персональными компьютерами).

Следует особо отметить, что в Минобщемаше в области проектирования и создания РТИИТ для решения государственных задач по созданию ракетно-ядерного щита существенный вклад вложили: С.А.Афанасьев, О.Ф.Антуфьев, А.П.Зубов, Б.В.Бальмонт, О.Д.Бакладнов, И.И.Уткин, Г.Я.Гуськов, Б.А.Строганов, В.Ф.Уткин, О.Д.Комиссаров, С.П.Королев, В.П.Макеев, Е.П.Осадчий, В.А.Волков, О.Н.Шишкин, Ш.И.Боксар, Л.И.Безверхий, В.П.Глушко, Ю.А.Мозжорин, О.П.Краморов, А.Е.Ольсевич, И.С.Стыценко. Н.М.Грибков, А.В.Гориш, А.Е.Панич, Я.В.Малков, Н.М.Пушкин, В.П.Дунаевский, В.А.Победоносцев и др.

Для решения сложных государственных задач национального значения впервые были созданы:

1. НИИ измерительной техники[1], (НИИИТ) г.Королев Московской области.

2. НИИ физических измерений, (НИИ ФИ) г.Пенза (ранее это был филиал НИИ-88 с 1952 г.).

3. НИИ радиотехнических измерений, г.Харьков (ранее это был филиал НИИ измерительной техники).

4. 11 отраслевых лабораторий в ВУЗах (гг.Москва, Харьков, Королев, С-Петербург, Ворошиловоград, Пенза, Ростов-на-Дону, Красноярск).

5. Государственный метрологический центр при НИИ измерительной техники (это было самостоятельное учреждение, всю информационно-измерительную технику атттестовывали, в нем были созданы уникальные эталонные метрологические стенды, установки, различная аппаратура (около 120 различных типов).

6. Построен лабораторно-производственный корпус (ОКТБ «Пьезоприбор») для задач Минобщемаша в г.Ростов-на-Дону.

7. Были построены два завода по освоению и выпуску РТИИТ с годовыми объемами более 100 млн.руб. (гг.Чернигов и Новополоцк). Мелкосерийную РТИИТ выпускали в гг.Королеве и Пензе.

8. Крупные серии РТИИТ выпускали на заводах в гг.Краснодаре, Львове, Омске

9. Для измерения траекторных параметров (по дальности и скоростей по 3 координатам) информационно-измерительные системы изготавливались на пяти заводах Минобщемаша (гг.Харьков, Чернигов, Москва, Санкт-Петербург).

10. РТИИТ в микроэлектронном исполнении выпускали три завода (Ижевский, Черниговский, Зеленоградский).

11. Были построены в Минобщемаше 19 корпусов по выпуску РТИИТмикроэлектронного исполнения с чистыми комнатами.

Это все было создано по технической документации, разработанной предприятиями Минобщемаша и смежными – Минвуза РСФСР, Минэлектронпрома. Работы проводились под контролем Минобщемаша и ими финансировались.

[1] НИИ измерительной техники в 1978 году был преобразован в научно-производственное объединение измерительной техники (НПО ИТ) в составе трех структурных единиц (гг.Пенза, Харьков, Новополоцк)

НИИИТ возглавил О.Н.Шишкин - директор и доктор Технических наук И.И.Уткин - главный конструктор. Становление института совпало с широко развертыванием работ по созданию ракетно-ядерного щита страны и освоением космического пространства в интересах обороны и народного хозяйства. Коллективом вновь созданного института был проведен ряд межотраслевых, поисковых, научно-исследовательских работ концептуального направления, выполнение которых позволило разработать и обосновать долговременную программу информационно-измерительного и технического обеспечения ракетных и космических комплексов, учитывающую перспективу их развития до 2000 г.

В основу программы был положен комплексный подход к решению проблемы создания нового поколения измерительных средств с учетом существующих и прогнозируемых достижений научно-технического прогресса в приборостроении, основанный на системном анализе методик, процессов измерений на агрегатах и изделиях, этапов и технологии их отработки и испытаний, а также изучении условий эксплуатации измерительной аппаратуры и требований по метрологии и надежности для ракетных и ракетно-космических комплексов отрасли.

В результате реализации данной программы были:

● разработаны системы Нормативных документов (ГОСТ, ОСТ, СТП, РМ и др.), регламентирующих основы ракетных и космических комплексов; принципы аппаратной реализации, основанные на агрегатировании устройств, критерии разделения функций между ними; требования к составу унифицированных параметрических и функциональных рядов датчиков физических величин, бортовой аппаратуры преобразования, сбора и передачи измерительной информации с борта ракеты, бортовой регистрирующей аппаратуры, телеметрических проводных и радиолиний, наземной приеморегистрирующей аппаратуры, наземной аппаратуры сбора информации с измерительных пунктов, аппаратуры автоматизированной обработки результатов измерений, аппаратуры передачи обработанной информации потребителям по различным каналам связи; унифицированные ряды конструктивов для бортовой и наземной аппаратуры;

● созданы, с высоким уровнем автоматизации проводимых измерений, метрологическая и испытательная базы и на их основе Государственный испытательный метрологический центр (в состав Минобщемаша СССР);

● проанализированы перспективные технологии приборостроения, выбраны и обоснованы принципы комплексной микроминиатюризации аппаратурных решений с широким применением гибридно-пленочных композиций для внутриприборной коммутации и больших интегральных узлов на основе КМОП-структур, обеспечивающих решения функциональных задач;

● обеспечены необходимые темпы широкого внедрения системы автоматизированного проектирования (САПР) и АСУ НИИ, объединенными в высокопроизводительный вычислительный центр с развитой библиотекой программ.

С начала 70-х годов в НИИИТ начали развивать микроэлектронную технологию. На этой базе удалось значительно улучшить габаритно-весовые показатели бортовой аппаратуры, повысить надежность и поднять на новый уровень технологичность изготовления. Был разработан унифицированный ряд новых бортовых и наземных радиотелеметрических средств, позволяющих, помимо традиционных аналоговых параметров, контролировать и измерять состояние бортовых цифровых систем управления. После освоения в институте гибридно-пленочной технологии и, как результат, выпуска бортовой аппаратуры «Сириус» и в дальнейшем ее модификаций (МБА, СКИФ, СКУТ и др.) радиотелеметрия на основе этих бортовых систем и наземной станции БРС-4 стала единственной, используемой для отработки ракетных комплексов наземного, морского и подвижного базирования.

Разнообразие задач и условий эксплуатирования потребовало дифференциации бортовой аппаратуры. Наметились и были реализованы четыре направления:

● для боевых изделий (отличительная черта – все виды информации в совмещенной системе);

● для боевых блоков (малые габаритные размеры);

● для тяжелых носителей (пожаровзрывобезопасность, высокая информированность);

● для космических аппаратов (повышение надежности и ресурс).

Для всех четырех направлений был создан ряд бортовых запоминающихся устройств (в том числе кольцевого типа).

Начиная с 1997 г. большие работы велись для телеметрического обеспечения отработки комплекса «Энергия- Буран». Были разработаны и серийно освоены системы АРС, СЗСИ, «Сириус-31-35». На ракете-носителе «Энергия» было установлено шесть комплектов аппаратуры «Кварц», восемь комплектов аппаратуры АРС и пять комплектов аппаратуры «Сириус» - всего 624 бортовых приборов радимотелеметрических систем. При этом удалось решить сложную техническую задачу – совместимость радиосигналов шести передатчиков в ограниченном диапазоне. Развивалась и наземная аппаратура. В содружестве с КБ Ижевского мотозавода были разработаны и освоены серийно приеморегулирующие станции ПРА и ПРА-МК, системы ретрансляции сигналов, аппаратура оперативной обработки, устройства автовыбора разнесенных сигналов, ряд антенных комплексов и др. Проводились значительные теоретические проработки, в частности, в области радиолиний и магнитной записи.

Одновременно с ракетной радиотелеметрией развивались и другие направления:

● аппаратура С305, С330 для передачи информации через спутниковые системы связи;

● высокоинформативные магнитные регистраторы;

● системы документирования цифровой информации на боевых кораблях ВМФ;

● автономные регистраторы («черные ящик») спасаемых космических аппаратов.

В результате этих разработок была обеспечена отработка практических всех образцов ракетно-космической техники, разрабатываемых в СССР.

Работы НИИИТ в области создания специальной телеметрической аппаратуры были удостоены Государственной премии СССР.

Сергей Александрович Афанасьев организовал формирование и создание РКО, которая обеспечила формирование и становление ракетно-космической отрасли. За годы его руководства родилась «школа С.А.Афанасьева». Ему принадлежит заслуга и важная роль в создании как РТИИТ, так и в создание ракетно-ядерного щита нашей Родины, планирование, подготовке и обеспечение пилотируемых космических полетов, создании первых орбитальных станций.

Технологическая история РТИИТ

Рассмотрим технологическую историю РТИИТ для ракетно-космической отрасли.

Прежде всего отметим, что в начале века в мире развиваются III и IV уклады технологического прогресса.

Локомотивными отраслями является тяжелое машиностроение, металлургия, большая химия, производство автомобилей, самолетов, танки. Истинный смысл сталинских пятилеток состоит в освоении возможностей IV уклада. Вложив сверхусилия, наш народ решил эту задачу. Это позволило выстоять в Великой Отечественной войне, превратить СССР в сверхдержаву.

Россия втянувшись в бесплодные, разрушительные реформы, упустила возможности, представленные V укладом технологического прогресса, локомотивными отраслями которого были ИИТ, компьютеры, электроника, Интернет, телекоммуникации, малотоннажная химия. На основе V уклада, который успешно развитии и реализовали, взлетели Япония, США и Южная Корея. Однако, два направления в нашей стране в рамках V уклада, руководимые С.А.Афанасьевы, были реализованы – это РТИИТ и электроника. Причем, электроника обеспечивала миниатюризацию РТИИТ, устанавливаемой на борты изделий РКТ. Задача миниатюризации была решена с помощью микроэлектронной технологии. Причем, первым шагом в освоении новых технологий V укладка стала разработка телеметрической системы на основе микроэлектронной элементной базы с освоением гибридно-пленочной технологии. Были реализованы новые технологии по созданию полупроводниковых датчиков, а также было выбрано и реализована определяющее направление КМОП –

транзисторная логика (комплементарные металл-окисел-полупроводниковые транзисторы).

КМОП – технология явилась в рамках V укладка одной из определяющих как для ракетно-космического приборостроения, так для вычислительной техники во всем мире. Была реализована новая технология бескорпусной элементной базы проектирования и создания информационно-измерительных приборов. Основными конструкторско-технологическими звеньями были узлы электронного полупроводникового (УЭП) и печатные платы. Технологическое представление любого УЭП характерно большим количеством элементов, сложностью связей между ними и многослойностью, что исключает ручное выполнение этих работ.

Кроме того, технологические средства, на которых производится изготовление шаблонов (масок), требуют программного управления. Процесс изготовления УЭП весьма трудоемок, для некоторых технологий он составляет от нескольких недель до нескольких месяцев. Поэтому очень важно исключить вероятные ошибки до начала изготовления фотошаблонов путем моделирования электрической и топологической схем УЭП. Таким образом, процесс создания УЭП требует широкого применения вычислительной техники и сложного программного обеспечения, то есть применения систем автоматизированного проектирования(САПР), которые были реализованы.

В то время как к фотошаблонам большинства печатных плат не предъявляется высоких требований по точности, технологический процесс изготовления УЭП требует высокоточных фотошаблонов и связан с использованием дорогостоящих материалов, химических процессов и сложного прецизионного оборудования. Это является определяющим в разделении организации работ и производства составляющих элементов и прибора в целом.

Благодаря высококвалифицированным специалистам НИИИТа в области микроэлектроники была организована четкая и единая идеология в разработке УЭП от этапа контроля электрических схем до этапа получения рабочих фотошаблонов и упорядочена организация по проектированию БИС на предприятии. Положительным фактором явилось и то, что в институте была единая технологическая структура, так как твердотельная

микроэлектроника в отрыве от технологии не может развиваться и совершенствоваться. Между топологией и технологией полупроводниковых схем нельзя провести четкого разграничения.

В НИИИТе освоена К-МОП технология с проектными нормами до трех микрон с самосовмещенными поликремниевыми затворами, что обеспечило поднятие рабочей частоты до 15 МГц. При этом сохранены все предыдущие технологии, что позволило выпускать широкую номенклатуру УЭП.

Освоены и применяются САПР на современных вычислительных средствах, позволяющих проводить моделирование, проверку проектных норм, верификацию топологии УЭП, а также реализована КМОП-технология изготовления УЭП и датчиковых элементов на структурах SOI (кремний на изоляторе).

В институте создан высокотехнологический интеллектуальный задел:

● топологии интегральных схем для изготовления узлов электронных полупроводниковых по КМОП-технологии;

● микросхематические решения для аналоговых и цифровых КМОП-элементов, подтвержденные авторскими свидетельствами и патентами.

За этот промежуток времени решены и реализованы в рамках V уклада следующие микроэлектронно-технологические задачи:

● полупроводниковая микроэлектроника;

● гибридно-пленочная и функциональная электроника;

● технологическое оснащение ракетно-космического приборостроения;

● сформированы и выпущены комплексные программы по технологиям приборостроения РТИИТ;

● созданы и развиты производственная и технологическая базы как в институте, так и на серийных заводах, обеспечивающих поставки серийных образцов РТИИТ.

На экспериментальном производстве института и на заводах ракетно-космической отрасли были освоены и серийно выпускались РТИИТ микроэлектронного исполнения следующих типов:

● датчико-преобразовательные приборы («Спутник», «Кварц», «Мустанг», «Микрон», «Скиф», «Тюльпан», «Девиз», «Скут», «Феникс», «Диор», «Ника», «Ротор», «Трит», БСВК.

Создание, становление и решение задач в Минобщемаше в рамкахV уклада в части технологического направления отрасли обеспечивали: В.И.Язовцев, К.В.Егоров, Ю.Д.Ивасенко, В.М.Школьников, А.И.Сухов, А.И.Черный, Н.К.Гаврилов, Н.П.Нефедкин, А.Е.Сычев, Т.Г.Крутских, Л.М.Аркадьева, З.М.Поварницына, А.В.Воронецкий, В.Р.Суминов, Ю.В.Осипов, Л.А.Виноградова, Е.В.Усова, В.Н.Богомолов, К.П.Липатова, Л.М.Муленко, Л.Б.Якушина, А.В.Шиловский, О.Н. Шишкин, О.А.Сулимов, В.С.Нестеренков, С.И.Юношев, С.В.Девляшов, Т.Н.Челнокова, Т.Н.Голикова, И.И.Ковтун, Г.П.Марьина, Е.А.Слобожанова, Т.А.Серебрякова, В.Н. Богатырев, О.А.Хатькова, Г.М.Прокофьев, Л.В.Тюрина, Л.В.Золотухина, Г.В.Додонова, Б.Г.Осипов, А.В.Сергеева, Н.А.Завьялова, Л.В.Трушкина, О.Ю.Чарикова, К.Г.Мелик-Парсадян, А.А.Родионов, В.В.Хартин и многие другие специалисты института.

Координацию работ в области микроэлектронной, полупроводниковой, гибридно-пленочной и функциональной электроники выполняли С.А.Афансьев, О.Л.Бакаланов, О.Ф.Антуфьев, А.В.Гориш, А.Е.Шестаков, В.Х.Демтиров, А.П.Зубов, В.Е.Соколов и др.

Известно, что реализацию V уклада в СССР обеспечил министр Минобщемаша СССР – Сергей Александрович Афанасьев. Решив задачу V уклада С.А.Афанасьеву удалось превратить СССР в сверхдержаву [8]. Но другие отрасли к сожалению с V укладом не справились (компьютеры, телекоммуникации, электроника, малотоннажная химия).

Сегодня Россия должна решить задачу исторического масштаба. Не имея промышленности, соответствующей V укладу, решить задачи VI уклада. Его локомотивом являются:

● биотехнологии, биоинформатика, экспериментальная биология и охрана окружающей среды: новая медицина (медицинская генетика, фармакология, создана новых лекарственных препаратов), медицинское приборостроения (современные инженерные микротехнологии, реализация ультразвуковых технологий, информационно-измерительные технологии

для телемедицины, контрольно-измерительная аппаратура для неспецифического восстановления здоровья);

● пьезоэлектрическое приборостроение;

● нанотехнологии, новые материалы на основе нанотехнологий, нанобиология и наномедицина;

● новое природопользование, полномасштабные технологии виртуальной реальности;

● когнитивные технологии.

В настоящее время генеральное развитие мировой науки завтрашнего дня будет определять комплекс из четырех определяющих направлений:
био-, нано-, инфо- и когнитивных технологий. Ядром решения комплексных многофункциональных задач в рамках VI является когнитивная наука.

Список литературы

1. Брюханов В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности. – М.: Изд-во стандартов, 1991.- 108 с.

2. ГОСТ 8.563-96 ГСОЕИ. Методики выполнения измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1996.

3. Мальков Н.Ф. Основы метрологии. – М.: Коммерприбор, 1949. – 327 с.

4. Мурашкина Т.И., Мышева М.М., Волков В.В. Теория измерений. Учебно-методическая разработка. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2001. – 43 с.

