ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЬЕЗОТЕХНИКИ ЮФУ
НКТБ «ПЬЕЗОПРИБОР» ЮФУ
ЦКП «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

СБОРНИК ТРУДОВ

III молодежной всероссийской
с международным участием
научной конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,

Посвященной 20-летию Факультета высоких технологий

20 – 23 сентября 2021 г.
г. Ростов-на-Дону

ББК 31.261.3
УДК 53.082.73

А 43 **Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения.** Сборник трудов III молодежной всероссийской научной конференции с международным участием (20 – 23 сентября 2021 г.). – Ростов-на-Дону : Фонд науки и образования, 2021. – 296 с.

ISBN 978-5-907361-82-9

Сборник статей подготовлен на основе докладов научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения», проходившей 20-23 сентября 2021г. в ИВТиПТ ЮФУ г. Ростов-на-Дону. Программа конференции включала работу секций «Пьезоэлектрические устройства для энергетики, оборонно-промышленного комплекса, аэрокосмической отрасли, навигации, медицины, транспортной отрасли, для систем безопасности и светотехники, средств автоматизации и интеллектуального управления», «Модели, алгоритмы и программы управления высокотехнологичными проектами», «Исследования в области пьезосегнетоэлектрических материалов», «Измерительные технологии в пьезоэлектрическом приборостроении». Докладчики представили результаты исследований по различным направлениям развития пьезоэлектрического приборостроения, пьезоэлектрического материаловедения и программ управления высокотехнологичными проектами.

Издание может быть полезно научным сотрудникам, преподавателям, студентам и аспирантам и всем, кто интересуется проблемами и перспективами развития приборостроения.

ISBN 978-5-907361-82-9

© Авторы, 2021
© Оформление Фонд науки и образования, 2021

ОРГКОМИТЕТ
III всероссийской с международным участием молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»

Председатель оргкомитета:
Панич Анатолий Евгеньевич – Научный руководитель ИВТ и ПТ, Директор-главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, д.т.н, профессор, академик РИА, г. Ростов-на-Дону
Сопредседатель оргкомитета:
Метелица Анатолий Викторович - проректор по научной и исследовательской деятельности Южного федерального университета, д.х.н., г. Ростов-на-Дону

Программный комитет
Земляков Виктор Леонидович – заведующий кафедрой «Информационных и измерительных технологий» Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, д.т.н., г. Ростов-на-Дону, Россия
Ксёнз Наталья Сергеевна – доцент каф. «Системного анализа и управления» ИВТиПТ ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону
Лунин Леонид Сергеевич – каф. «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ), д.т.н. профессор, г. Новочеркасск;
Маммадов Али Иса оглы – зав. Лабораторией Института физики Национальной академии наук Азербайджана, д.т.н., профессор, г. Баку;
Мараховский Михаил Алексеевич – нач. сектора ИВТиПТ ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону
Милославский Юлий Константинович – нач. лаборатории НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону
Нагаенко Александр Владимирович – доцент каф. «Информационных и измерительных технологий» ИВТиПТ ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону
Нестеров Алексей Анатольевич – профессор каф. «Общей и неорганической химии» химического фа- культета ЮФУ, д.т.н., профессор, г. Ростов-на-Дону
Олишевский Даниил Петрович – уч. секретарь ИВТиПТ ЮФУ, к.э.н., г. Ростов-на-Дону
Панич Александр Анатольевич - директор ИВТиПТ ЮФУ, д.т.н., доцент, г. Ростов-на-Дону
Тарасов Сергей Павлович – каф. ЭМТ ЮФУ Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии, д.т.н., профессор, Таганрог
Тополов Виталий Юрьевич – каф. общей физики физического факультета ЮФУ, д.ф.-м.н.,проф., чл.-корр. РАЕ, г. Ростов-на-Дону
Щербань Игорь Васильевич – профессор кафедры «Информационных и измерительных технологий»ИВТиПТ ЮФУ, д.т.н., г. Ростов-на-Дону

Локальный оргкомитет
Алексюнин Е.С. , г. Ростов-на-Дону
Гусенко Т.Г., г. Ростов-на-Дону
Гореленко К.А., Ростов-на-Дону
Ключников С.Н., г. Ростов-на-Дону
Малыхин А.Ю., г. Ростов-на-Дону
Скрылев А.В., г. Ростов-на-Дону
Толмачев С.А., г. Ростов-на-Дону
Шевченко Л.А., г. Ростов-на-Дону

Постоянный адрес конференции в сети интернет: https://piezoconf.ivtipt.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Факультет высоких технологий Прошлое, настоящее, будущее
Панич Анатолий Евгеньевич..... 10

***ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ, ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА, АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ, НАВИГАЦИИ, МЕДИЦИНЫ, ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ, ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И СВЕТОТЕХНИКИ, СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*..... 28**

Векторно-скалярные приёмники как основа современных гидроакустических систем пассивного обнаружения подводных и надводных объектов
С.Н.Галий, В.К.Доля, А.В.Боев, А. А. Панич..... 28

Измерительные преобразователи с двумя степенями свободы на базе составных пьезотрансформаторов
В. Н. Седалищев 37

Разработка преобразователей пространственной вибрации
А.В. Орлов, В.Я. Смирнов 41

Пьезоэлектрический датчик ускорения с многофункциональным преобразователем
В.В. Янчич 46

Стенд воспроизведения углового ускорения
В.В. Янчич 51

Алгоритм оценки эффективности модели темпотрона
Н.А. Мишин, М.В. Терещенко, С.Г. Сафарянц..... 56

Нелинейная акустика в исследованиях океана
С.П Тарасов, П.П Пивнев. 64

Терапевтический HIFU преобразователь
А.А. Панич, А.В Скрылёв, К.А Гореленко, А.Ю Малыхин, Р.А Байдаров, В.В Немыкин 79

Исследование метрологических характеристик
вибрационного преобразователя плотности
с пьезоэлектрическим возбуждением
и измерением параметров колебаний
О.В Зацерклянный 90

***ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПЬЕЗО-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ*..... 95**

Ориентационные эффекты и модифицированные
параметры приема в 2–2-композитах на основе
кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков
В.Ю. Тополов, А.В. Криворучко, А.Н. Исаева 95

Процесс холодного спекания керамики $BaTiO_3$
М.В. Корнюшин, А.В. Смирнов, Ю.Д. Ивакин...... 100

Влияние сульфата свинца на электрофизические
параметры пьезокерамики ЦТС-19
А.В. Казакова, М.И. Толстунов, А.А. Нестеров 105

Влияние режимов стабилизации на электрофизические
свойства пьезокерамики из материала ПКП-12
М.В. Драганчук, А.В. Нагаенко, А.С. Турлюн..... 108

Пьезокерамические материалы для ультразвуковых
методов неразрушающего контроля
В.В. Коловоротний, А.В. Нагаенко, Н.А. Гирагосова 113

Технологические аспекты оптимизации
изготовления многослойных актюаторов
с низковольтным управляющим напряжением
М.А. Мараховский, В.А. Мараховский, О.Е. Брыль,
Р.А. Байдаров, Л.А. Дыкина..... 118

Влияние технологических приемов на электрофизические
параметры пьезокерамического материала ПКП-33
П.А. Харченко, А.В. Нагаенко, А.В. Нагаенко..... 122

Исследование свойств пьезокерамики системы ЦТС,
используемой при производстве
пьезоэлектрических генераторов
Е.Е. Куликов, А.В. Нагаенко, Н.А. Гирагосова..... 126

Элементная база твердотельных пьезокерамических гироскопов
М.А. Гончаров, А.В. Нагаенко..... 130

Исследование процесса шликерного литья
тонкопленочных элементов системы ЦТС
Е.А Панич., Р.А Байдаров, Л.А Дыкина, В.А Бардин..... 143

Диэлектрические свойства в многоэлементных
керамиках на основе ниобата натрия-калия
Е.В. Глазунова, Л.А. Шилкина, И.А. Вербенко,
Е.И. Ситало, А.Н. Величко, А.С. Черевков,
И.А. Лигостаев, Н.И. Серопян, Л.А. Резниченко..... 151

Зависимости электрофизических характеристик твердых
растворов системы (1-*x*-*y*) $NaNbO_3$ – *x*$KNbO_3$ – *y*$Cd_{0.5}NbO_3$
от температуры, электроотрицательности
и однородного параметра деформации
М.О. Мойса, К.П. Андрюшин, И.Н. Андрюшина,
С.И. Дудкина, Л.А. Резниченко..... 157

Формирование структурных и диэлектрических
характеристик в керамике $La_{0,5}Bi_{0,5}Mn_{1-x}Z_xO_3$ (Z=Fe, Co)
Д.В. Волков, Н.А. Болдырев, И.А. Вербенко 163

Электродинамические свойства твердых растворов
$0.98(x PbTiO_3 - y PbZrO_3 – z PbNb_{2/3}Mg_{1/3}O_3) – 0.02PbGeO_3$
в СВЧ диапазоне
П.А. Астафьев, А.А. Павелко, Ю.М. Нойкин 167

Исследование оптических свойств пленок титаната
стронция, выращенных на кремниевых подложках
К.М. Жидель, А.В. Павленко 172

Композиционные материалы гидроакустических
преобразователей для экстремальных условий
Парфенов А.А., Дыкина Л.А., Гончаров М.А., Медведев С.С..... 177

Метод увеличения объёмно-чувствительных параметров
высокопористой пьезокерамики
Е.В.Карюков, А.Ю.Малыхин, А.А. Парфёнов,
С.С. Медведев, А.А. Панич, Н.А. Гирагосова 186

Исследование свойств пьезокерамического материала ПКП-35 в широком интервале температур
А.Ю. Малыхин, Г.М. Акбаева, А.И. Бурханов, А.В. Сопит, М.А. Гончаров 191

Исследование электрической прочности пьезокерамических материалов системы ЦТС
Дыкина Л.А., Малыхин А.Ю., Гореленко К.А., Алексюнин Е.С., Панич А.А 195

Люминесцентные свойства Al-замещенных $BaFe_{12}O_{19}$
Р.З. Мехдиева, А.И. Маммадов, С.Г. Джабаров, Р.Э. Гусейнов 200

Пьезоэлектрические свойства и родственные параметры композитов типа 0–3 на основе перовскитовых сегнетопьезокерамик
А.Н Исаева, В.Ю Тополов, П.А Абрамов. 205

Пьезоэлектрические и энергосберегающие параметры новых композитов типа 1–3 на основе кристаллов PMN–*x*PT
А.Н. Исаева, В.Ю. Тополов, Б.О. Проценко 210