5. Пистровский Я. Теория измерений для инженеров: Пер. с польск. – М.: Мир, 1989 г.

6. Сергее А.Г., Крохин В.В. Метрология. Учеб. Пособие для вузов. – М.: Логос, 2000. – 408 с.

7. Мурашкина Т.И., Мещеряков В.А., Бадева. Теория измерений. - Пенза: Изд-во ПТУ, 2003. – 170.

8. Малинецкий Г.Г. Модернизация России и проектирование будущего. – Москва: Материалы конференции XII Международного форума «Высокие технологии XXI века». Изд-во ЛКИ 2011. – 528 с.

Методика решения навигационной задачи транспортного средства применительно к слабосвязанной структуре интеграции разнородных навигационных систем

Щербань И.В., Толмачев С.А.

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Развитие современной техники и стремление к наиболее эффективному ее использованию предъявляют повышенные требования к точности навигационных определений наземного транспорта. К числу основных современных бортовых систем навигации прежде всего относят инерциальные навигационные системы (ИНС) и спутниковые навигационные системы (СНС). Опыт эксплуатации СНС показал, что при многих положительных качествах эти системы не могут удовлетворить всем, предъявляемым на сегодняшний день требованиям к определению навигационных параметров транспортного средства. Использование же относительно дешевых ИНС в автономном режиме также не позволяет качественно определять навигационные параметры с достаточной точностью. Поэтому достижение требуемого качества навигационных определений чаще всего обеспечивается посредством комплексирования ИНС (например, недорогих бесплатформенных ИНС (БИНС), построенных на основе MEMS-технологий) со спутниковыми навигационными системами ГЛОНАСС/GPS [1].

Существующие подходы к подобной тесной интеграции БИНС и СНС для автомобильных транспортных средств (ТС) неэффективны. Это связано с методическими погрешностями существующего математического аппарата, который использует только линеаризованные измерения СНС и линейные уравнения ошибок ИНС, устойчивых лишь на небольших интервалах времени [2-3]. Поэтому разработана методика решения навигационной задачи на основе слабосвязанной структуры интеграции СНС и ИНС применительно к ТС.

Эффективность предлагаемой методики объясняется использованием полной нелинейной модели навигационной системы ТС и,

поэтому, решение справедливо для произвольного и неизвестного заранее характера движения автомобиля, причем, при самых общих предположениях об уровне действующих возмущений. Кроме того, рассмотренное решение является универсальным для любого состава датчиков БИНС, включающего в общем случае как инерциальные, так и неинерциальные измерители любого класса точности и, соответственно, стоимости.

Исходной информацией навигационной задачи являются измеренные акселерометрами составляющие n_x, n_y, n_z вектора кажущегося ускорения, показания датчиков угловой скорости – составляющие ω_x, ω_y, ω_z вектора угловой скорости вращения приборной системы координат на свои оси и сигналы кодовых измерений СНС. Алгоритм навигации (представлен на рисунке) содержит два контура – быстрый, где автономно выполняется решение навигационной задачи БИНС, и медленный, где по показаниям СНС осуществляется коррекция решений БИНС и определяются начальные условия для первого такта последующего итерационного цикла быстрого контура.

Такт работы медленного контура

$$T_{\text{М}} = k_{\text{М}} T_0,$$

равен интервалу времени получения навигационных сообщений СНС. Здесь T_0 – такт работы быстрого контура; $k_{\text{м}}>1$ – коэффициент, определяемый из трудоемкости задач и производительности бортового вычислителя ТС.

В быстром контуре выполняется $k_{\text{м}}$ итерационных циклов решения навигационной задачи БИНС, где вычисляются текущие значения координат ТС φ, λ и h, восточная V_E, северная V_N и вертикальная V_h составляющие линейной скорости ТС относительно Земли, а также углы пространственной ориентации ТС K, θ и ψ – курса, продольных и боковых наклонов соответственно[4].

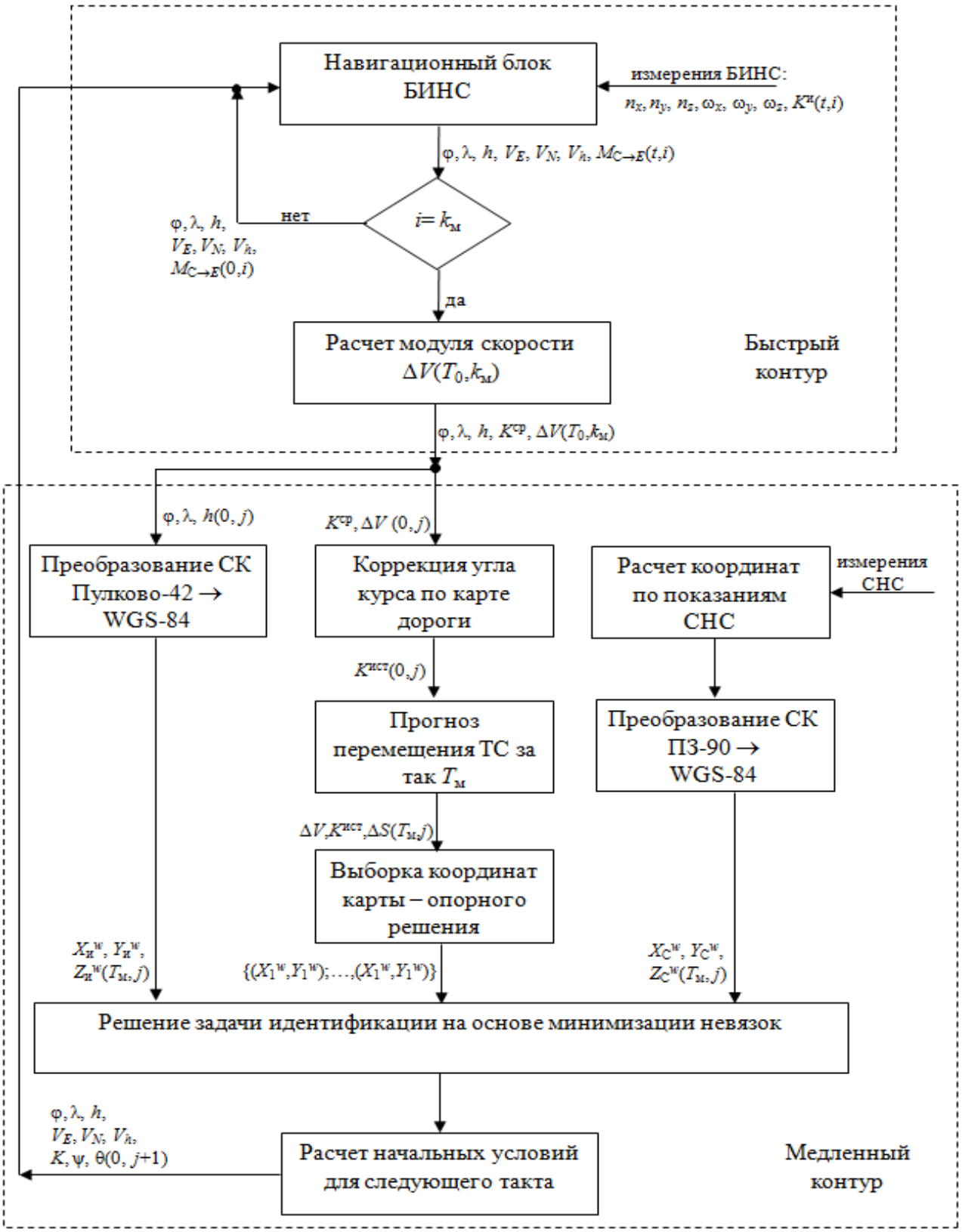


Рис.1 Функциональная схема интегрированной навигационной системы

В медленном контуре выполняются преобразования систем координат и учтено допущение, что ТС может совершать движение только по дорогам, координаты которых отражены в навигационных цифровых картах. Также, учтен тот факт, что может иметь неконтролируемое и никак не опознаваемое существенное ухудшение точности работы СНС, для чего и выполняется прогноз местоположения ТС на автомобильной дороге.

Решение задачи идентификации на основе минимизации невязок осуществляется в статистической апостериорной постановке – по результатам полученных наборов измерений относительно базового решения.

Рассмотренная методика решения навигационной задачи ТС обеспечивает возможность эффективной интеграции БИНС на основе MEMS-технологии и СНС. Такое построение вычислений позволяет избежать накопления ошибок интегрирования и увеличения погрешностей местоположения ТС со временем. Как показало моделирование, этот факт обеспечивает достаточную – субметровую, точность работы схемы, причем, без привлечения аппарата оптимальной фильтрации.

Список литературы

1. Демидов *О.В.* Задача тесной интеграции систем ГЛОНАСС и GPS с ИНС разных классов точности: Дисс. на соиск. степ. к.ф.-м.н. М.: МГУ, 2009г.
2. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации / 2 изд. М.: МГУ, 2010. 126 с.
3. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: сб. ст. и докл. / Под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: Электроприбор, 2001. 235 с.
4. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: Электроприбор, 2003. 390 с.

Организационная структура управления предприятием

Гориш А.В., Панов Д.В.

НОУ «ИПК Машприбор», г. Королев, Россия

Организационная структура управления (ОСУ) предприятия составляется на базе функциональной структуры управления и реализует четыре канонизированные функции управления:

- комплексное планирование (в том числе, стратегическое);
- оперативно-диспетчерское регулирование быстротекущими процессами;
- календарное руководство выполнением планов;
- обеспечение повседневной деятельности органов управления.

Основные виды организационной структуры управления

Предприятия, как правило, имеют иерархическую структуру управления, которая должна быть вторична по отношению к стратегии деятельности предприятия (вытекать из направленности выполняемых работ). В зависимости от объема собственных работ предприятие имеет:

- функциональную (централизованную) ОСУ;
- дивизионную (децентрализованную) ОСУ.

Основным структурным элементом предприятий, занимающихся научной деятельностью, является лаборатория (сектор) в составе научно-исследовательского отдела. Лаборатория является ячейкой, в которой оптимально (по критерию эффективности) между исполнителями распределены научно-технические и организационные вопросы. Оптимальная численность лаборатории 15÷25 сотрудников.

Следующим за лабораторией в структурной иерархии предприятия структурным элементом является отдел, решающий научно-технические и организационные вопросы в рамках определенной специализации. Количество лабораторий (секторов) в отделе может быть в пределах 3 … 6.

Научно-исследовательские отделы, решающие задачи разработок одного тематического направления предприятия, объединяются в отделение, комплекс, научный центр, во главе которого стоит главный

конструктор данного тематического направления. В тематическом отделении целесообразно иметь комплексную лабораторию (комплексный отдел), как аппарат главного конструктора направления.

Совокупность тематических отделений и, при необходимости, самостоятельных научно-исследовательских отделов с указанием их подчиненности руководителю предприятия и его заместителям составляет основную («разрабатывающую») часть организационной структуры управления предприятия. Отделения, комплексы, научные центры могут иметь двойное подчинение (руководителю предприятия и его заместителю).

В некоторых предприятиях для ведения системных разработок, объединяющих несколько отделений (тематических направлений), могут создаваться научно-технические комплексы (научно-технические центры). Создание их для решения организационных вопросов (без наличия системных разработок) практические пользы не приносит.

Организационная структура управления в советские времена разрабатывалась отраслевыми предприятиями, рассматривалась научно-техническим советом (НТС) и после ее одобрения НТС, утверждалась выше стоящим органом (главным управлением, Министерством).

При малой численности имел функциональную (отраслевую) ОСУ. В министерствах, в ведении которых находились предприятия, имелись «Типовые организационные структуры управления НИИ, КБ заводов и Основные положения по их применению». Положениям этого документа в основном соответствовала дивизионная (тематическая) структура управления предприятием.

Предприятия в период существования СССР, как правило, были государственными предприятиями, подчиненными соответствующему министерству (ведомству). Руководитель предприятия, его первый заместитель и главные конструкторы направлений (являвшиеся начальниками отделений) назначались (и освобождались) после обсуждения кандидатур на коллегии Министерства. Следует подчеркнуть,

что институту главных конструкторов направлений (разработок) НИИ и КБ оправданно придавалось большое значение в министерствах.

Внутри отраслевых предприятий был коллегиальный орган - научно-технический совет, а также был еще один коллегиальный орган – партком, который имел широкие полномочия в вопросах управления предприятием, особенно в части расстановки руководящих кадров.

В целом перестроичный период (примерно, 1985-1991 годы) для предприятий характеризовался ростом (по инерции) объемов НИОКР (за счет развертывания работ по новым системам и увеличением научно-технического потенциала.

В постсоветский период вначале был беспредел в вопросах собственности и полное безразличие в части ОСУ предприятий. В настоящее время постепенно реализуются принципы корпоративного (коллегиального) управления [2] предприятиями.

Организационная структура корпоративного управления

Совет Министров РФ определил в 2001 году шесть следующих основных направлений деятельности Правительства на настоящем этапе [1]:

1. Регламентация и защита прав собственника и земельная реформа;
2. Продолжение налоговой и таможенной реформ;
3. Реализация программы реформирования естественных монополий;
4. Внедрение норм корпоративного управления;
5. Завершение подготовки проектов законов о дебюрократизации экономики;
6. Реструктуризация банковской системы и приведение ее в соответствие с потребностями экономики.

Наличие четвертого направления работы Правительства РФ неслучайно, так кА от качества корпоративного управления предприятиями различных форм собственности и, особенно акционерного общества (а это наиболее популярная в капиталистических странах форма

предпринимательства) напрямую зависят инвестиции и, вообще, эффективность деятельности любого предприятия.

Исследования, проведенные в 2000 году фирмой McKiney & Company [3], что подавляющая часть потенциальных интересов готовы платить за акции тех компаний, у которых подтверждено высокое качество корпоративного управления. По предложению агентства Standard & Poor's (S&P) качество корпоративного управления определяется (по десяти бальной системе) величиной рейтинга корпоративного управления (РКУ), который оценивает корпоративное управление компании по четырем критериям:

- структура собственности;
- отношения с финансово заинтересованными лицами;
- финансовая прозрачность и раскрытие информации;
- структура управления компанией.

В части указанных критериев оценки РКУ имеют важное значение следующие положения:

1. По структуре собственности:

- в руках каждого из собственников должно быть более 25% акций, также как и у управляющих компаний;
- среди акционеров компаний не должно быть государства и подконтрольных ему структур;
- недопустимо, чтобы дочерние компании имели в собственности акции материнской компании.

2. По отношениям с финансово заинтересованными лицами:

- собрание акционеров должно проводится в удобном для акционеров месте, которым предварительно (за месяц) должны быть разосланы все необходимые материалы;
- право голосования за не явившихся акционеров не должно закрепляться за управляющими компаниями;
- у компании должен быть действительно независимый регистратор.

3. По финансовой прозрачности и раскрытию информации:

- компания обязана публиковать не только годовые, но и ежеквартальные финансовые отчеты, сопровождаемые объяснительной запиской реально независимого аудитора;

- годовой отчет должен быть консолидирован с учетом всех внутренних сделок;

- необходимо, чтобы руководство компании оперативно и честно комментировало все внутренние события, которые могут повлиять на стоимость акций.

4. По структуре управления компаний:

- необходимо, чтобы Совет директоров (наблюдательный совет) был дееспособен и собирался в полном составе не реже двух раз в квартал);

- больше половины членов Совета директоров должны быть независимы от компании;

- информация о размере вознаграждения членам Совета директоров и общий реальный подход управляющих компаний должна быть общедоступной.

По поводу использования РКУ в российской действительности [3] сформулированы следующие предположения:

1). РКУ российскому рынку нужен, так как после его внедрения наступит достаточная прозрачность для вложения инвестиций;

2). Признавая безусловную необходимость и полезность РКУ, управляющие российских компаний не готовы (или не хотят) менять подход к корпоративному управлению;

3). Рейтинги российских компаний по методике S&P по состоянию на сегодня окажутся очень невысокими.

Зарубежный опыт [4] показывает возрастание в стратегии предпринимательства тенденций по участию персонала (наемных работников) компаний в прибылях, в собственности и управлении предприятием.

Принципиальное значение для акционерных обществ (АО), имеет участие персонала в управлении фирмой, что обеспечивает гармоничные партнерские отношения между работодателем и работополучателем и

позволяет снизить остроту социального противостояния путем эффективного разграничения полномочий между собственниками (акционерами), управляющими и наемными работниками с целью исключения экономической власти в одних руках.

Практическое участие наемных работников в управлении может быть реализовано, в частности, через их правовое присутствие в наблюдательном совете (НС), который тем самым превращается в орган компании, представляющий интересы труда и капитал. Оптимальное представительство наемных работников в НС от 1/3 до 1/2 его состава.

Наблюдательный совет, занимая промежуточное положение между собранием акционеров и администрацией, осуществляет три основные функции:

- назначение администрации;
- рассмотрение и принятие общекорпоративных решений (в том числе, и выработка правил принятия этих решений);
- контроль за деятельностью администрации.

Однако в российских АО, как правило, указанные НС не реализуются, хотя на словах и поддерживаются [5]. А по вопросу участия наемных работников в управлении предприятиям путем включения их представителей в состав НС отношение отрицательное (тем более, что эта норма не предусмотрена российским законодательством).

Если АО есть механизм и зарубежный опыт корпоративного (коллегиального) управления компаний, то применительно к государственным унитарным предприятием ни того, ни другого нет, если считать попытки внедрения коллегиального управления во многих предприятиях по правилам, изложенным в [2]. Эти правила предусматривали наличие в государственных унитарных отраслевых предприятиях внутренней системы коллегиального (корпоративного) управления, представляющей триаду коллективных органов:

- совет главных конструкторов (СГК);
- технико-экономический совет (ТЭС);
- научно-технический совет (НТС).

Рис. 1. Типовая структура предприятия

Упущенная в научно-технической деятельности предприятия становятся видными не сразу и приводят к необратимым потерям. Поэтому в предприятии должна быть система коллективных органов, определяющая научно-техническую политику в комплексе с финансово-экономической и хозяйственно-производственной деятельностью, а также подготавливающая вопросы (освобождения) сотрудников на руководящие научно-технические должности предприятия. На рис. 1 показана типовая структура предприятия при коллегиальном управлении.

Предложенная структура реализована на многих предприятиях ракетно-космической отрасли .

Список литературы

1. «Шесть пунктов Михаила Касьянова» Российская газета, № 43 (2655) от 28.02.01 г.

2. Гориш А.В., Калинин А.Ф. и др. Коллегиальное управление отраслевыми НИИ.:-М.:МГУЛ//Научные труды, 1999, вып. 302 (II).

3. «Рейтинг для русских» Коммерсант Власть, № 1-2 от 16.01.2001 г.

4. Гончаров В.В. Руководство для высшего управленческого персонала. – М.: М.П. «Сувенир», 1993.

5. «РАО ЕЭС России»: «Гонка за лидером» Российская газета. № 28 (2640) от 09.02.01 г.

Постановка задачи системного синтеза ресурса управления высокотехнологичным проектом

В.А. Петраков, А.С. Сомов, О.В. Граецкая., Е.В. Корохова, Н.С. Пономарева, А.В. Петракова

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

E-mail: kaf_sau@mail.ru

В основе современных методов управления проектами лежат методики структуризации работ и сетевого планирования, разработанные в конце 50-х годов 20 века. В теории и практике проектирования, включая управление проектом, в основном рассматривается небольшое количество подходов, методов исследования и разработки задачи, зарекомендовавшие себя при управлении хорошо структурированными проектами [1]. Назначение, содержание, характеристики и особенности высокотехнологичного проекта не структурированы на этапе выбора альтернатив и потому известные методы управления не в полной мере могут быть использованы для разработки эффективных алгоритмов принятия решений управления таким проектом. Поиск альтернатив заключается в системном синтезе характеристик проекта и ресурса управления им, направленных на формирование конкурентных характеристик высокотехнологичного продукта. Это позволяет исследовать структуру управления проектом как социотехническую систему и, как следствие, применять при ее проектировании современные методы системного синтеза, в том числе, синтез профессиональных компетенций исполнителей[2]. Таким образом, социотехническая система становится высокотехнологичным продуктом, при проектировании которого могут быть использованы методы технико-технологического и научно-образовательного форсайта [3].

Проведем классификацию проектов и исследуем ресурсы их управления.

1. Структурированный проект $\Omega = \{D, x_0, V(x), f(x,v), s(x,v), Кзд, Тзд, C\}$. Здесь D – множество этапов выполнения проекта; x_0 – первый этап; x_0

$\in D$, $V(x)$ – конечное множество набора действий в реализации отдельных этапов x; $f(x, v)$ – функция переходов. Из предыдущего этапа проект переходит в последующий под воздействием определенного набора действий $\boldsymbol{v}$ (технологии, инструмент, пакеты прикладных программ или выбором человеческого ресурса (количество) в состояние $f(x,v))$, $x \in D$, $v \in V(x)$, $f(x, v) \in D$; $\boldsymbol{s}(x,v)$ – функция платежа. При этом $v \in V$ определяется из условий $T(x,v) \leq Tзд, s(x,v) \in C, K(x,v) \in Kзд,$ где$Tзд, C, K(x,v)$ -заданные время, стоимость и содержание проекта.

2. Неструктурированный или слабо структурированный проект

$\Omega^{\bullet} = \{D; x_0; F; V(x), f(x,v), s(x,v)\}$. Здесь D – множество состояний проекта; x_0 – начальное состояние; F – множество конечных состояний, $x_0 \in D$, $x_0 \notin F$, $F \subset D$; $V(x)$ – конечное множество возможных в состоянии x ресурсов (управления), $x \in D \backslash F$; $f(x, v)$ – функция переходов(из состояния x под воздействием управления v проект переходит в состояние $f(x,v))$, $x \in D \backslash F$, $v \in V(x)$, $f(x, v) \in D$; $s(x,v)$ – функция платежа.

Проведенный анализ работ, затрагивающих вопросы постановки и решения указанных задач, показал следующее: разработаны и широко применяются при управлении проектами большое количество методов: метод критического пути (Critical Path Method), PERT(Program Evaluation Review Technique), гибкая методология разработки (agiles of tware development), логико-структурный подход, метод PRINCE (Projectsin Controlled Environments) и др.[1]. Все эти методы сориентированы на структурированные проекты, и применение их к управлению слабо структурированными проектами вызывает определенные трудности и неоднозначности полученных алгоритмов и программ.

Постановка задачи. Для проекта $\boldsymbol{\Omega^{*} = \{D ; x_0; F; V(x), f(x,v), s(x,v)\}}$ найти управления из заданного класса допустимых ресурсов $\boldsymbol{v}$ для вектора $\boldsymbol{v}(v_1, v_2, \ldots v_m)$, принимающего свои значения в области $\mathbf{F} \geq 0$ и принадлежащие нижней границе множества Парето, построенной на основе решения многокритериальной задачи оптимизации по критериям стоимости, времени, сложности, рисков и др. исполнения проекта.

Аналитическое решение сформулированной задачи для двух критериев приведено в [4], а процедура поиска ресурса управления использована для синтеза альтернативной стратегии управления слабо структурированным проектом газораспредели-тельной сети [5].

Список литературы

1. Р. Арчибальд. Управление высокотехнологичными программами и проектами. пер. с англ. – 3е изд., перераб. и доп. – М. : ДМК Пресс ; Компания АйТи, 2004. – с.472

2. О.В.Граецкая, Е.В. Корохова, А.С. Сомов, А.В. Петракова Модели принятия решений адаптации профессиональных компетенций к управлению высокотехнологичным проектом. Изв. ЮФУ. Техн. науки. Тем. вып.: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении, – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, №5. 2013. с. -236-241.

3. Е.В. Корохова, А.В. Петракова, И.С. Шабаршина, Н.С. Пономарева Форсайт-анализ подготовки кадров для управления высокотехнологичными нанопроектами и программами на основе имитационной модели. Изв. ЮФУ. Техн. науки. Тем. вып.: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении, – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, №5. 2013. с. -230-236.

4. В.А. Петраков, А.С. Сомов Модели и алгоритмы принятия решений в управлении проектом. Изв.ЮФУ. Техн.науки. Тем.вып.: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении, – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, №5. 2012. с.- 122-127.

5. А.С. Сомов, А.В. Петракова Эффективное управление проектом с заданными свойствами. Изв. ВУЗов. Сев.Кавк. регион. Технические науки. 2012. №3. с.-113-115.

Модели менеджмента качества в проектировании наукоемкой продукции

Е.В. Корохова, О.В. Лиманцева, В.В. Корохов

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Развитие ряда важнейших направлений промышленности, таких как авиакосмическая, судостроительная, машиностроительная отрасли и др., связано с проведением значительного объема проектных работ. В случае серийного производства методы и инструменты обеспечения требуемого качества продукции хорошо известны и широко применяются на ряде предприятий. Однако выпуск наукоемкой продукции, например, для космической отрасли, зачастую связан с производством единичной продукции, обладающей уникальными по сравнению с серийными аналогами характеристиками. При этом стоимость таких изделий может в десятки и сотни раз превышать стоимость серийной продукции. Существенный вклад в себестоимость наукоемких изделий вносят затраты на НИОКР. Снижение стоимости и, особенно, повышение качества такой продукции на основе грамотного применения современных моделей, методов и инструментов менеджмента качества, направленных на выявление потенциальных дефектов, их последствий, а также повышение функциональной полезности элементов конструкции и качества процессов производства на ранних этапах жизненного цикла продукции является актуальной задачей.

Решение этой задачи должно носить системный характер и включать:

- создание интегрированной системы информационной поддержки жизненного цикла изделий (CALS), позволяющей объединять данные о продукции, ее компонентах, технологии производства, условий и результатов ее эксплуатации для дальнейшего многоцелевого использования (построения моделей и исследования характеристик, анализа статистики сбоев и отказов, анализа и выбора поставщиков, определения возможностей для повышения качества, снижения затрат и др.);

- всестороннее изучение объекта проектирования с использованием различных моделей, анализ потенциальных отказов и снижение вероятности их возникновения, функционально-стоимостной анализ конструкций и процессов;

- разработку, оценку и анализ альтернативных вариантов конструкции и процессов производства, выбор наилучшего варианта с учетом множества критериев;

- планирование, организацию, внедрение, оценку и анализ результатов изменений; развитие системы.

Рассмотрим использование современного инструментария для решения задачи повышения качества продукции на примере соединительного кабеля для подключения диагностической аппаратуры.

В качестве основного компонента CALS выбрана система управления данными об изделии Windchill PDMLink. Построено дерево событий, позволяющее описать технологический процесс производства, внесены данные о результатах производства и эксплуатации кабеля. Руководство и сотрудники имеют возможность представлять информацию о полном жизненном цикле изделия, этапах его производства, а также проводить анализ не только на основе реальных данных, но также и прогнозировать изменения показателей качества в процессе эксплуатации.

Кабель состоит из нескольких деталей: свинцового корпуса - розетки, кондукта и обычного фитинга, соединяющего основную трубку кабеля с розеткой. В среде SolidWorks построена и исследована твердотельная модель кабеля. Прочностной анализ построенной модели и статистики ремонтов показал, что плавно переходящее крепление розетки в основную трубку кабеля является основным местом образования разрывов и трещин в конструкции. Для увеличения прочности соединения предложены следующие варианты: изменение материала кабеля; укрепление отдельных элементов соединения; изменение типа крепежа; изменение конструкции корпуса кабеля. Для выбора лучшего варианта использован метод FMEA - анализ причин и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis), результаты которого для кабеля приведены в табл. 1.

Табл. 1 – Результаты FMEA первоначальной конструкции

Вид потенциального дефекта	Последствия потенциального дефекта	S	Потенциальная причина	O	Методы обнаружения дефекта	D	ПЧР
Разрывы и трещины в соединении деталей	1. Порча оборудования	10	1. Разрушение фитинг зоны	8	1. Визуально	2	160
	2. Нечеткий сигнал, передаваемый кабелем	6	2. Разломы наконечника корпуса	4	2. Требуются специальные измерители	5	120
	3. Трудоемкость обслуживания	5	3. Изломы и трещины в проводах	6	3. Требуется специальная диагностика	6	180

Для всех потенциальных причин приоритетное число риска (ПЧР) больше предельных значений (ПЧР*=100). Принято решение о следующих изменениях в конструкции: увеличение диаметра поперечного сечения детали розетки, уплотнение стенок корпуса, фитинг адаптер заменяется на Adaptaflex, который увеличивает противостояние вибрационному действию и упрощает процесс опрессовки. После внесения изменений в конструкцию кабеля в среде SolidWorks вновь проведены испытания, произведен расчет характеристик надежности. ПЧР для всех последствий оказался в допустимых пределах.

В результате проведенного анализа соединение кабеля с аппаратурой оказалось более надежным, что значительно уменьшает возможность возникновения дефектов. Стоимость новых комплектующих Н-30 несколько больше первоначальной, однако, снижается время на диагностику, ремонт и обслуживание.

Одним из важных аспектов улучшения качества продукции на предприятии является уменьшение количества затрат исследуемого объекта относительно потребительского спроса. Для этих целей применен функционально-стоимостной анализ, в результате которого разработаны изменения конструкции корпуса кабеля: изменен принцип соединения деталей кабеля, многоэлементный корпус заменен на цельную деталь, что позволяет сократить время сборки и реализовать несколько функций одним элементом. Себестоимость изделия снижена в 1,8 раза.

Организация процессов информационного сопровождения на предприятиях, работающих в области высоких технологий

А.С.Мирошкин, О.В.Граецкая, Н.С.Пономарева

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

В современном мире вопрос организации системы информационного сопровождения процессов один из важнейших, в том числе и для предприятий, работающих в области высокотехнологичного производства. Существует множество различных технологий для организации систем информационного сопровождения процессов. При использовании технологий на основе «облачных» вычислений вся инфраструктура информационного сопровождения процессов НИР, ОКР и высокотехнологичного производства выносится в виртуальную среду – так называемое «облако». Есть два возможных варианта реализации данной технологии. Первый – предприятию предоставляется виртуальный сервер, отвечающий всем его требованиям. Второй – кроме сервера предприятию предоставляется виртуальное программное обеспечение. Использование программного обеспечения, находящегося на виртуальном сервере, позволяет организовать совместную удаленную работу сотрудников, что позволяет работать независимо от местонахождения. Существуют и ограничивающие факторы – стабильность работы виртуального сервера и защищенность данных, хранящихся на нем. А в случае с использованием виртуального ПО – его ограниченный функционал.

Ни один из существующих сервисов не позволяет организовать полноценного удаленного взаимодействия сотрудников в области высокотехнологичного производства. Проектируемый сервис – полнофункциональный веб-офис должен позволить предприятиям, работающим в области высоких технологий, перейти на удаленную работу. При этом должен быть реализован полный функционал совместной работы, и не должно страдать качество выполняемой работы. В результате проектирования был определен необходимый функционал: возможность совместного использования документов, создание и ведение БД,

организация командной работы, вспомогательные программы такие, как органайзер, личные заметки и календарь, клиент обмена сообщениями, возможность ведения проектов, внутренний форум, разработка и ведение веб- страницы компании, интеграция cmsoffice, наличие мобильной версии сервиса, возможность предоставления физического почтового адреса и виртуального факса, а также функция Ip телефонии для организации связи.

Так как данный сервис направлен на широкий круг компаний с различными потребностями, разработаны группы тарифов. Это базовые тарифы, определяющие основной набор предоставляемых функций: «Base», «Standard» и «Business». Кроме того, пользователи могут выбрать необходимый им объем дискового пространства для хранения файлов. Специальные функции сервиса, которые могут понадобиться только некоторым компаниям, были вынесены в отдельные опции. Они включили: службу поддержки клиентов, ведение сайта компании, возможность проведения видеоконференций, а также предоставление физического адреса и номера телефона.

Основными ограничивающими факторами при выборе «облачных» технологий являются беспокойство за сохранность данных, хранящихся в сети, а также возможность отсутствия стабильного доступа к сервису. При использовании современных технологий влияние данных проблем на работу сервиса практически сводится к нулю. В качестве оборудования для создания ЦОД рекомендуется выбирать современные blade-серверы. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными серверами. Для «облачного» сервиса это, прежде всего, высокая отказоустойчивость, стабильность работы, а также легкая масштабируемость. Для выбора подходящего оборудования было проведено сравнение популярных систем HPBladeSystemc-class, IBM Blade Center H, DellPower Edge 1955.Для нужд «облачного» веб-сервиса были выбраны Blade-системы BladeSystem c-class от компании HP, обладающие достаточной производительностью и более низкой ценой, по сравнению с системой от IBM, при этом у них больше отказоустойчивых компонентов, что важно для работы сервиса.

Для определения возможных причин перебоев в работе сервиса был проведен комплексный анализ, который включил в себя изучение внешних и внутренних факторов. Для анализа скорости доступа в сеть, которая зависит от провайдера,была собрана статистическая информация, которая содержит результаты замера скорости доступа в разные моменты времени. Внутренние факторы выявлены путем построения диаграммы Исикавы (рис.1). На основе этих факторов был проведен FMEA-анализ, который позволил на этапе проектирования выявить потенциальные дефекты. Для найденных дефектов были предложены возможные решения, которые позволяют сократить число потенциальных рисков.