Влияние дефектности порошков сегнетофаз системы ЦТС на температуру их спекания и ЭФП, изготавливаемой из них пьезокерамики
А.А. Нестеров, Е.А. Панич 214

Технология и электрофизические свойства пьезокерамики на основе фаз системы $PbTiO_3$ –$BiTi_{0,5}Ni_{0,5}O_3$ – $BiTi_{0,5}Cd_{0,5}O_3$
А.А. Нестеров 219

Пьезокерамика на основе фаз системы $PbTiO_3$ - $Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$
А.А. Нестеров 224

Исследование и разработка приборного обеспечения для оперативной оценки горючести газа из газовых реле силовых трансформаторов
Л.А. Дарьян, Р.М. Образцов, А.А. Арутюнян 229

Особенности пьезоэлектрических свойств и их анизотропии в пористых материалах на основе сегнетопьезокерамики типа $PbTiO_3$ при низком уровне пористости
П.А. Борзов, С.Е. Филиппов, В.Ю. Тополов 239

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ 244

Разработка компьютерной модели для экспериментального исследования методов определения параметров резонансных систем в среде LabVIEW
В.Д. Белан, С.Н. Ключников 244

Автоматическая система климат-контроля
Карнаухов С.С., Земляков В.Л. 248

Разработка программно-аппаратного комплекса для определения параметров пьезоэлементов при импульсном воздействии средствами LabVIEW
А.К. Пастухова, С.Н. Ключников 252

Компьютерное моделирование измерительных задач в пьезоэлектрическом приборостроении
В.Л. Земляков, С.Н. Ключников 256

Исследование методов определения пьезомодуля на нестандартных пьезоэлементах
А.М. Васильев, В.Л. Земляков 260

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ..... 264

Разработка моделей бизнес-процессов цеха утилизации автомобильных покрышек
С.Д. Данельянц, Н.С. Ксенз 264

Анализ процессов оказания ремонтных услуг на основе имитационного моделирования
Н.Д. Медведев, Н.С. Ксенз 267

Применение технологий Data Science и решений на основе анализа больших данных и машинного обучения в производственной деятельности инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД»
Е.А. Дармина, О.В. Граецкая 271

Модель управления высокотехнологичным проектом
О.Д. Глод 273

Разработка моделей и алгоритмов автоматизированной системы учета оправок непрерывного стана
Гузиев А. С., Шабаршина И.С., Корохова Е.В 278

Модели совершенствования производственной системы ООО «ПК «НЭВЗ»
Родов Д. Д., Корохова Е.В., Шабаршина И.С. 283

Моделирование системы обучения авиационного персонала с использованием технологий виртуальной реальности
Е.А. Перепелицина, О.В. Граецкая 289

Алфавитный указатель 293

Факультет высоких технологий
Прошлое, настоящее, будущее

Панич Анатолий Евгеньевич

В 50-60х годах прошлого столетия в нашей стране началось интенсивное становление и развитие нового научно-технического направления - пьезоэлектрического приборостроения, связанное с возрастающими потребностями различных отраслей промышленности. Дальнейшее его развитие требовало проведения углубленных специализированных исследований. Для этого в 1966 году совместным решением Министерства машиностроения СССР и Минвуза РСФСР в Ростовском государственном университете (РГУ) была создана отраслевая научно-исследовательская лаборатория пьезоматериалов и пьезопреобразователей (ОНИЛПП), которая связала университетскую науку с конкретными нуждами промышленности. Проводились прикладные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новых типов датчиков, расчету и проектированию гидроакустических антенных решеток, оборудования для исследования пьезокерамики. Совершенствовалась экспериментальная база и опытное производство.

В связи с необходимостью сокращения сроков внедрения результатов научных исследований в области пьезотехники в 1976 г. решением Правительства СССР на базе ОНИЛП было создано Особое конструкторское бюро «Пьезоприбор» (первый директор-главный конструктор Крамаров О.П.), включающее научно-исследовательские, конструкторско-технологические и производственные подразделения. По заданиям министерств и ведомств военно-промышленного комплекса (ВПК) были успешно выполнены ряд НИР и ОКР. В дальнейшем эти государственные структуры выделили средства для строительства 8-ми этажного лабораторного корпуса и его оснащения технологическим и контрольно-измерительным оборудованием.

Следует отметить, что на базе ОКБ «Пьезоприбор» с момента его образования осуществлялась подготовка и использование специалистов в области инженерных наук на основе классического уни-

верситетского физико-математического образования. Коллектив бюро формировался на 90% из числа выпускников РГУ, которые в течение первых 2-3 лет работы осваивали новые инженерные дисциплины (инженерная графика, системное проектирование, аппаратное программирование и т.д.) в системе повышения квалификации. Такой подход к формированию кадрового потенциала обеспечивал эффективное применение последних достижений в фундаментальных областях знаний для воплощения оригинальных инженерных решений при создании и разработке уникального оборудования, технологических линий, приборов и устройств.

Однако пришедшему в ОКБ «Пьезоприбор» в 1988 году молодому директору-главному конструктору Паничу А.Е. стало понятно, что накопленный опыт использования фундаментальных знаний в практической деятельности может быть сохранен и преумножен в трудовом коллективе только после переосмысления и внедрения нового гибкого инновационного подхода для решения возникающих научно-технических проблем, особенно в областях, находящихся «на стыке» различных наук, а для этого потребуются инженеры и специалисты другой формации. Поэтому он предложил организовать на физическом факультете РГУ инженерное отделение, но поддержки не получил.