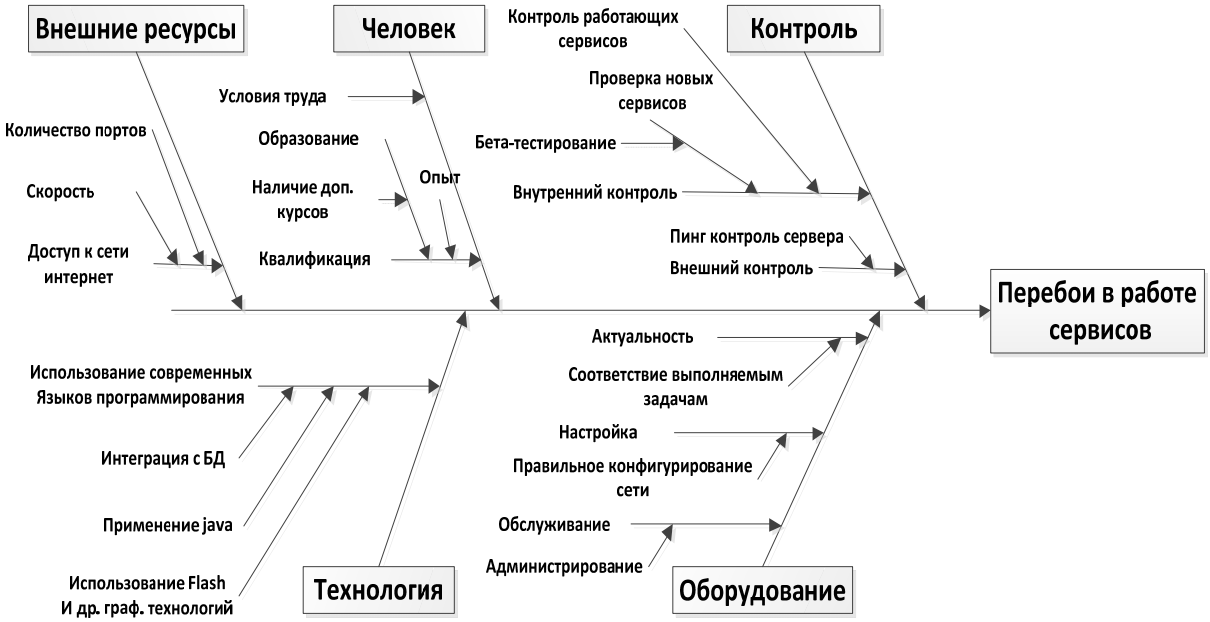


Рис.1 - Причины перебоев в работе сервисов

Модель сервиса полнофункционального веб-офис на основе использования облачных технологий предоставляет новую возможность организации процессов информационного сопровождения НИР, ОКР в высокотехнологичных производствах. В результате анализа факторов, влияющих на стабильную работу и безопасность, предложены улучшенные решения процессов информационного сопровождения на предприятиях.

Анализ и развитие системы технической поддержки высокотехнологичного предприятия (на примере ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия»)

А.А. Макрищев, Ю.С.Чусова, О.В.Граецкая

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Любому современному предприятию, использующему в работе информационные технологии, необходима система технической поддержки, целью которой является эффективная работа информационно-технической составляющей предприятия. Кроме того, целью технической поддержки является своевременное обновление всей техники и программных продуктов на производстве.

Предприятие ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» располагает сложной IT-инфраструктурой, непрерывное функционирование всех элементов которой является обязательным условием для выполнения своих основных функций. Helpdesk – информационная система технической поддержки, решения проблем пользователей с компьютерами, аппаратным и программным обеспечением. Это важная составляющая ITIL (IT InfrastructureLibrary – библиотека инфраструктуры информационных технологий) позволяет выявить проблемные участки инфраструктур, оценить эффективность работы информационно-технического отдела [1].

Структура системы технической поддержки предприятия приведена на рис.1.

Виртуальная система технической поддержки является современной специализированной версией распределенной службы. Она состоит из нескольких локальных служб, которые образуют единую (виртуальную) службу.В последнее время наблюдается тенденция реализации возможности самостоятельного получения помощи пользователями (самообслуживания - self-help) как форму «автоматизированной» функциональности системы.

Рис.1 – Структура системы технической поддержки сотрудников

На практике много времени уходит на обращение пользователя к оператору технической поддержки. Систему технической поддержки улучшить можно двумя способами. Во-первых, это замена программного обеспечения системы технической поддержки для быстрой регистрации и эскалации обращения сотрудника. В качестве второго способа улучшения предлагается использовать другую технологию регистрации обращений. А именно: использование тонового набора на телефоне оператора технической поддержки для пользователей по разрешению проблем с программными продуктами и персональными компьютерами. Большинство заявок решалось бы без участия сотрудников технической поддержки, а также уменьшило бы время решения заявки оператором технической поддержки.

В результате исследования процессов информационного обмена и изучения рынка программных продуктов в сфере технической поддержки предложено развитие системы технической поддержки сотрудников ООО «Кока-Кола ЭйчБиСиЕвразия»на базе нового программного обеспечения, что позволяет:

– сократить время выполнения заявки в IT-отделе;
– повысить скорость регистрации заявок;
– улучшить эскалацию заявок по специалистам и отделам;
– быстро обновлять технику и программное обеспечение.

С помощью метода анализа иерархий осуществлен выбор программного обеспечения для системы технической поддержки. Лучшей альтернативой для компании оказался программный продукт IntraService.

Проведенный анализ системы технической поддержки (IT-отдела) как системы массового обслуживания показал, что оптимальным будет расширение штата сотрудников до пяти человек, при этом затраты на содержание каналов обслуживания и затраты, связанныес пребыванием заявок в очереди, будут минимальны.

Таким образом, в результате проведенного анализа и моделирования можно утверждать, что внедрение программного обеспечения, такого как IntraService, позволит систематизировать обмен данными, регламентировать состав и формы представления данных, а также структуру информационных потоков в системе, значительно повысить точность и четкость их ведения, гарантировать их сохранность. Также система технической поддержки усовершенствована путем внедрения тонового набора в процесс решения проблемы оператором технической поддержки и добавлением в штат сотрудников IT-отдела еще двух специалистов. Все это приводит к слаженной работе сотрудников организации и во много раз увеличивает эффективность функционирования службы технической поддержки в целом.

Список литературы

1. Информационный бюллетень «JetInfo». HelpDesk возможности управления. №11/2003 г.

Модель эффективного генетического алгоритма решения многокритериальных оптимизационных задач

Е. Н. Бородулина, О.Н. Секунова

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Обеспечение эффективного использования природных и человеческих ресурсов, материальных и финансовых средств зависит от алгоритма поиска их оптимального соотношения. Генетические алгоритмы являются наиболее приемлемым классом, поскольку робастны (надёжны, устойчивы) по отношению к виду оптимизируемой функции и настраиваются для конкретной задачи путем подбора и комплектования основных генетических операторов. Актуальной задачей является разработка генетического алгоритма решения многокритериальных оптимизационных задач путем подбора генетических операторов по эффективности поиска решения [1].

При анализе эффективности операторов оцениваются такие критерии, как время работы алгоритма, точность получаемого решения, сходимость. Для анализа всего алгоритма также важны устойчивость к входным данным; требуемые ресурсы.

Анализ операторов скрещивания показал, что эффективными являются одноточечное и двухточечное скрещивание, пригодными могут быть также операторы универсального многоточечного и однородного скрещивания. Наименее предпочтительным в классе операторов мутации является оператор двухточечной мутации. Среди операторов отбора наилучшим является оператор турнирного вероятностного отбора, однако приемлем и пропорциональный рулеточный отбор и случайный.

При группировке операторов с целью повышения общей эффективности генетического алгоритма целесообразно выбирать стратегии аутбридинга, инбридинга, или стратегию «лучшая со всеми из родительского пула». Оценку пригодности полученного решения следует производить на основе стратегий любое пригодно или пригодно выше среднего. Для повышения эффективности генетических операторов можно использовать ряд стратегий. Выбор стратегии редукции (сокращения

количества возможных решений) зависит от последовательности использованных операторов в итерации, решаемой задачи и предпочтений ЛПР. Среди остальных стратегии наиболее эффективна стратегия перестановки, однако ее применения наиболее целесообразно в классе задач, где важна последовательность решений или элементов совокупности. Приемлемы стратегии элитизма и эпистаза.

Таким образом, выявлено, что абсолютных лидеров по эффективности в каждой группе не существует, эффективность зависит как от решаемой задачи, так и от предпочтений ЛПР, влияющих на важность критериев оценки алгоритмов

Проведенный анализ типов генетических алгоритмов показал, что эффективным является островной тип, позволяющий найти оптимальное решение за малый интервал времени, которому соответствует алгоритм с динамическим выбором генетических операторов в группе.

Для построения модели был разработан агрегированный показатель эффективности, включающий оценки параметров: точность решения (сходимость к оптимальному решению) – $Э_1$; время работы оператора до получения наилучшего решения – $Э_2$; разнообразие элементов совокупности – $Э_3$; устойчивость полученного решения – $Э_4$; требуемые ресурсы – $Э_5$; количество полученных элементов с пригодностью выше среднего (в процентах) – $Э_6$.

На основе весов этих критериев по важности, рассчитанных на основе метода коллективной оценки, была выведена формула расчета эффективности генетического оператора $Э$:

$$Э = 0{,}21 \times Э_1 + 0{,}11 \times Э_2 + 0{,}16 \times Э_3 + 0{,}15 \times Э_4 + 0{,}17 \times Э_5 + 0{,}21 \times Э_6 .$$

Однако эффективность генетического оператора может изменяться в зависимости от ранее использованных операторов, поэтому предложен поправочный коэффициент $И_{эi}$ (относительное изменение эффективности генетического оператора при условии нахождения в итерации генетических операторов из других групп) и общий показатель эффективности генетического оператора $Э_o$:

$$Э_o = Э \times И_{эi}, \text{ где}$$

i - генетический оператор из другой группы, находящийся на предыдущем шаге от исследуемого.

Вероятность P реализации генетического оператора равна его эффективности:

$$P = Э_o = И_{эi} \times (0{,}21 \times Э_1 + 0{,}11 \times Э_2 + 0{,}16 \times Э_3 + 0{,}15 \times Э_4 + 0{,}17 \times Э_5 + 0{,}21 \times Э_6).$$

Поэтапная схема генетического алгоритма с динамическим выбором генетического оператора в группе для определения количества элементов выглядит, как показано на рис. 1.

№ поколения	Группирование	Скрещивание	Количество элементов в i итерации	Мутация	Количество элементов в i итерации / после скрещивания	Отбор	Количество элементов	Оценка пригодности	Количество элементов в следующей итерации
i	$Э_{бг}$	$Э_{бс}$	N_i	$Э_{бм}$	N_i/N_c	$Э_{бо}$	$N_c/N_{c+м}$ /$N_м$	$Э_{бп}$	N_{i+1}

Рис. 1 Схема генетического алгоритма с динамическим выбором генетического оператора в группе

При этом возможны четыре стратегии поведения генетического алгоритма с разным требуемым количеством элементов: только скрещивание: $Э_{6гi} * Э_{6сi} * N_i * Э_{6оi} * Э_{6пi} = N_{i+1}$; только мутация: $Э_{6mi} * N_i * Э_{6оi} * Э_{6пi} = N_{i+1}$; скрещивание, а потом мутация: $Э_{6гi} * Э_{6сi} * N_i * Э_{6mi} * Э_{6оi} * Э_{6пi} = N_{i+1}$; одновременно скрещивание и мутация: $(Э_{6гi} * Э_{6сi} + Э_{6mi}) * N_i * Э_{6оi} * Э_{6пi} = N_{i+1}$.

Таким образом, предложена модель генетического алгоритма с динамическим выбором генетических операторов в группе, учитывающая четыре возможные стратегии развития.

Список литературы

1. Петров Ю.Ю. Управляемые генетические алгоритмы, основанные на статистике. // Вторая Всероссийская научная конференция «Нечеткие системы и мягкие вычисления». г. Ульяновск. 2008 г.

Алгоритм выбора эффективной системы отопления зданий

А.В. Петракова, Е.В. Корохова, И.С. Шабаршина

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Одной из актуальных проблем в области систем жизнеобеспечения зданий является энергосбережение. Мониторинг задач этой проблемы показывает, что наиболее важным звеном в ее решении является рациональное использование тепловой энергии. Добиться максимального энергосбережения при использовании систем отопления возможно при применении таких приборов и устройств, которые оптимальными по затратам управления температурой в помещении, создают комфортные условия, а также имеют возможность дистанционного управления обогревом. В настоящее время рынок предлагает различные варианты осуществления теплоснабжения зданий. Каждое такое решение имеет свои особенности, достоинства и недостатки. Эффективность того или иного способа реализации системы отопления зависит от множества факторов, поэтому актуальной является задача разработки алгоритма, позволяющего с учетом множества критериев определить наилучший вариант теплоснабжения здания.

Алгоритм выбора эффективной системы отопления состоит из следующих этапов: определение критериев оценки эффективности альтернативных вариантов; определение параметров помещения (назначение, площадь, местоположение); анализ рынка и формирование альтернативных вариантов (расчеты: физико-технических показателей системы на основе математических моделей, экологичности, надежности, безопасности, экономических затрат на проектирование, монтаж, эксплуатацию и др. по вариантам); и, наконец, выбор наилучшей системы отопления по критериям.

К основным функциям системы отопления можно отнести регулирование температуры теплоносителя для изменения температуры воздуха в помещении, а также поддержание заданного температурного режима при изменении внешних условий.

Рассмотрены наиболее популярные виды систем отопления, их математическое описание и особенности (табл. 1), необходимые для

определения показателей эффективности системы отопления и расчета проектных характеристик.

Таким образом, в работе разработан алгоритм выбора эффективной системы отопления зданий, который может быть использован для принятия решений при управлении проектами в строительстве и архитектуре.

Табл. 1 – Виды систем отопления

№	Сис-тема	Математическое описание	Достоинства	Недостатки
1.	Радиаторная	$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{R_{ист}*(T_{ист}-T_1)}{C_1*V_1} - \frac{C_к*(T_1- \\ \quad - \frac{R_{внеш}*(T_1-T_{внеш})}{C_1*V_1} \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{C_к*(T_1-T_2)}{C_2*V_2} \end{cases}$ где $R_{ист}$ – сопротивление излучения (теплопередачи теплоносителя); $R_{внеш}$ – сопротивление излучения во внешнюю среду; $C_к$ – теплоемкость контура; $T_{ист}$– температура теплоносителя (°С); T_1– температура воздуха в помещении (°С); T_2 – температура контура (°С); $T_{внеш}$– температура внешней среды, C_1– удельная теплоемкость воздуха; C_2 – удельная теплоемкость контура; V_1 – объем помещения; V_2 – объем контура	• относительная простота и дешевизна монтажа; • ремонтопригодность; • относительно небольшой водяной контур	• высокое потребление энергии; • образование конденсата на стенах; • конвекционные потоки – источники сквозняков и циркуляции пыли
2.	Плинтусная		• равномерное распределение тепла по высоте и периметру помещения; • отсутствие активной конвекции • комфортный микроклимат	• необходимо обеспечить свободное движение теплого воздуха от стен
3.	Теплый водяной или электрический пол		• экономичность; • быстрый нагрев пола и воздуха в помещении; • продолжительный срок службы; • компактность и надежность; • исключение из интерьера внешних отопительных труб и радиаторов; • широкий выбор вариантов нагрева теплоносителя; • минимальное обслуживание.	• ограничения на использование; • невозможность ремонта; • возможность протечек для водяного варианта; • ограничения по расстановке мебели на участках пола с подогревом

№	Сис-тема	Математическое описание	Достоинства	Недостатки
4.	Воздушная	$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -W\frac{\partial t}{\partial x} + D_L\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{D_z}{Z}\frac{\partial}{\partial Z}(R\frac{\partial t}{\partial Z})$ где D_L и D_Z коэффициенты соответственно продольного и радиального перемешивания, W – объемная скорость потока.	• очень высокий санитарно-гигиенический показатель	• значительные размеры воздуховодов, • сложность регулирования • повышенные требованиями к герметизации зданий
5.	Пассивные системы солнечного отопления	$t_v \le t \le t_m E_{90} = A\sin\omega_1(t - t_v)$; $t_m \le t \le t_e E_{90} = A\sin\omega_2(t - t_k)$; где E_{90} – плотность потока солнечной радиации на вертикальную поверхность (Вт/м^2), E_s – суточная сумма солнечной радиации (Дж/м^2), t_m – «центр» импульса солнечной радиации; tv, te – время восхода и заката, соответственно. $A = E_s\frac{\omega_1\omega_2}{(\omega_1+\omega_2)}$, $\omega_1 = \frac{\pi}{2(t_m - t_v)}$, $\omega_2 = \frac{\pi}{2(t_m - t_v)}$, $t_k = 2t_m - t_v$ [2].	• экономичны в эксплуатации; • подходят для большинства регионов; • экологичны	• высокая стоимость; • необходима система аккумуляторов
6.	Инфракрасного отопления	$Q_i^p = \sum_k (a_{ki} * T_k^4 + g_{ki} * T_k) + g_i^0$, $\sum_k (a_{ki} * T_k^4 + g_{ki} * T_k) + g_i^0 - gQ_i^p$, где $a_{ki} = \varepsilon_k * \sigma_0 * F_k(\psi_{ki} * \varepsilon_i \quad \delta_{ki})$ – коэффициенты радиационного обмена, g_{ki} – коэффициенты конвективного обмена, g_i^0 – слагаемые, не зависящие от зональных температур; T_k – температура k-й зоны, Q_i^p – поток результирующего излучения i-й зоны; ε_k – интегральная степень черноты k-й зоны; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, F_k – площадь k-й зоны, ψ_{ki} – обобщенные разрешающие угловые коэффициенты; δ_{ki} – символ Кронекера; l_1 – число зон II рода; l – общее число зон.	• возможна организация локального отопления, единственный вид отопления, позволяющий организовать эффективный обогрев открытых пространств	• существенные затраты электроэнергии

Разработка, анализ и оптимизация производительности онлайн табло

В.И. Кривенко, Н.С. Пономарева, И.С. Шабаршина

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Онлайн табло – упорядоченность произошедших событий по времени, с указанием подробной информации, представленной в виде специальной веб-страницы с открытым доступом. В работе создается онлайн табло аэропорта, с основной задачей - предоставление достоверной и актуальной информации пассажирам о текущих и предстоящих событиях в рамках данной предметной области. Событиями являются прилеты и отлеты самолетов.

Весь процесс работы можно разделить на пять этапов: системный анализ деятельности онлайн табло и аэропорта в целом; анализ инструментария разработки; объектно-ориентированный анализ и моделирование; разработка информационной системы; анализ и оптимизация производительности онлайн табло.

На первом этапе оценивается общая организационная структура и информационные потоки системы «онлайн табло аэропорта», а также описываются технологические требования, ставится задача разработки онлайн табло. Второй этап посвящен анализу и выбору инструментария, необходимого для разработки онлайн табло, также производится отбор данных средств по заданным критериям. На третьем этапе проектируются UML диаграммы, исходя из выбранных инструментов и на основе полученных данных создается исходный код онлайн табло. Четвертый этап описывает процесс разработки информационной системы «онлайн табло аэропорта», исходя из технического задания ОАО «Аэропорт Ростов-на-Дону». Создается классовая структура, разрабатывается функционал обработчика данных рейсов. На основе полученных результатов принимаются корректирующие воздействия, проводиться повторный анализ производительности онлайн табло с целью расчета эффективности проведенных мероприятий.

Для исследования производительности онлайн табло, необходимо произвести замеры следующих параметров: количество запросов к серверу; длительность входящих запросов; время полного исполнения; количество обрабатываемых записей; среднее время обращения к базе данных; среднее время применения шаблона; затрачиваемые процессорные ресурсы; затрачиваемые ресурсы памяти; количество сброшенных скриптов; скорость очистки хранилища; скорость заполнения хранилища.

Замеры подобного рода должны проводиться в условиях реального пользования порталом. Замеры необходимо проводить в течение длительного времени для получения достаточно полного и точного результата.

На основании сроков эксплуатации, исполнения, а также актуальности получаемых данных, принято решение привести исследование в течение 30 календарных дней. Как видно из диаграммы на рис1., процесс имеет неустойчивый характер, хотя каждый элемент в отдельности довольно монотонен.

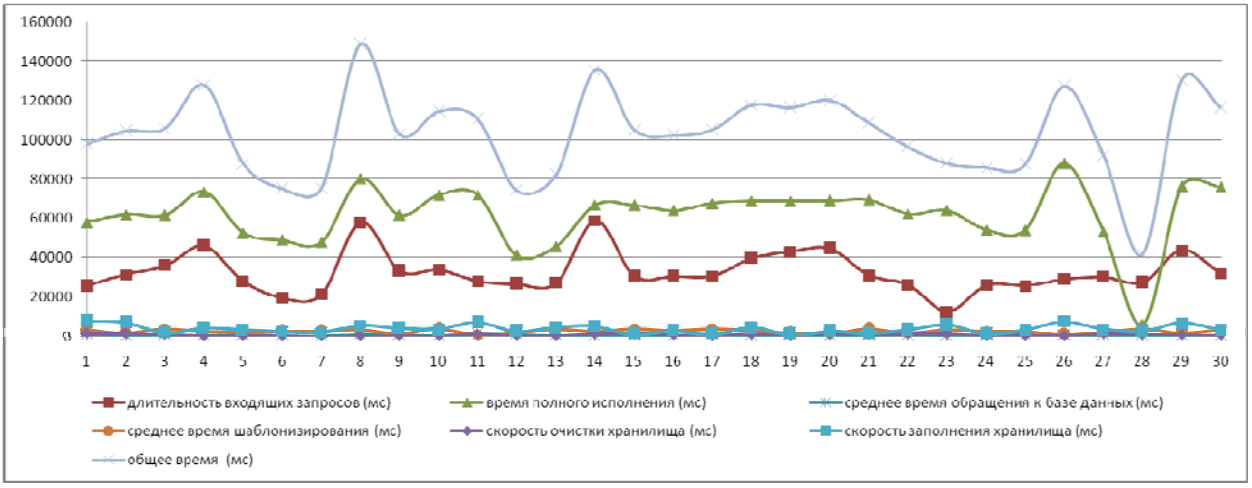


Рис.1 - Временное распределение исполнения участков процесса (мс)

Можно выделить целый ряд проблем: долгое время исполнения; большие серверные затраты; большое число неудачных завершений процессов; большой временной разброс и не стабильность процесса; дублирование запросов; постоянное обращение к базе с монотонными данными.

Для устранения этих проблем необходимо реализовать ряд мероприятий: провести рефакторинг и реинжиниринг кода; изменить

формат хранения файловой выгрузки на файлы JSON; изменить формат хранения сформированных данных; изменить метод вывода шаблона на JS-шаблон; провести перенастройку серверного оборудования под технологию front-back-end.

Результаты повторных замеров данных после проведенных мероприятий представлены на рис.2 и 3.

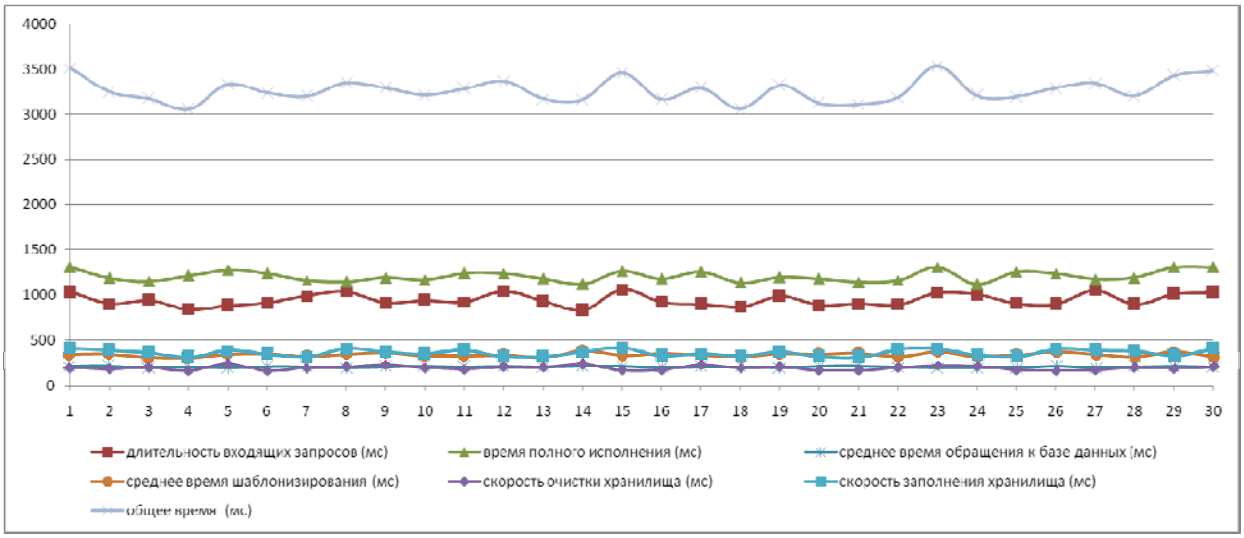


Рис. 2 - Временное распределение исполнения участков процесса (мс)

Рис. 3 - Диаграмма сравнения

В сравнении с первоначальным положением, текущая линия затрат является практически прямой, а число запросов сократилось на 50%. Это связано в первую очередь с реинжинирингом и рефакторингом, что позволило сделать исходный код стабильнее, а также переход от PHP шаблона, к шаблону выполняемом на клиентском JavaScript. Это доказывается еще и стремлением к нулю числа скриптов, кончивших свою работу неудачей. Общее снижение расхода времени напрямую связано с перестроением архитектуры сервера.

Перспективные подходы для создания сложных анимированных моделей, функционирующих на мобильных устройствах

В.Н.Михайличенко

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Хотя за прошедшие пятьдесят лет было создано много разных типов компьютерных обучающих программ и программных комплексов, сегодня неоспоримое превосходство приобрели системы интернет-образования (e-Learning). Эти системы строятся на фундаменте наиболее активно развивающейся области информационных технологий — веб-технологий.

За последние 10 лет принципы функционирования мировой информационной паутины дважды пережили почти революционные потрясения, что существенно изменило роль и значение веба. Первое было связано с распространением идей Web 2.0, которые обеспечили пользователям информационных ресурсов механизмы полноценной обратной связи. Это принципиальным образом изменило формы сетевой активности. Из пассивных потребителей информации пользователи превратились в активных создателей контента.

Второй технологический прорыв связан с мобильными системами, которые уже пять лет быстро и последовательно расширяют свою долю рынка. Смартфоны, планшетные компьютеры и мобильный интернет становятся неотъемлемой частью нашей жизни.

Сейчас на повестке дня остро стоит вопрос, как должны выглядеть обучающие системы, которые одинаково удобны для использования во всем спектре компьютерных устройств. Это многоплановая проблема, в которой технические решения тесно переплетены с инструментарием и педагогикой, применяемыми для создания онлайн учебных материалов.

Еще в 1990-е годы одним из неоспоримых преимуществ компьютерных технологий в обучении стала техника создания анимаций, позволяющая строить виртуальные интерактивных модели объектов практически любой сложности. Здесь долгие годы не было конкурентов у технологии Adobe Flash, но по нескольким причинам в последние три года

её позиции сильно пошатнулись. В качестве альтернативного решения все чаще стали использоваться анимации, выполненные средствами HTML 5. Равноценна ли эта замена?

Однозначного ответа нет, потому что свои достоинства и недостатки есть у каждой стороны. HTML 5 действительно позволяет создавать анимации стандартными для веб-технологий средствами (HTML+CSS+Javascript). В целом этот процесс менее трудоемкий, чем создание flash-роликов. Чтобы не терять позиции, компания Adobe выпустила новый инструмент Adobe Edge, упрощающий разработку. Однако речь идет, в первую очередь, о достаточно простых виджетах для веб-страниц.

Не будет преувеличением утверждать, что компьютерные обучающие системы наиболее эффективны в тех случаях, когда обучаемый уже имеет твердую основу профессиональных знаний (магистратура, повышение квалификации, переподготовка). В этом случае обычно изучается материал повышенной сложности, а разрабатываемые виртуальные модели должны демонстрировать сложные процессы и устройства в форме, близкой к реальной.

В качестве примера сложных многофункциональных анимированных учебных ресурсов, в разработке которых принимала участие автор, можно привести проект НОЦ «Нанотехнологии» ТТИ ЮФУ (http://nanoscience-edu.sfedu.ru/). Создание таких ресурсов средствами HTML 5 невозможно.

Нужно учитывать, что в настоящее время есть тенденция создавать технические руководства, прилагаемые к объектам сложной техники и приборам, в виде, аналогичном учебным материалам. Планшетные компьютеры и смартфоны с доступом в Интернет в ближайшее время могут стать незаменимым инструментом для наладчиков оборудования, ремонтных бригад и других технических служб. Для этого нужно создать экспертные системы диагностического типа, которые позволят находить для каждой ситуации сетевой учебный ресурс, который учит, как исправить положение.

Однако именно в таких типах мобильных устройств впервые произошел публичный отказ от поддержки технологии Adobe Flash. Нужно отметить, что, компания Microsoft создавала свой продукт Silverlight как альтернативу Flash. Но в 2011 году заявила об отказе от его развития. Есть ли компромиссные решения?

Веб-браузеры являются программой, устанавливаемой и запускаемой на компьютерной системе. Другие приложения также могут работать в сети. Компания Adobe предлагает для их создания технологию Adobe AIR, которая позволяет использовать HTML/CSS, Ajax, Flash и Flex.

Для запуска AIR-приложений требуется среда выполнения Adobe Integrated Runtime. Она доступна для мобильных устройств, на платформах Android и iOS, т.е. в самой проблемной для Flash области.

Можно сделать следующие общие выводы.

1. Возможности HTML 5 пока недостаточны для создания сложных интерактивных анимированных моделей.

2. Несмотря на отказ от поддержки технологии Flash для браузеров ряда мобильных систем, есть выход — создание автономных AIR-приложений.

Универсализация формата электронных учебников для отображения на различных типах компьютерных устройств

М.А.Попова

Факультет высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Хотя на сегодняшний день существует много разных концепций создания электронных учебников, лишь часть из них отвечает тем возможностям, которые предоставляет сеть Интернет. В мировой информационной паутине можно найти учебники многих типов, но значительная часть из них создана в форматах, используемых для бумажных документов doc, djvu и др. В таких учебных ресурсах практически отсутствует интерактивность, которая является одним из главных достоинств, обеспечиваемых системами интернет-образования. В

связи с этим весьма актуальна задача разработки универсального формата сетевого учебного ресурса, отвечающего современным требованиям.

Помимо интерактивности, одним из важнейших современных требований к электронным учебникам является их доступность и равные удобства работы на компьютерных устройствах с разными техническими характеристиками (смартфоны, планшетные и настольные компьютеры).

Эта проблема уже несколько лет является общей для веб-дизайна. Но недавно созрели предпосылки, позволившие сформулировать принципы так называемого "отзывчивого веб-дизайна" (Responsible Web Design, RWD). Это не только технология верстки макета сайта, которая позволяет корректно отображать его на всех устройствах, имеющих выход в интернет, но и новый процесс разработки. Технология RWD основана на свойствах, введенных спецификацией стилевых таблиц CSS3, которые поддерживаются всеми современными браузерами. Это применение медиа-запросов и использование макета на основе гибкой сетки и гибких изображений. Проектирование сайтов начинается с версии для мобильных устройств, которая затем последовательно преобразуется в варианты для устройств с более высокими характеристиками.

Так как основным принципом RWD является обеспечение удобства работы с информационным источником с любых устройств, то сайты на разных устройствах должны выглядеть по-разному. Например, если для настольных компьютеров удобны текстовые ссылки, то на мобильных устройствах с сенсорными экранами эти ссылки логично заменить кнопками. Однако RWD определяет только макет сайта, т.е. расположение информационных блоков, которые еще должны быть наполнены содержанием. Несмотря на внешнее разнообразие электронных учебников, список структурных элементов, из которых строится их контент, относительно небольшой.

Если для электронного учебника имеется готовая структура материалов, то возникает задача её отображения на макет "отзывчивого" сайта. Для этого необходимо формализовать соответствие структурных

элементов электронного учебника и разметки веб-страницы, описываемой тегами HTML 5.

Как универсальный подход для описания структуры и разметки элементов содержания электронных учебников можно использовать специализированный язык на основе XML. С этой целью был разработан компактный и несложный xml-словарь, который при необходимости может быть расширен. Для преобразования xml-документов в html-формат применяется несколько технологий, основанных на спецификациях SAX, DOM, XSLT и др. Если xml-формат оговорен, то достаточно один раз разработать конвертер, и применять его к содержанию любых учебников, имеющего требуемую xml-структуру. В результате будет получен документ, который будет легко встраиваться в ранее разработанный макет "отзывчивого" сайта.

Аппаратно-программный комплекс для экспресс-диагностики и коррекции функционального состояния организма человека

В.И. Бондин, Л.П. Белов

Южный федеральный университет, г.Ростов-на-Дону, Россия

Для экспресс-диагностики и коррекции функционального состояния организма человека предлагается аппаратно-программный комплекс.

Комплекс состоит из цифрового анализатора кардиоритмов выделяемых из электрокардиосигнала в широкой полосе частот (Глобал-М). Анализатор определяет параметры состояния адаптационных возможностей организма, вегетативной системы, энергообеспечения, биологический возраст. Методика позволяет отслеживать динамику происходящих изменений при занятиях физкультурой и спортом, а также определять эффективность лечебно-профилактических мероприятий.

Аппаратно-программный комплекс содержит различные устройства по рефлексотерапии. Для воздействия на рефлекторные точки кистей рук предлагается «Устройство для рефлексотерапии» Патент № 113657 от 27.02.2012г.

Преимуществом предлагаемых устройств является используемый стабильный сегнетопьезоэлектрический генератор нажимного рычажного сжатия сегнетопьезоэлементов, имеющий “п” секционные сегнетопьзоэлектрические модули, обеспечивающие импульсное стимуляционное воздействие на “п” рефлекторные точки кистей рук, в конструкциях ручных опорных снарядов спортивного и бытового инвентаря.

Устройства позволяют совмещать одновременное выполнение движений лечебной физкультуры и тренировки со стимуляцией рефлекторных точек рук, а покрытие за счет самоклеющего фактора, из магнитофорного слоя, который имеет подложку из материала по новой технологии (патенты РФ № 2214843, 2251534, 2262361) с определенной ориентацией магнитных полей в рабочих зонах углублений под пальцы рук и проводящего слоя, передающего импульсное воздействие на БАТ и зоны «Захарина-Геда» значительно усиливает положительный терапевтический эффект воздействия на пациента.

Для магнитоэлектростимуляции и рефлексотерапии «избранных» зон стоп предлагается устройство «Круг здоровья».