И тогда в 2001 году по его инициативе и при активной поддержке видных ученых Ростовского госуниверситета (РГУ) - члена-корреспондента РАН профессора Жданова Ю.А., первого проректора университета профессора Лосева Н.Ф., академика Воровича И.И., основоположника признанной в России и за рубежом научной школы "Сегнетоэлектрическое материаловедение" профессора Фесенко Е.Г. на базе ОКБ «Пьезоприбор» (впоследствии НКТБ «Пьезоприбор») был открыт факультет высоких технологий, деканом которого был назначен профессор Панич А.Е. Активную поддержку идеи создания в РГУ инженерного факультета, высказанную профессором Паничем А.Е., поддержал и декан механико-математического факультета университета Ерусалимский Я.М., который стал первым лектором по курсу алгебры и геометрии сначала для студентов специальности «Системный анализ и управление», а затем и для всего факультета.

Здесь необходимо отметить, что в те годы в классических университетах России вообще не было инженерных факультетов. Лидер инженерного образования России – Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана стало называться университетом только в 1989 г. Так что создание в классическом Ростовском государственном университете инженерного факультета было поистине революционным событием. А название – факультет высоких технологий соответствовало уже имеющемуся в западных университетах опыту, и предполагало возможность не ограничиваться традиционными для НКТБ «Пьезоприбор» инженерными приложениями, а развивать все направления обучения из известной триады «Нанотехнологии», «Биотехнологии», «Информационные технологии».

Характерной особенностью подготовки специалистов на факультете высоких технологий стало сочетание мощной базовой университетской подготовки студентов по основополагающим дисциплинам, таким как математика, физика, информатика, со специальной подготовкой по техническим дисциплинам. Именно такой подход дает возможность обеспечить необходимый уровень современного инженерно-технического образования молодых специалистов и позволяет готовить новые кадры для высокотехнологических отраслей, где требуются специалисты, деятельность которых охватывает весь комплекс работ по созданию образцов сложных технических объектов.

В 2001 году на факультете высоких технологий велась подготовка только по двум специальностям: "Системный анализ и управление" и "Информационно-измерительная техника и технологии".

Лицензия на подготовку специалистов по направлению «Системный анализ и управление» была получена еще в 2000 г. и первые 17 студентов отучились на отделении системного анализа при механико-математическом факультете РГУ, а затем после первого года обучения стали второкурсниками нового факультета.

Все новости нового факультета отражались в независимой газете «Фаворит», которую выпускали студенты.

Ключевыми датами в развитии факультета как образовательной структуры стали следующие:

2001 год

- Создание факультета высоких технологий

- Создание кафедры системного анализа, информационных и измерительных технологий, которую возглавил доцент Земляков В.Л.

-Перевод студентов 2 курса направления подготовки «Системный анализ и управление» с механико-математического факультета на факультет высоких технологий

-Первый набор студентов на 1 курс:

Направление подготовки «Системный анализ и управление»;

Специальность «Информационно-измерительная техника и технологии»

2002 год

Первый набор на 1 курс на специальность «Информационные системы и технологии»

2004 год

- Создание кафедры системного анализа и управления, которую возглавил профессор Петраков В.А.

- Создание кафедры информационных и измерительных технологий, которую возглавил доцент Земляков В.Л.

- Первый выпуск бакалавров направления «Системный анализ и управление»

- Первый набор в магистратуру по направлению «Системный анализ и управление»

2005

- Выпуск бакалавров по направлению «Системный анализ и управление», набранных впервые на факультете
- Первый набор на специальность «Менеджмент высоких технологий»

2006

- Первый выпуск специалистов по направлению «Информационно-измерительная техника и технологии»
- Создание Центра коллективного пользования «Высокие технологии»
- Создание кафедры «Глобальные информационные технологии»

2007

- Первый выпуск специалистов направления «Информационные системы и технологии»

2009

- Первый набор на направление «Инноватика»
- Создание базовой кафедры «Космическое приборостроение и инновационные технологии», которую возглавил профессор Золотарев А.А.

В дальнейшем реорганизация Ростовского государственного университета и образование на его базе Южного федерального университета привела к созданию в 2013 году Института высоких технологий и пьезотехники – нового научно-образовательного структурного подразделения инженерного профиля в классическом университете, которое вместе с НКТБ «Пьезоприбор», учебно-методическим центром «Инженерное образование», Центром коллективного пользования «Высокие технологии» образует единый учебно-научно-инновационно-технологический комплекс.

В настоящее время в Институте ведется подготовка по 4 направлениям бакалавриата и 4 направлениям магистратуры, образовательный процесс обеспечивается 50 преподавателями. Сегодня на факультете высоких технологий обучаются 549 студентов.

Обучение бакалавров и магистров осуществляется по следующим направлениям:

«Информационные системы и технологии»

Кафедра информационных и измерительных технологий (ИИТ) — одна из ведущих кафедр Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, Кафедра основана на факультете высоких технологий РГУ в 2004 году. С этого момента заведует кафедрой доктор технических наук, доцент В.Л. Земляков.

На кафедре работает 10 сотрудников, среди которых четыре доктора технических наук и четыре кандидата технических наук.

За последние пять лет сотрудниками кафедры были подготовлены и успешно защищены 1 докторская диссертация и 2 кандидатские диссертации. Jпубликовано около 80 научных работ, в том числе из списка ВАК — 38, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science – 5, получено 3 патента на изобретение, издано 13 учебных пособий.