Апробация данных устройств показала их достаточную эффективность в группах пациентов с ишемической болезнью сердца, с хроническим бронхитом и бронхиальной астмой, а также качественную работу в системах комплексного компьютерного исследования состояния организма человека объединенного с кардиотренажерными блоками оснащенными тренеровочными компьютерами с возможностью воздействия магнито-импульсно-акупрессурно-массажного воздействия на «БАТ» и зоны «Захарина – Геда».

В программном обеспечении предусмотрена возможность автоматического ввода таких параметров, как: артериального давления, температуры тела и содержания алкоголя в выдыхаемом воздухе. Для исключения возможности фальсификации данных обследования производится идентификация по фотографии и отпечатка пальца пациента.

Аппаратно-программный комплекс позволяет в достаточно короткое время проводить диагностику и коррекцию функционального состояния организма человека и может быть использован в различных медицинских, спортивных, фитнесс клубах и других физкультурно-оздоровительных учреждениях.

Проблемы астероидно-кометной опасности земли

Гориш А.В., Панов Д.В., Пономарев С.А., Рубцов И.С.

НОУ «ИПК Машприбор», г. Королев, Россия

Ученые доказали, что многокилометровые небесные тела способны уничтожить всю биосферу Земли, при падении в океанскую акваторию могут вызвать гигантские цунами, уничтожить крупные города, государства, дезорганизовать человеческую жизнь во всех сферах деятельности. Этой проблеме всё большее внимание уделяют ведущие государства мира, она обсуждалась в ООН, в Конгрессе США, в Палате Лордов Великобритании и в других организациях государств мира. Результаты этой деятельности обеспечили принятие постановлений и резолюций, важнейшей из которых является Резолюция 1080 «Об обнаружении астероидов и комет, потенциально опасных для человечества», принятая в 1996 году Парламентской Ассамблеей Совета Европы.

Глубокое изучение этой проблемы проводится Межрегиональной общественной организацией «Российская Академия космонавтики им. К.Э.Циолковского» с привлечением крупных ученых РАН, РАКЦ, высококвалифицированных специалистов предприятий Роскосмоса (А.С. Коротеев, Н.Н. Пономарев-Степной, Г.Г. Райкунов, А.Т. Базилевский, А.В. Зайцев, А.А. Клаповский, Д.В. Петров, А.И. Ткаченко, Э.Г. Чистов, Т.В. Шингарева, О.Н. Шубин, Б.Д. Яковлев, А.Г. Сокольский, В.А. Котин, А.М. Ковтуненко, И.В. Бармин, В.П. Савченко, Ю.П. Семенов, В.А. Меньшиков и др.

В нашей солнечной системе (СС) в пространстве между планетами движутся мириады более мелких объектов, так называемых малых небесных тел – метеороидов, астероидов и комет.

Метеороидами называют самые мелкие тела Солнечной системы, размером от нескольких микрон (межпланетная пяль) до нескольких дециметров или метров. Они образуются в результате дефрагментации более крупных небесных тел – астероидов и ядер комет при их столкновениях, а также вследствие уноса твердых частиц потоками испаряющихся газов с поверхности кометных ядер.

Если метеороид входит в атмосферу Земли, а скорость входа может достигать 70 км/с, то в зависимости от его размеров, он или сгорает или достигает поверхности нашей планеты. Самые мелкие метеороиды обычно сгорают на высотах примерно 80-100 км. Такие явления называются метеорами или еще – «падающими звездами».

Тела размером от долей метра и до нескольких метров более глубоко проникают в атмосферу и затем разрушаются. Процесс их разрушения сопровождается яркой вспышкой. Такие явления называют болидами, а их осколки, которые падают на поверхность Земли – метеоритами. Наша задача представить читателям влияние метеороидов, астероидов и комет на безопасность человеческой жизни на Земле.

Астероиды

Астероидами являются малые тела СС, которые вращаются вокруг Солнца по орбитам между орбитами Марса и Юпитера, в главном поясе астероидов.

Некоторые астероиды из-за гравитационного воздействия планет изменяют свои орбиты приближаясь к другим планетам СС, в том числе, и к Земле. Такие астероиды называют астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). К этому классу принято относить астероиды, приближающиеся к орбите Земли на расстояние менее 0,3 астрономических единиц. Астрономическая единица (а.е), соответствует расстоянию от земли до Солнца примерно 150 млн. км. Все астероиды представляют

собой тела неправильной формы (рис.1), размером от нескольких метров до сотен километров.

По составу их вещества астероиды условно делятся на три основные группы – каменные, каменно-металлические и металлические. Плотность составляет от 1,2 до 5,8г/см^3, а отражательные свойства 0,02÷ 0,63. Астероиды вращаются вокруг собственной оси, период вращения составляет от единиц до десятков часов. Российские ученые обнаружили, что в метеорных потоках, пересекающих орбиту Земли, также движутся довольно крупные объекты [2]. Все АСЗ движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам (рис.2). Периоды их обращения вокруг Солнца лежат в диапазоне от 0,4 до 75 лет. Плоскости орбит многих АСЗ лежат в плоскости орбиты Земли, некоторые из них достигают 72,1 градуса. При столкновении с Землей скорости АСЗ могут достигать от 11,2 до 40км/с, 72 км/с (поток Леониды).

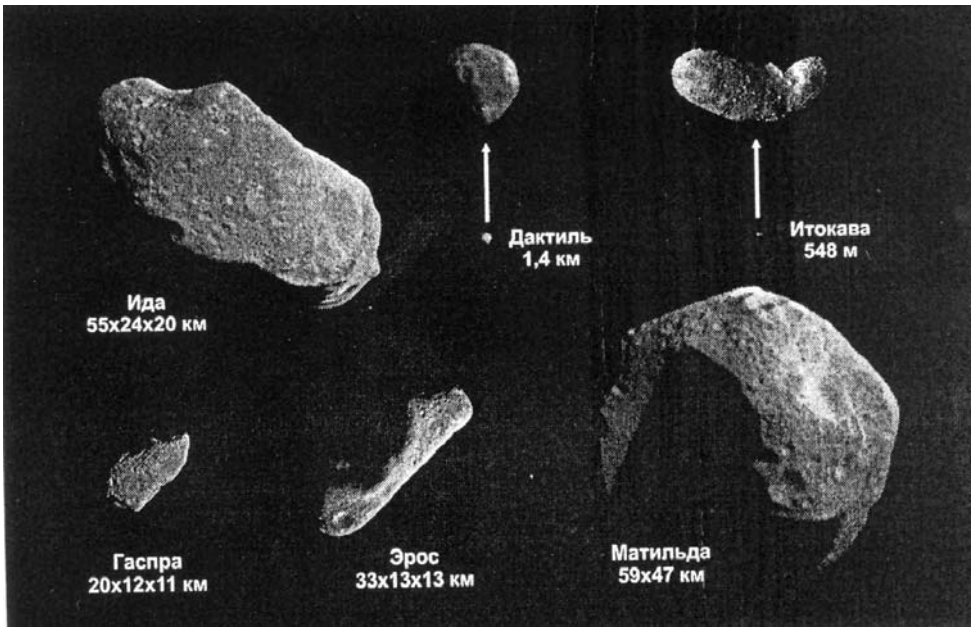


Рисунок 1 - Изображения астероидов, полученные с помощью космических аппаратов

Фото: NASSA (США), ISAS (Япония)

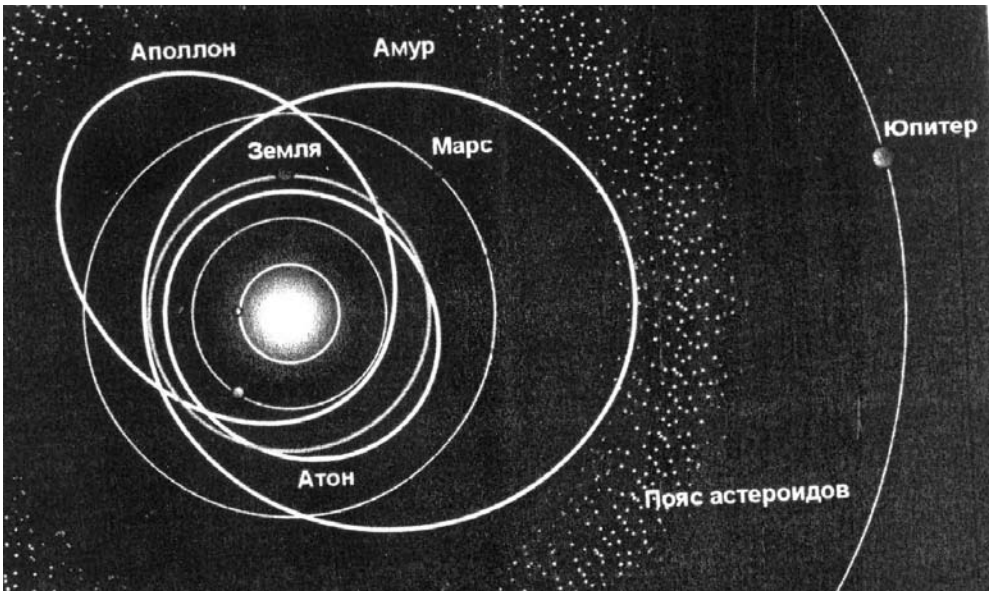


Рисунок 2 - Типы орбит астероидов, сближающихся с Землей

По характеру орбит АСЗ разделяют на четыре группы, отличающиеся тем, что по отношению к орбите Земли они преимущественно расположены:

- с внешней стороны (астероиды типа Амура);
- с внутренней стороны (астероиды типа Амура);
- вблизи орбиты Земли (астероиды типа Аполлона);
- внутри орбиты Земли (астероиды).

Кометы

Название **“комета”** (“звезда с хвостом”) происходит от греческого слова kometes. Так называют малые тела Солнечной системы, которые движутся в основном по вытянутым орбитам и у которых с приближением к Солнцу появляется газо-пылевая оболочка с “хвостом” (рис. 3).

Большинство комет сосредоточено за границами СС в так называемом облаке Оорта, а также в поясе Койпера, расположенном за орбитой Нептуна. Кометные пояса имеются и между планетами-гигантами - Юпитером, Сатурном, Ураном и Нептуном.

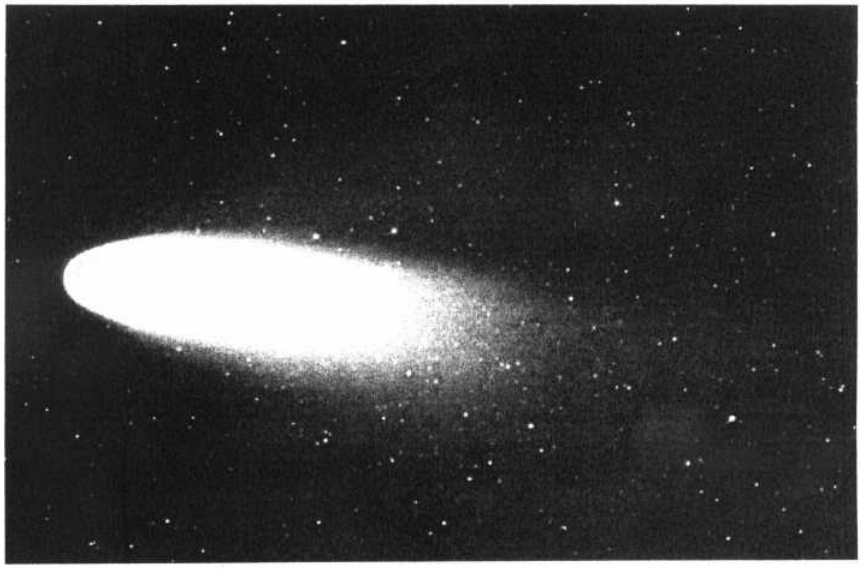


Рисунок 3 - Комета Хэйла-Боппа

За счет возмущающего воздействия ближайших к нам звезд и, возможно, гипотетического спутника нашего Солнца - Немезиды, галактических газопылевых облаков, планет, а также столкновений друг с другом, ядра комет сходят со своих орбит и приближаются к Солнцу. Среди них встречаются **кометы, сближающиеся с Землей (КСЗ).** Их орбиты приближаются к орбите Земли и иногда пересекают ее. Такие кометы, как и астероиды, могут сталкиваться с Землей.

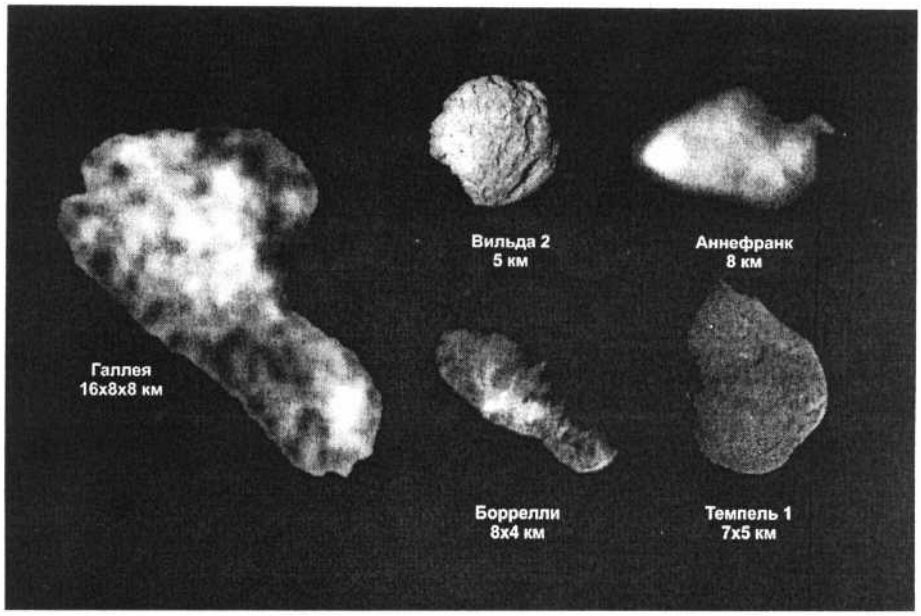


Рисунок 4 - Изображения ядер комет, полученные с помощью космических аппаратов

Фото: ИКИ, НПО им. С. А. Лавочкина (СССР). NASA (США)

Ядра комет представляют собой тела неприцельной формы (рис. 4), размером от 300 м до 50 км и возможно больше [3]. Они состоят из смеси водяного льда и пыли с вмороженными легколетучими веществами, а их поверхность покрыта пылевой коркой, толщиной до 1 м.

При приближении к Солнцу на расстояние 4-5 а.е., что примерно соответствует радиусу орбиты Юпитера, начинается испарение этих веществ и вокруг ядра образуется газо-пылевая оболочка - кома. Ее диаметр может достигать от нескольких тысяч до 2-х миллионов километров. Ядро вместе с комой составляют голову кометы.

Под действием светового давления газо-пылевая компонента начинает удаляться от ядра кометы в сторону, противоположную направлению на Солнце, и вытягивается в длинный шлейф, называемый хвостом кометы. Длина хвоста может достигать 200 миллионов километров.

Плотность вещества комет составляет от 0,1 до 1,5 г/см^3, а отражательные свойства поверхностного слоя составляют 0,01÷0,05.

Кометы вращаются вокруг собственной оси. Период их составляет от нескольких часов до 14 суток.

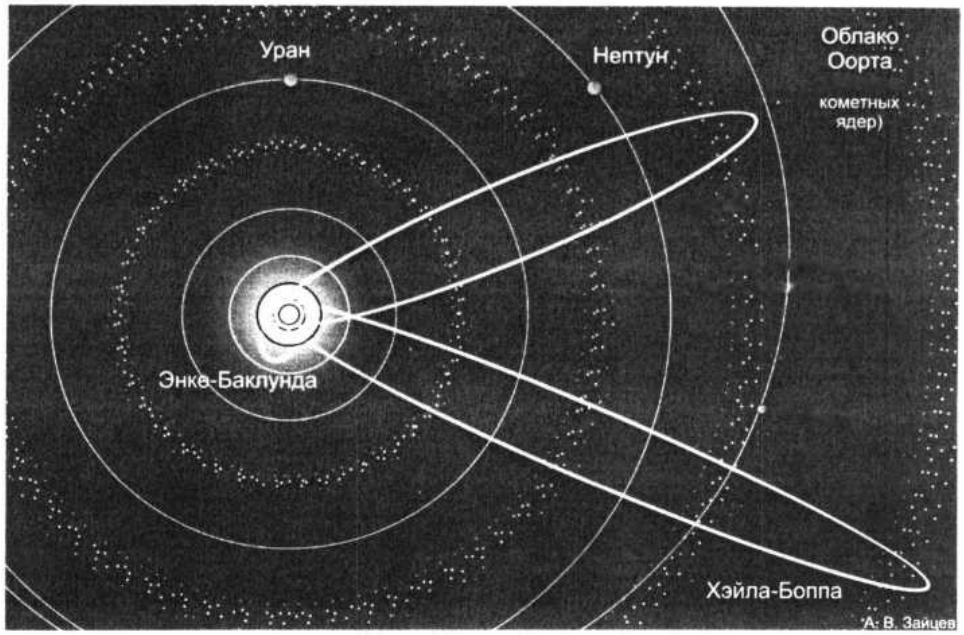


Рисунок 5 - Типы орбит комет сближающихся с Землей

КСЗ разделяют на долгопериодические и короткопериодические; с периодом обращения более 200 лет называют долгопериодическими (рис.5). Примером долгопериодической кометы является пролетевшая в 1997 году комета Хэйла-Боппа, имеющая период около 2 000 лет.