Кроме того, кафедра информационных и измерительных технологий (ИИТ), обеспечивающая подготовку высококвалифицированных кадров в области компьютерных и измерительных технологий на основе интеграции фундаментальной и прикладной науки с лучшими классическими и современными образовательными технологиями, реализует программу дополнительного профессионального образования (повышение квалификации) «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». Обучение по программе уже прошли специалисты соответствующего профиля ряда предприятий РФ. Среди них завод «Аврора», г. Волгоград, ОАО «Таганрогский завод «Прибой», г. Таганрог, ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений», г. Пенза и т.д.

«Прикладная информатика»,

Заведующая кафедрой прикладной информатики и инноватики доцент, к.т.н. Глод О.Д..

Отличительной особенностью образовательной программы бакалавров по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика» является ее интеграция с 2-х семестровой дисциплиной «Техно-

логии мобильной разработки» IT Академии Samsung, а также ориентированностью на предприятия и организации Южного федерального округа.

Анализ трудоустройства выпускников за последние два года показал, что 85 % могут сразу после окончания обучения претендовать на должности junior программистов в области frontend, backend, middleware разработки. Выпускники занимают позиции специалистов высшего уровня квалификации в сфере транспорта и связи, оптовой и розничной торговли, руководителей (представителей) органов власти и управления всех уровней, включая руководителей учреждений, организаций и предприятий.

Во время обучения студенты занимаются научно-исследовательской работой в студенческих научных обществах, созданных на кафедре ПИиИ, а также в научно-исследовательских лабораториях ИВТиПТ. К работе со студентами привлекаются доценты и профессора кафедры прикладной информатики и инноватики, а также представители работодателей, специалисты в области информационных технологий. Студенты участвуют в Неделе науки, проводимой ЮФУ, в различного рода олимпиадах и конкурсах, связанных с IT-сферой, проводимыми как ЮФУ, так и другими организаторами. Например, студентка Савич К.В. после успешного прохождения отборочных испытаний стажировалась в "Сириусе". Студенты, пройдя соответствующие испытания, обучаются в зарубежных университетах, в Корее и в Китае.

На базе ИВТиПТ открыта дополнительная образовательная программа по основам информационных технологий и программирования «IT-школа Samsung». Выпускники программы мобильная разработка стали финалистами всероссийского конкурса «IT Академии Samsung» 2020. В рамках подготовки студентов по направлению подготовки Прикладная информатика планируется, что не менее 80 % студентов будут направлены на обучение в IT-школу Samsung.

На кафедре созданы все условия, чтобы учиться и проводить научно-исследовательскую работу. Студенты занимаются исследованиями и разработками в области информационных техноло-

гий в лабораториях ИВТ и ПТ, участвуют в научных конференциях различного уровня и других мероприятиях (олимпиадах, конкурсах, проектах). Результаты публикуются в сборниках трудов. Данные исследования, как правило, являются основой для выпускной квалификационной работы. Ежегодно кафедра отбирает статьи для печати в сборнике недели науки ЮФУ.

«Землеустройство и кадастры»

Кафедра глобальных информационных систем открыта на факультете высоких технологий РГУ (ЮФУ) в 2006 г. и является базовой кафедрой Южного Научного Центра Российской Академии Наук.

Заведующий кафедрой Сурков Ф.А., доцент, к.ф.-м.н.

Основные направления работы кафедры – подготовка бакалавров и магистров по направлению "Землеустройство и кадастры", а также научно-исследовательская работа в области математического моделирования эколого-экономических систем с использованием ГИС-технологий и результатов космического мониторинга.

Магистерская программа «Земельные информационные системы и администрирование» подготовлена на кафедре в 2011 году в рамках международного проекта TEMPUS Европейской комиссии.

В 2008 г. Южным федеральным университетом был приобретен и установлен аппаратно-программный антенный комплекс УниСкан-24™, предназначенный для приема сигналов с космических спутников Земли. В результате был открыт Научно-образовательный центр (НОЦ) математического моделирования, геоинформационных технологий и космического мониторинга ЮФУ. С помощью антенного комплекса можно принимать, хранить и обрабатывать данные дистанционного зондирования Земли и производить с ними операции тематического анализа. В настоящее время станция обеспечивает прием и предварительную обработку информации с искусственных спутников Земли Aqua и Terra.

Выпускники кафедры «Землеустройство и кадастры» востребованы на рынке труда в связи с бурным развитием современных технологий администрирования в землепользовании, таких как геоинформационные технологии и космический мониторинг.

На базе кафедры ежегодно проводится Всероссийская конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг».

«Системный анализ и управление»

Кафедра системного анализа и управления (САУ) создана приказом ректора Ростовского государственного университета профессора Белоконя А.В. в мае 2004 г. Первым заведующим кафедрой САУ был избран профессор Петраков В.А., один из подвижников новых образовательных технологий.

Кафедра САУ – это образовательный центр в области инновационных и информационно-аналитических технологий. Такое ее положение обязывает непрерывно расширять сферу и повышать качество своих образовательных услуг. Причем наряду с традиционными учебными программами кафедра САУ использует инновационные технологии и непосредственно в учебном процессе, что открывает новые возможности для развития дополнительного, послевузовского и корпоративного образования. В настоящее время исполняет обязанности заведующего кафедрой к.т.н. Ксёнз Н.С.

Работа со студентами в Институте высоких технологий и пьезотехники ведется в двух направлениях: учебная и научно-исследовательская деятельность.

Уделяется большое внимание организации процесса обучения, подбору образовательных технологий, позволяющих выявлять одаренных студентов, прикреплять к ним тьютеров-магистрантов и ведущих преподавателей. Наиболее часто такая практика основывается на принципе индивидуализации. Индивидуализация образовательного процесса обеспечивает каждому студенту возможность формирования собственных образовательных целей и задач, собственной образовательной траектории за счет представления возможности выбора и собственного видения своих учебных и образовательных перспектив.

Научно-исследовательская работа талантливых студентов ведется в студенческих научных обществах (СНО), а также в условиях реального призводства пьезокерамических материалов и преобразователей в НКТБ «Пьезоприбор». К работе со студентами привлекаются ведущие преподаватели кафедры и работодатели, специалисты в области информационных технологий и создания приложений. Студенты получают навыки самостоятельной исследовательской работы, осваивают технологию оформления и представления полученных результатов, а также представление студенческих работ на конкурсы различных уровней и к опубликованию в научных журналах.

Для талантливых студентов предусмотрены именные стипендий за выдающиеся способности в учебной и научной деятельности, включая награждение медалью ЮФУ имени Ю.А. Жданова. Перспективные выпускники, магистранты и аспиранты приглашаются на работу в Институт высоких технологий и пьезотехники, где они занимаются научной и производственной деятельностью.

Уровень знаний выпускников Института высоких технологий и пьезотехники позволяет им достойно реализовать себя в различных инженерно-технических областях. Ярким примером, подтверждающим это, является история создания одного из ведущих подразделений НКТБ «Пьезоприбор». В 2006 г. в его структуре была создана лаборатория микро- и нанотехнологий (лаборатория 2.8) под руководством А.А. Панича (ныне директор Института высоких технологий и пьезотехники, доцент, Почетный работник науки и высоких технологий), который сплотил вокруг себя коллектив молодых ученых, объединенных общей целью развития пьезоэлектрического материаловедения и пьезоэлектрического приборостроения, тем самым повысив научно-производственный потенциал НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ. В состав лаборатории вошли, в основном, выпускники факультета высоких технологий. На момент создания в состав лаборатории входили 10 человек.

Ежегодно коллектив пополняется лучшими выпускниками института, желающими работать и развиваться в области пьезоэлектрического материаловедения и приборостроения. В настоящий момент в штат сотрудников лаб.2.8 входит 21 специалист, среди которых основную часть (80%) составляют выпускники ИВТ и ПТ: начальник лаборатории Дыкина Л.А., начальники секторов к.т.н Нагаенко А.В., к.т.н. Мараховский М.А., ведущие инженеры Скрылев А.В., Малыхин А.Ю., инженеры: Гирагосова Н.А., Парфенов А.А., Гончаров М.А., Гореленко К.А., Мараховский В.А., Немыкин В.А., Бостанджиян В.В., Свирский В.В.

В настоящее время лаборатория оснащена и продолжает оснащаться современным технологическим, контрольно-

измерительным и испытательным оборудованием, которое позволяет вести разработки, соответствующие мировому уровню. В частности, за последнее время сотрудниками лаборатории с привлечением студентов факультета высоких технологий выполнен ряд крупных опытно-конструкторских работ (ОКР), таких как:

– «Создание высокотехнологического производства пьезоэлементов из высокоэффективных ультрадисперсных материалов с использованием нанотехнологий»;

– «Организация высокотехнологичного производства пьезоматериалов и пьезокерамических элементов»;

– «Разработка технологической документации для создания материалов и элементов на основе прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта».

Творческим молодежным коллективом двух лабораторий 2.2 (начальник Боев А.В.) и 2.8 (начальник Дыкина Л.А.), в составе Галия С.Н., Коротоякского А.В., и выпускников ФВТ: Соколова М.В., Сметанина, М.А., Чайкина В.Е., Жукова В.О., Карюкова Е.В., Скрылева А.В., Дыкиной Л.А., под руководством опытных наставников ИВТ и ПТ была выполнена ОКР по теме «Разработка и создание высокотехнологичного производства мобильного гидроакустического комплекса освещения обстановки в различных акваториях Мирового океана на основе современных пьезоэлектрических средств нового поколения – цифрового векторно-скалярного приемника, чувствительных элементов приемника колебательной скорости и гидроакустических приемников на базе пористого пьезокомпозиционного материала»

Знания и опыт ученых и специалистов лаборатории .2.8 позволяют решать и другие сложные задачи приборостроения.

Так, по итогам НИР ««Создание перспективных технологий изготовления чувствительных элементов из пьезокомпозита связности 1-3 и пьезокерамики с нанодобавками типа сульфоиодида сурьмы для применения в электроакустических преобразователях»» разработан новый пьезокомпозиционный материал, не имеющий аналогов на мировом рынке, используемый в глубоководных гидроакустических устройствах. Изделия на основе ново-

го пьезокомпозиционного материала серийно выпускаются в НКТБ «Пьезоприбор».