Кометы с периодами менее 200 лет называют короткопериодическими, которые подразделяют на семейства Юпитера и других планет-гигантов, в зависимости от того, в районе орбиты какой из этих планет находится их афелий. Типичным представителем короткопериодической является комета Галлея, относящаяся к семейству Нептуна. Ее афелий находится в районе пояса Койпера.

Таким образом, из изложенного следует, что в непосредственной близости Земли периодически пролетают астероиды о кометы, которые в любой момент могут столкнуться с ней.

Последствия столкновений Земли с астероидами и ядрами комет

Исследования СС с помощью космических аппаратов (КА) показали, что все небесные тела, имеющие твердую поверхность, покрыты кратерами. Причем подавляющее большинство из них имеют ударное происхождение. Это заставило пересмотреть концепцию о роли процессов столкновения в формировании и эволюции планет и их спутников [4-6]. Оказалось, что столкновения небесных тел оказывают мощное влияние на их строение и облик. Это обеспечило развитие теоретических и экспериментальных исследований в области физики взрыва, в том числе – ядерного, исследования кратеров, образовавшихся после взрывов. Процессы высокоскоростного удара подробно изложены в монографии Т. Мелоша [6]. Размеры образовавшихся кратеров при скорости соударения 20 км/с, могут превышать диаметр ударного тела примерно в 100 и более раз.

Для крупных тел, земная атмосфера уже не является серьезной помехой. Объекты размером в десятки метров сохраняют значительную скорость до соударения с поверхностью Земли.

Если объект - рыхлое тело типа ядра кометы, то оно разрушится на высоте 5-10 км и его кинетическая энергия перейдет в энергию взрыва,

сопровождаемого выделением тепловой и световой энергии и образованием ударных волн. Такой вариант имел место при взрыве Тунгусского метеорита.

Более прочное тело такого же размера, например, железное, достигнув поверхности Земли, образует ударный кратер. Примером является кратер Берингера в американском штате Аризона (рис. 6), образовавшийся около 50 000 лет назад при столкновении с железоникелевым астероидом размером порядка 40-60 м и массой 300 тысяч тонн

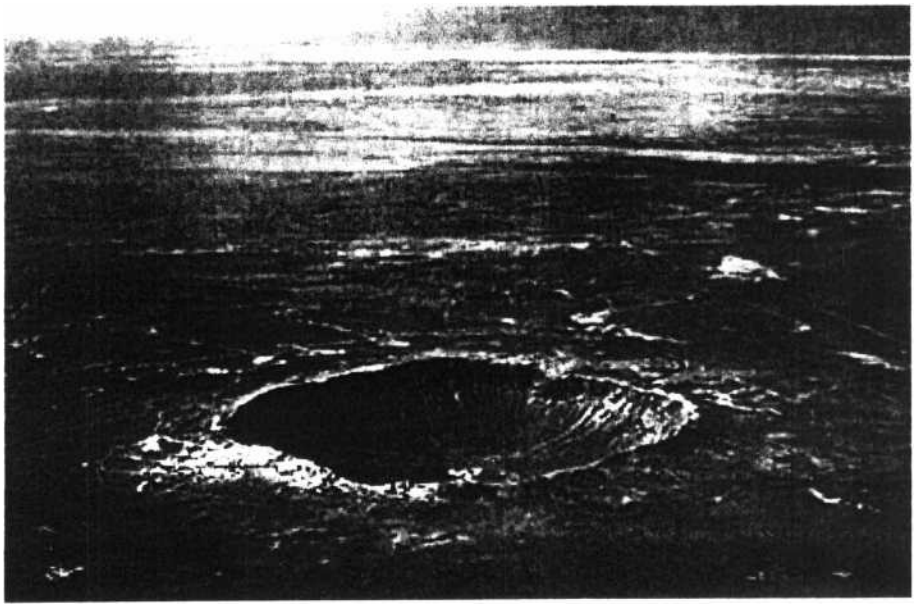


Рисунок 6- Ударный кратер Берингера в Аризоне

Фото: D. Roddy.

Взрыв на планете, имеющей атмосферу, обуславливает продукты испарения, образовавшиеся при высокоскоростном ударе со скоростью, превышающей 15 км/с. Из них формируется раскаленное газовое облако, которое начинает стремительно всплывать в верхние слои атмосферы, образуя, как и при ядерном взрыве, характерное грибовидное облако. Оно обуславливает возмущения ионосферы и даже магнитосферы Земли [7], что вызывает нарушения в работе средств связи, телевидения, навигации и т.п.

При взрыве одновременно возникает мощная световая вспышка и ударная волна, которые вызовут пожары и разрушения на значительном удалении от места взрыва.

Его диаметр около 1,3 км, а глубина 170 м.

При падении небесных тел в воду возникнут цунами.

Таким образом, чем крупнее астероид или кометное ядро и чем выше их скорость, тем больший ущерб они нанесут планете, с которой они сталкиваются.

Оценить последствия космических ударов - непростая задача.

Компьютерная техника позволяет осуществлять моделирование как самих процессов столкновения, так и их последствий.

Поскольку при высокоскоростном ударе практически вся кинетическая энергия ударника переходит в энергию взрыва, то достаточно просто оценить масштабы взрывных процессов при столкновениях с астероидами и ядрами комет.

Обычно мощность взрыва выражают через тротиловый эквивалент. Он равен массе тринитротолуола (ТНТ).

При взрыве 1 кг ТНТ выделяется 4,2 МДж энергии. Такую кинетическую энергию будет обеспечивать булыжник массой в 1 кг со скоростью около 3-х км/с. Скорости же сталкивающихся космических объектов достигают десятков км/с.

Если допустим, что скорость тела равна 30 км/с, то его масса должна быть около 10000 тонн. Диаметр такого астероида, если он каменный и имеет сферическую форму, составит около 20 м.

Масса небесного тела и его кинетическая энергия, растут пропорционально третьей степени его диаметра. Поэтому энергия, например, астероида диаметром 2 км будет уже в миллион раз больше, и его столкновение с Землей будет эквивалентно взрыву миллиона мегатонных ядерных зарядов.

Для справки - самая мощная в мире термоядерная бомба, испытанная в 1961 году в Советском Союзе, имела мощность около 60 Мт, что примерно соответствует мощности взрыва Тунгусского метеорита. А

суммарный боезапас всех ядерных государств мира в разгар холодной войны оценивался примерно в 10 000 Мт [8]. Следовательно, астероид размером около 0,5 км, движущийся со скоростью 30 км/с, будет обуславливать кинетическую энергию, сопоставимую с энергией взрыва всего ядерного потенциала человечества. Взрыв такого количества ядерных зарядов вызовет на нашей планете начало глобальных катастрофических процессов, получивших название "ядерная зима".

При мощном ударе возможны ситуации, когда образовавшиеся сейсмические волны, которыми передается около 5% энергии взрыва, обогнув планету, могут сфокусироваться на противоположной от места удара стороне планеты и вызывать там мощнейшие землетрясения и извержения вулканов.

В случае падения космического тела в океан возникнут волны цунами, которые, проникнув на сотни километров вглубь материка [9], [10], смоют все прибрежные поселения на тысячи километров вдоль береговой линии. Есть предположения, что Всемирный Потоп являлся следствием падения крупного космического тела в океан, вызвавшего волну цунами, прокатившуюся по континентам.

Таким образом, вследствие мощного космического удара, в недрах, на поверхности и в атмосфере Земли возникнет цепь мощных катастрофических явлений. В результате человечество и большая часть биосферы будут сметены с лица Земли практически в одно мгновение. Вот почему опасные космические тела размером более 1-2 км называют “ телами-убийцами”.

Цунами, возникшее 26 декабря 2004 года в Юго-Восточной Азии, унесло около 200 000 человек и нанесло материальный ущерб в десятки миллиардов долларов.

При столкновениях с такими объектами, очевидно, катастрофы будут иметь локальный характер. Зона разрушений при этом может достигать в поперечнике от десятков до сотен километров. Например, результаты расчетов, приведенных в работе [11], показывают, что размеры зоны разрушений при падении объектов диаметром 60 м будут соответствовать

площади разрушений от Тунгусского метеорита, т. е. вдвое превышать территорию Москвы, а диаметром 300 м - соответствовать площади Московской области (рис.7).

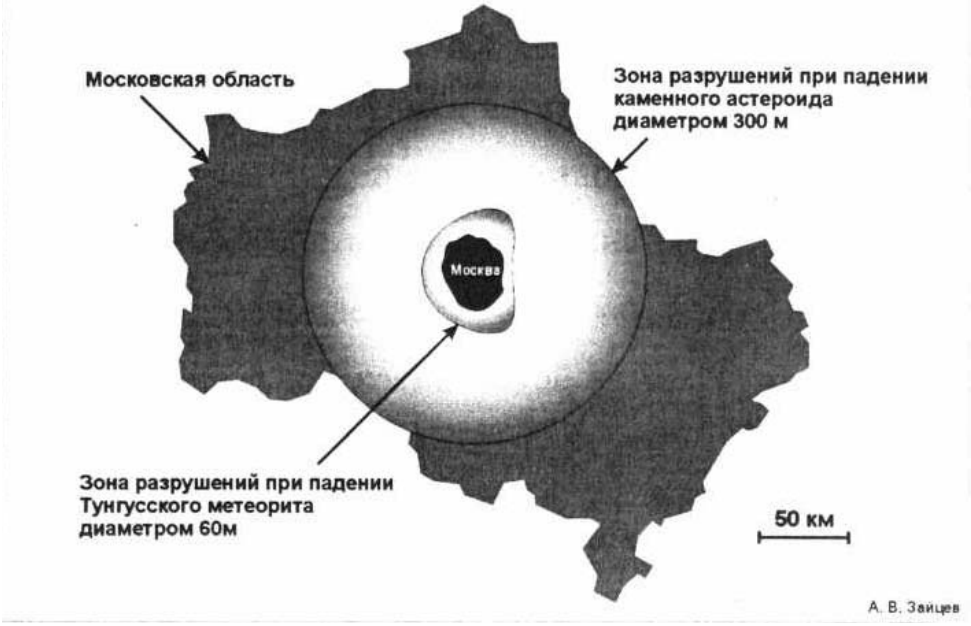


Рисунок 7- Размеры зон разрушений в зависимости от диаметров сталкивающихся с Землей небесных тел

В работе [12] показано, что при движении в атмосфере космическое тело заряжается до гигантского электрического потенциала, что может привести к сверхмощному электрическому пробою между ним и Землей. При размере астероида 5-10 м мощность электроразрядного взрыва может достигать мощности атомного взрыва в Хиросиме и создавать зону поражения радиусом от 10 до 100 км. Этим, в частности, можно объяснить ряд таинственных аварий и катастроф, произошедших с воздушными и морскими судами.

Благодаря полетам межпланетных автоматических КА мы имеем возможность оценить масштабы ударных процессов, которые происходили и происходят в СС, получить представление как будет выглядеть планета земного типа после глобальной космической катастрофы. Такой планетой, судя по всему, является Марс.

Появились весьма серьезные свидетельства тому, что Марс в

далеком прошлом был, как и Земля, "живой планетой", но затем погиб в результате космической бомбардировки. Съемка этой планеты с близкого расстояния космическими аппаратами показала, что его поверхность буквально испещрена ударными кратерами и покрыта слоем вещества кроваво-красного цвета, который обусловлен оксидом железа. Российский ученый-геолог А.М. Портнов [13] доказал, что он мог образоваться только в процессе высокотемпературного воздействия при ударах небесных тел и при обязательном наличии на планете воды и кислорода. По его расчетам, в далеком прошлом на Марсе была плотная атмосфера с высоким содержанием кислорода и много воды. Следовательно, на нем могла существовать растительная и даже, может быть, разумная формы жизни. Но космическая бомбардировка его поверхности привела к полному уничтожению биосферы, а возможно, и цивилизации Марса, и он превратился в безжизненную пустыню.

Свидетельством колоссальной силы удара крупного небесного тела о поверхность Марса является кольцевая структура Эллада диаметром около 2000 км (Рис. 8.). Этим ударом было спровоцировано извержение четырех гигантских вулканов на противоположной стороне Марса, крупнейший из которых, Олимп, имеет высоту около 27 км и диаметр у основания почти 600 км. Чудовищной силы взрыв привел к сбросу значительной части атмосферы планеты. В результате этого удара Марс и превратился в безжизненную планету.

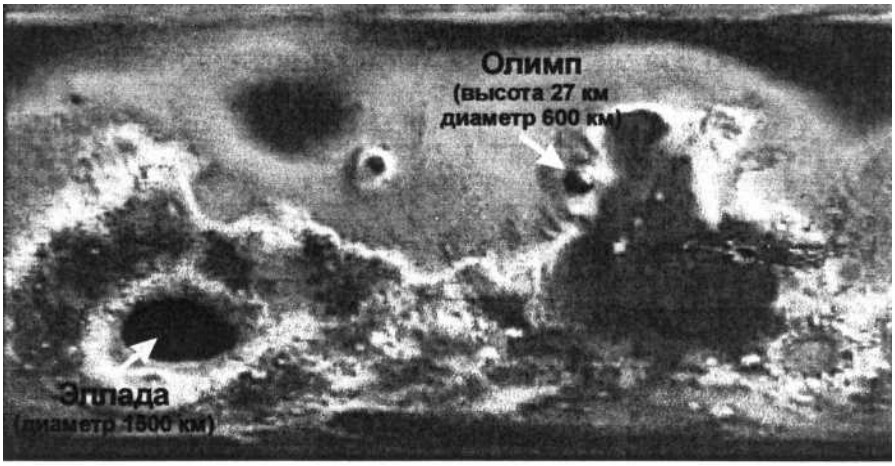


Рисунок 8 - Рельеф поверхности Марса
NASA (США)

Можно полагать, что Марс заведомо был обречен на такую судьбу из-за близости к поясу астероидов, и соответственно, высокой вероятности возникновения космической катастрофы.

О том, что процессы столкновений небесных тел в СС происходят и в современную эпоху, свидетельствует пример столкновений фрагментов кометы Шумейкер-Леви-9 с Юпитером в августе 1994 года. За виток до этого столкновения ядро данной кометы очень близко пролетело вблизи Юпитера и было разорвано его гравитационным полем примерно на два десятка фрагментов размерами, не превышающими одного километра каждый. После этого, совершив один оборот вокруг Солнца, эти фрагменты снова подошли к Юпитеру. Но на этот раз их траектории пересеклись с Юпитером, и они столкнулись с ним. Скорость входа этих фрагментов в атмосферу Юпитера была около 60 км/с.

Зная заранее о предстоящем событии, ученые разработали компьютерные модели ожидаемых столкновений и смогли, таким образом, проверить достоверность своих теоретических оценок. В итоге, картины всплывающих в атмосфере планеты гигантских раскаленных облаков, которые наблюдались после столкновений, не обманули их ожиданий и стали зримым подтверждением верности их теорий.

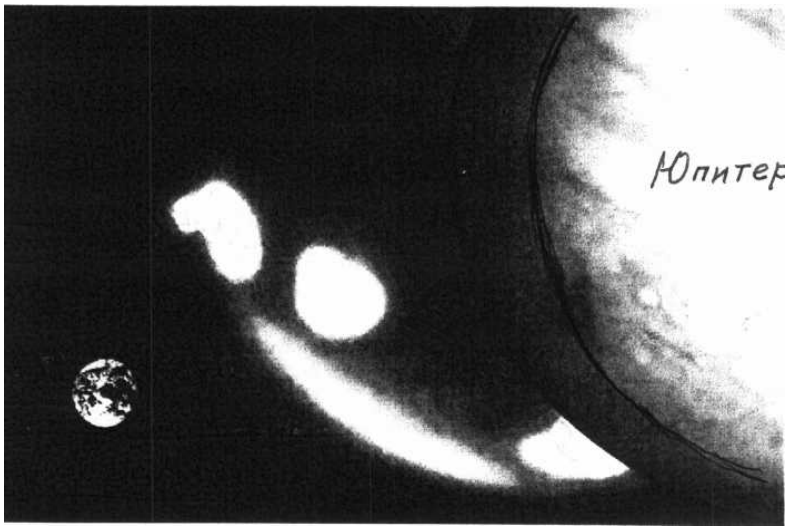


Рисунок 9 - Сравнительные размеры Земли и возмущений в атмосфере Юпитера, вызванных падением фрагментов кометы Шумейкер-Леви-9

ФОТО NASA (США)

Наглядное представление о масштабах этой космической катастрофы дает коллаж из фотографий Юпитера (рис. 9), выполненных в инфракрасном и видимом диапазонах спектра и снимка Земли, где все объекты представлены в едином масштабе.