В настоящее время сотрудниками этой лаборатории Скрылевым А.В. и Гореленко К.А. разрабатывается фазированный медицинский, терапевтический преобразователь для удаления онкологических новообразований, который по своим характеристикам находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

На базе лаборатории студенты регулярно проходят практические занятия, выполняют курсовые и дипломные работы. Приобретенный в ходе обучения практический опыт, а также опыт проведения совместных исследований с квалифицированными специалистами позволяют преумножить и в дальнейшем применить свои знания. Полученные результаты регулярно докладываются на конференциях, проводимых в Институте высоких технологий и пьезотехники - "Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения", а также в Академии биологии и биотехнологии - "Актуальные проблемы биологии, биотехнологий и медицины". Доклады охватывают направления, представляющие большой практический интерес. Например, старшекурсники и магистранты направлений «Системный анализ и управление», «Организация и управление наукоемкими производствами» выступили с докладами: «Разработка моделей и алгоритмов автоматизированной системы учета оправок непрерывного стана», «Контроль качества деталей из пластмасс на основе технологии машинного зрения», «Разработка моделей бизнес-процессов цеха утилизации автомобильных покрышек», «Модели совершенствования производственной системы ООО «ПК «НЭВЗ», «Анализ процессов оказания ремонтных услуг на основе имитационного моделирования», «Применение технологий Data Science в производственной деятельности инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», «Использование VR-технологии при обучении авиационного персонала».

Созданные на факультете научные студенческие общества «Датчики» и «Биотехника» (научный руководитель – д.т.н. проф. Щербань И.В.) функционируют, фактически, с 2011 г. В работе

СНО «Датчики» и «Биотехника» задействованы бакалавры, магистры и аспиранты практических всех направлений подготовки факультета – «Прикладная информатика», «Приборостроение», «Системный анализ и управление».

СНО «Датчики» изначально было организовано с целью привлечения студентов направления "Приборостроение" к участию в НИОКР "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению информационно-телекоммуникационных комплексов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS/Galileo, а СНО «Биотехника» – с целью привлечения студентов к участию в гранте РФФИ "Изучение механизмов организации произвольных движений вибрисс по показателям фоновой и вызванной фокальной электрической активности мозга крыс" (исп. НИИ нейрокибернетики ЮФУ).

За прошедшие годы в обоих обществах решались и другие научные и практические задачи в близких предметных областях.

Так, к наиболее значимым успехам студенческих научных обществ «Датчики» и «Биотехника» можно отнести работу по заданию ООО «Южное молоко» (г. Песчанокопск, Ростовская область), где была разработана распределенная информационно-измерительная система контроля параметров почвы и грунта, удостоенная благодарности губернатора Ростовской области на конференции «Инновационное сельское хозяйство» (2019г., г. Ростов-на-Дону). Изготовлен ее действующий макетный образец.

Студентами в ходе работы в СНО «Датчики», «Биотехника» опубликовано около 20 статей и докладов в журналах РИНЦ, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. По результатам деятельности получено 7 «Актов о внедрении».

Сегодня современный университет не может обойтись без студенческого самоуправления. Не исключением является и наш Институт. Студенческое самоуправление ИВТиПТ, которое возглавляет Моисеенко Екатерина, – это полноценный партнер руководства Института в решении жизненно важных проблем студентов, инициировании интересных проектов, конкурсов и меро-

приятий, общении с администрацией вуза по поводу организации обучения и т.д.

Немаловажным для Института является проведение профориентационной работы с целью привлечение абитуриентов. Ежегодно ИВТиПТ проводит дни открытых дверей, посещает школы и колледжи, а главное, поддерживает и развивает таланты школьников. С 2016 года ИВТиПТ является региональной площадкой для проведения Многопрофильной инженерной олимпиады «Звезда» по направлениям: «Русский язык», «Естественные науки», «Техника и технологии». Даже в условиях пандемии КОВИД-19, Институт проводил заключительный этап Олимпиады очно по направлениям «Естественные науки» и «Техника и технологии». Кроме олимпиады «Звезда», на площадке Института проходят такие известные среди школьников Олимпиады, как «Высшая проба», «Технологическое предпринимательство» по ряду направлений.

На площадке Южного федерального университета социально-образовательный проект компании Samsung Electronics «IT Школа Samsung», реализованный по инициативе д.т.н. Жмайлова Б.Б., проводит набор на бесплатную программу дополнительного образования по разработке мобильных приложений для старшеклассников 2021/2022 учебный год. К обучению в проекте приглашаются ученики старших (преимущественно 8-10) классов и учащиеся колледжей в возрасте до 17 лет (включительно на момент поступления). Обучение в «IT Школе Samsung» дает им возможность получить углубленные знания по программированию на языке Java, а также навыки самостоятельной разработки мобильных приложений для платформы Android.

Студенческая жизнь в ИВТиПТ – это не только учеба. Ежегодно студенты нашего Института активно участвуют в спортивных, культурно-массовых мероприятиях: «Креативный марафон», «Театральный фестиваль СТУДиЯ», «Кубок первокурсника» «Студенческая весна», «Студент года», «Спартакиада ЮФУ» и множество других. Хотя наш институт молод и по количеству студентов заметно уступает другим структурным подразделениям ЮФУ, в его копилке уже имеется много самых высоких достижений. Это первые места и гран-при фестиваля «Студенческая Весна», «Креативный марафон», «Театральный фестиваль СТУДиЯ», «Кубок первокурсника», высшие ступеньки пьедестала в спортивных состязаниях, таких как легкая атлетика, шахматы, шашки, дартс, футбол, волейбол, баскетбол, стритбол. Кроме этого, студенты Института активно организуют свой досуг, проводя такие мероприятия, как квесты, приуроченные к различным праздникам (Новый год, 8 марта), музыкальная игра «Угадай мелодию», серию интеллектуальных игр «Что? Где? Когда?», военно-патриотические мероприятия (возложение цветов к мемориалам, посещение тематических музеев и выставок и т.д.). Также студенты Института принимают активное участие в волонтерском движении (были волонтерами на Олимпиаде-2014 в г. Сочи, Чемпионате мира по футболу 2018, обеспечивали продуктами пожилых людей в период пандемии 2020 года, являются активными помощниками в приютах для животных, посещают с подарками детские дома и т.д.).