Снимки Земли из космоса, а также геологические и другие исследования, показали, что в прошлой истории Земли было множество столкновений с космическими объектами разного размера, которые приводили ко всем указанным выше типам катастроф. И хотя геологические и атмосферные процессы на Земле стерли следы многих столкновений, тем не менее, в настоящее время на поверхности нашей планеты обнаружено свыше 140 кратеров ударного происхождения размерами до 200 км и возрастом до 2 млрд. лет [2] (рис. 10). Их еще называют астроблемами, что означает «звездные раны».

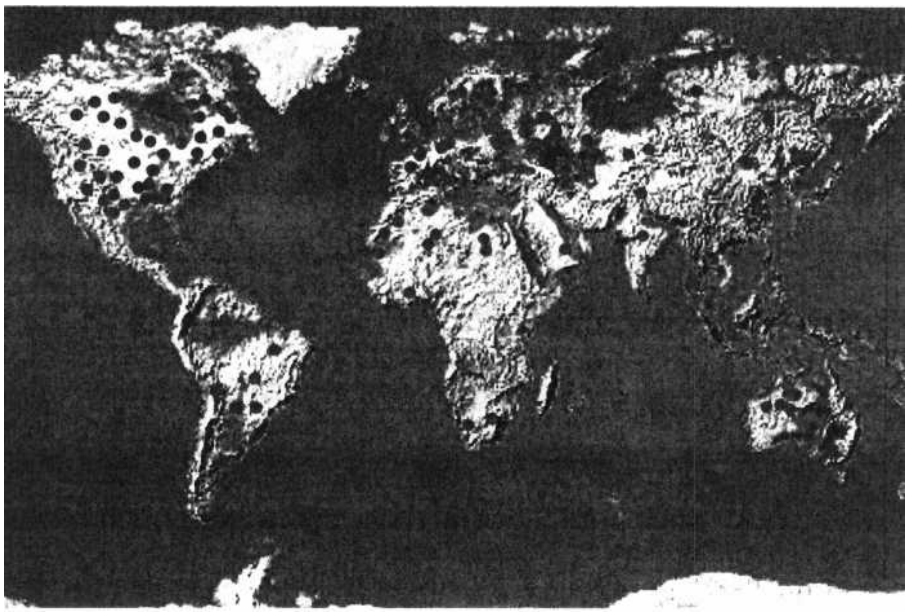


Рисунок 10 - Ударные кратеры на поверхности Земли

На территории России, обнаружено около 25 ударных кратеров. Среди них, один из крупнейших в мире Попигайский кратер, расположенный на севере Сибири. Его диаметр составляет 100 км.

Самый крупный из обнаруженных кратеров - Чиксулуб, находящийся в районе полуострова Юкатан Мексиканского залива, имеет

диаметр около 180 км. Он образовался примерно 65 млн. лет назад при ударе небесного тела диаметром около 10 км. Мощность взрыва при этом была эквивалентна взрыву 100 трлн. тонн тротила, что обусловило уничтожение значительной части биосферы Земли.

В работе [14] приводятся результаты моделирования этой катастрофы, одной из крупнейших в истории Земли. В ней показано, что уже через 40 минут после удара раскаленные осколки достигли самых отдаленных районов планеты. Падавшие осколки так сильно нагрели атмосферу, что загорелись леса в южной и центральной части Северной Америки, в центре Южной Америки и Африки, в Индии, а также на юго-востоке Азии. При этом больше всего пострадали район Чиксулуба и Индия, которая в то время была расположена на противоположной стороне планеты. Ряд районов пострадал и от волн цунами.

Всемирные пожары стали причиной сильного загрязнения атмосферы. Пелена из сажи и пыли полностью блокировала доступ солнечного света. На всей Земле наступила многомесячная ночь. Началось глобальное похолодание. Растительность в основном была уничтожена, а цепи питания нарушились даже в местах, не затронутых огнем, например в морях. Ход развития этих процессов напоминал "ядерную зиму".

Примерно через год большая часть пыли и пепла осела и появились условия для фотосинтеза, а значит, и роста растений. Начался процесс возрождения жизни на Земле, который продолжался в течение 10 тыс. лет. Но понадобились сотни тысяч лет, чтобы появились новые устойчивые экосистемы. Предполагается, что на возрождение потоков органических веществ в морских глубинах ушло 3 млн. лет. Спасло нашу планету разнообразие живых существ. Несмотря на то, что удар стал причиной вымирания 75% животных и растительных видов, включая динозавров - некоторым формам жизни удалось сохраниться. В результате сформировались новые экологические ниши, которые заняли млекопитающие, эволюционировавшие в современные виды.

Описанные события произошли между Мезозойской и Кайнозойской эрами - на границе мелового и третичного геологических периодов.

Поэтому катастрофы такого масштаба называют К/Т событиями (от немецких слов Kreide/Tertiar - Меловой/Третичный периоды).

Надо отметить, что в истории Земли это был далеко не единственный случай массового вымирания населявших его организмов и растений. Несколько меньшее по масштабам событие произошло, например, 37 миллионов лет назад. В это время образовался Попигайский ударный кратер, что, вероятно, и послужило причиной этого вымирания.

Совсем недавно группа американских исследователей во главе с геофизиком из Аризоны Аленом Уэстом нашла весьма убедительные доказательства тому, что всего лишь 12 900 лет назад, мамонты и мастодонты Северной Америки были буквально выжжены с материка взорвавшейся над ним кометой [15]. Вместе с ними прекратила свое существование и культура древних индейцев кловис. Это подтвердило гипотезу археолога Уильяма Топпинга о причине внезапного исчезновения этой активно развивавшейся культуры,

По оценкам ученых диаметр кометы был несколько километров. А поскольку кратера, связанного с этим взрывом они не нашли, то предполагают, что это был воздушный взрыв, подобный тунгусскому. В результате теплового воздействия начал подтаивать ледниковый щит, и в Северную Атлантику хлынули холодные воды, что привело к мощному похолоданию по всему полушарию, которое прекратилось только через тысячу лет.

Глобальные катастрофы, способные стереть практически все живое с лица Земли, случаются в среднем один раз в несколько сотен тысяч или десятков миллионов лет. Но это совсем не означает, что у нас в запасе много времени. На самом деле катастрофа может произойти в любой момент. Особенно это касается событий более мелкого масштаба, которые происходят намного чаще. Достаточно посмотреть на (рис.11), на котором изображены наиболее известные случаи столкновений небесных тел с Землей за прошлое столетие, чтобы наглядно убедиться в том, что подобные события не редкость.

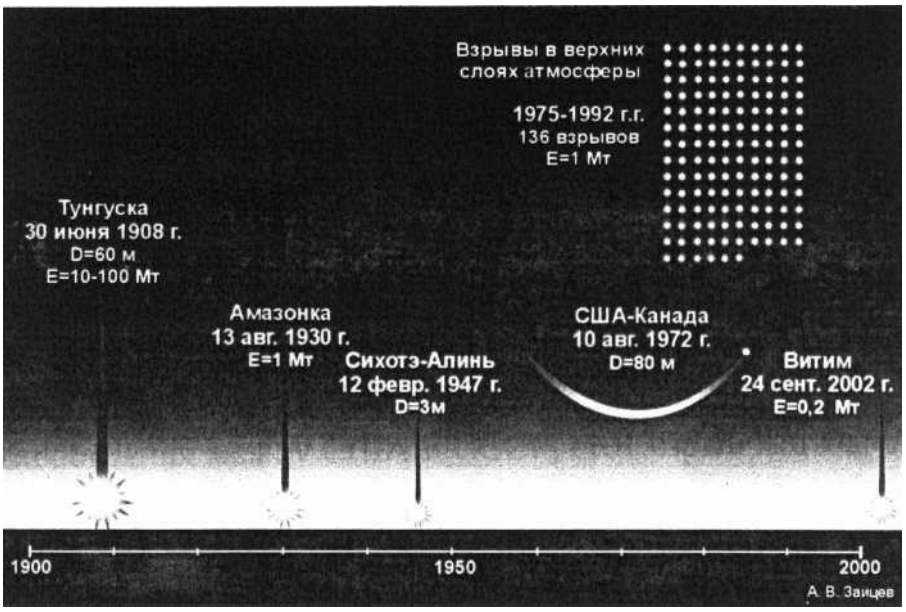


Рисунок 11 - Столкновения небесных тел с Землей в 20-м веке

30 июня 1908 года в Сибири в районе реки Подкаменная Тунгуска произошел взрыв космического тела диаметром около 60-80 м, получившего название Тунгусского метеорита. Мощность взрыва составила, по разным оценкам, от 10 до 100 мегатонн. Его ударная волна произвела вывал леса на площади около 2000 км^2 и вызвала множество очагов пожара в тайге, длившегося около двух лет.

13 августа 1930 года подобная катастрофа случилась в джунглях на северо-западе Бразилии. Произошло три взрыва мощностью около 1 мегатонны, что привело к жертвам среди местного населения.

12 февраля 1947 года произошло падение железного метеорита в горах Сихотэ-Алиня. После разрушения метеорита, имевшего диаметр около трех

метров, его осколки выпали на площади примерно 5х20 км и образовали свыше сотни воронок диаметром от 0,6 до 28 метров.

10 августа 1972 года астероид, диаметр которого оценивается в 60-80 метров, а масса в 1 млн. тонн, вошел со скоростью 15 км/с в атмосферу Земли над американским штатом Юта. Однако, по счастливой случайности, ввиду того, что траектория входа в атмосферу

оказалась очень пологой, падения небесного тела на Землю не произошло. Пролетев около 1500 километров над ее поверхностью, он вылетел над территорией Канады за пределы атмосферы и ушел в космическое пространство. Можно только предполагать, к каким последствиям могло бы привести падение этого небесного тела на американский континент. Мощность взрыва была бы сравнима с Тунгусским взрывом. Пострадать от него могли бы не только США или Канада, но и все человечество. Российские и американские космические Системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) ежегодно регистрируют около десятка входов в атмосферу Земли объектов, которые взрываются на высотах в несколько десятков километров над ее поверхностью.

Следует отметить, что все вышеуказанные четыре события были зарегистрированы на материковой части Земли. Но очевидно, что падения таких же небесных тел происходят и в океанской акватории, составляющей 2/3 поверхности нашей планеты. Поэтому, число подобных событий для всей поверхности Земли должно быть увеличено втрое, и можно с высокой степенью уверенности утверждать, что ***столкновения с Землей достаточно крупных небесных тел происходят 10-12 раз в столетие, то есть примерно через каждые 10 лет.***

Подтверждением этому является то, что уже в начале 21 века произошло пять событий, связанных с падением небесных тел (рис. 12).

5 июля 2002 года в небе Украины около Днепропетровска в атмосферу Земли вошел метеороид, наблюдавшийся в виде яркого болида, который был принят пилотами израильского Боинга-757 за стрельбу по ним зенитной ракетой.

24 сентября 2002 года, в бассейне сибирской реки Витим произошел взрыв мощностью около 0,2 Мт. В результате было повалено около 100 км^2 тайги.

28 сентября 2003 года, в результате падения фрагментов крупного болида была сожжены дома в индийской деревне Судусудия. При этом погиб один ее житель и 20 ранено.

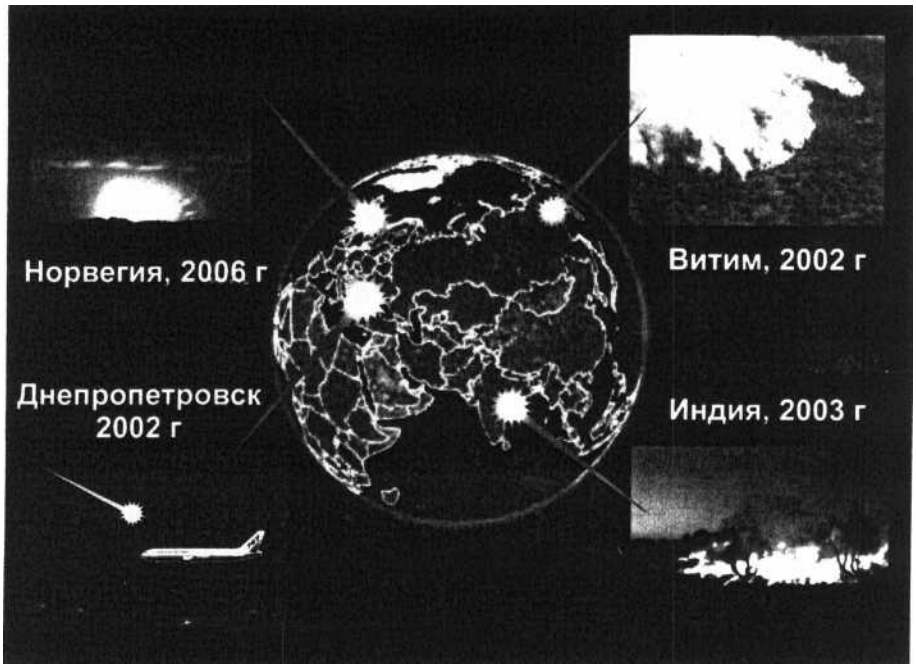


Рисунок 12 - Падения небесных тел в 21 веке

При падении небесного тела 7 июня 2006 г. в горах Норвегии произошел взрыв, сравнимый по мощности с атомной бомбой, сброшенной на Хиросиму.

15 сентября 2007 года около деревни Каранкас в перуанской области Пуно, недалеко от границы с Боливией, упал и взорвался метеорит, в результате чего образовался кратер диаметром 30 и глубиной 6 метров. После этого сотни жителей деревни, посетившие место падения метеорита, обратились в больницы с жалобами на здоровье. Кроме того, поблизости от кратера были найдены обугленные останки, принадлежность которых определить не удалось.

Нам повезло, что эти события произошли в безлюдных или малонаселенных местах, так как падение даже небольшого небесного тела в наше время несравненно более опасно, чем это было в прошлые времена.

Представленные данные показывают, что проблема астероидно-кометной опасности является реальной и ей следует отвести главное место, требующее решения на международном уровне с привлечением ведущих развитых стран (США, Великобритания, Германия, Франция, Бразилия, Япония и др.).

Список литературы

1. А.С. Коротеев, НН. Пономарев-Степной, Б.П. Лящук, Б.А. Паленов, А.Т. Базилевский, А.В. Зайцев, А.А. Клаповский, Д.В. Петров, А.И. Ткаченко, Э.Г. Чистов, Т.В. Шингарева, О.Н. Шубин, Б.Д. Яковлев, Научно-технический отчет «Проектно-поисковые исследования по созданию средств обнаружения и предотвращения астероидно-кометной опасности», межрегиональная общественная организация «Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского», том 1, г.Москва, 2008, 228 с.
2. Барабанов С.И., Микиша А.М., Смирнов М.А. Метеорные потоки как потенциальный источник опасности столкновения крупноразмерных небесных тел с Землей. Международная конференция «Космическая защита Земли, 23-27 сентября 1996 г., Снежинск. Тезисы, с.7
3. Медведев Ю.Д., Свешников М.Л., Сокольский А.Г., Тимошкова Е.И., Чернетенко Ю.А., Черных Н.С., Шор В.А. Астероидно-кометная опасность. Под. Ред. А.Г. Сокольского, ИТА, МИПАО, 1996, 224 с.
4. Иванов Б.А. Механика кратерообразования. – В сб.: Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела, вып. 14. – М.: ВИНИТИ, 1981.
5. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Иванов Б.А. и др. Ударные кратеры на Луне и планетах. – М.: Наука, 1983.
6. Мелош Т. Образование ударных кратеров: геологический процесс. Пер. с англ. – М.: Мир, 1994.
7. Адушкин В.В., Немчинов И.В. Катастрофические воздействия космических тел., Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005, 310 с.
8. Сахаров А.Д. Опасность термоядерной войны: Открытое письмо доктору Сиднею Дреллу.
9. Алексеев А.С., Петренко В.Е. К проблеме космогенных цунами. Международная конференция «проблемы защиты Земли от столкновения с опасными космическими объектами (SPE-94)», 26-30 сентября 1994 г., Снежинск. Тезисы доклада. Часть II. С. 137, 138.

10. Hills J.G., Mader Ch.L. Tsunami Produced by the Impacts of Small Asteroids. Proceedings of the Planetary Defense Workshop. Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, California, May 22-26, 1995, pp 67-76
11. Hills J.G., Goda M.P. Airblast Damage From Small Asteroids. In: Proceedings of the Near-Earth-Object Interception Workshop (eds. Gr.H. Canavan etal.)
12. Невский А. Удар на космической скорости Газ. «Труд», S.11.97.
13. Портнов А.М. Магнитная пыль космических катастроф. Земля и Вселенная, 1998, N5, с.75-81.
14. Кринг Д., Дурда Д. «День, когда мир был сожжен», в мире науки, N 3, 2004, с.56-63.
15. Покровский В. «Американских мамонтов убил космос». Независимая газета от 11.07.2007 г.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Сборник трудов
международной молодежной
научной конференции

23 – 27 сентября 2013 г.
г. Анапа

Подписано в печать 11.09.13.
Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Печать офсетная, Усл. печ. 16,97, уч.-изд.л. 10,74.
Заказ № 3148. Тираж 80 экз.

Издательство Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863)247-80-51

Отпечатано в типографии ЮФУ
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863)247-80-51