История создания факультета высоких технологий и развитие совместно с НКТБ «Пьезоприбор» Института высоких технологий и пьезотехники подтверждают правильность выбранного нами пути. Вместе мы сможем реализовать самые амбициозные задачи перехода на мировые стандарты подготовки студентов и магистрантов, расширение использования современных технологий образования, сохранения и развития позиций одного из ведущих научных центров в области пьезоэлектрического приборостроения и компьютерных технологий. Программа развития Ин-

ститута предполагает реализацию целого ряда крупных мероприятий:

1. Организация в Институте специальности для подготовки специалистов по математическому моделированию в интересах создания новых перспективных материалов с заданными свойствами, в том числе материалов для аддитивных технологий, используемых в приборостроении.

2. Создание на базе Института высоких технологий и пьезотехники научно-образовательного центра «Ультразвуковые и аддитивные технологии» (УЗАТ) в рамках программы развития ЮФУ до 2030 года. Направления работы Центра будут соответствовать стратегии развития аддитивных технологий в России, изложенной в распоряжении правительства РФ № 1913-р от 14 июля 2021 г и стратегии развития электронной промышленности РФ, изложенной в распоряжении № 20-р от 17 января 2020 г. Ключевыми направлениями работы центра УЗАТ станут:

✓ Материаловедение активных диэлектриков: пьезоэлектрические, композиционные, функциональные материалы;

✓ Математическое моделирование материалов, устройств, систем;

✓ Разработка ультразвуковой техники в отраслях: медицина, адаптивная оптика, приводные и исполнительные механизмы прецизионной точности, нанороботы;

✓ Аддитивные технологии в медицине, машиностроении, ракетно-космической технике, морском приборостроении.

Деятельность Центра будет направлена на развитие инженерных талантов в студенческой среде с использованием новейших мировых технологий. Вовлечение молодёжи в научно-исследовательские проекты, выполнение конструкторских работ и повышение общего уровня квалификации делает Центр востребованным и перспективным, в котором совместно с Центром коллективного пользования «Высокие технологии» под руководством ученых и специалистов Института высоких технологий и пьезотехники студенты смогут проводить научные исследования

и выполнять разработки по самым передовым направлениям развития науки и техники.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ, ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА, АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ, НАВИГАЦИИ, МЕДИЦИНЫ, ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ, ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И СВЕТОТЕХНИКИ, СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Векторно-скалярные приёмники как основа современных гидроакустических систем пассивного обнаружения подводных и надводных объектов

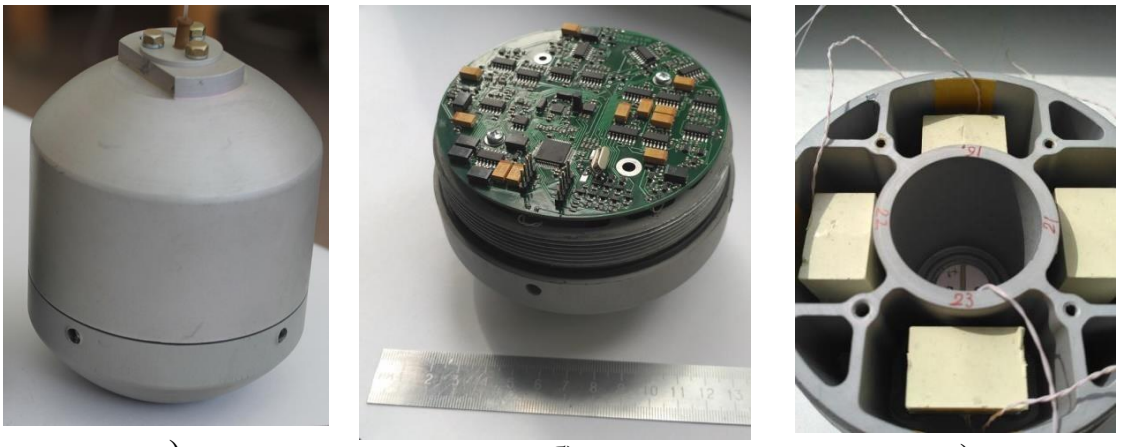
С.Н.Галий, В.К.Доля, А.В.Боев, А. А. Панич
НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Анализ тенденций развития [1, 2] современных гидроакустических средств пассивного обнаружения подводных и надводных плавсредств однозначно показывает, что наиболее перспективными являются системы, построенные на основе векторно-скалярных приёмников. Эта тенденция обусловлена сочетанием двух факторов – сохранением в широком частном диапазоне направленных свойств малогабаритных приёмников и низким уровнем собственных шумов.

В настоящей работе представлены результаты разработки цифрового векторно-скалярного приёмника (ЦВСП), построенного на основе высокоэффективных пьезоэлектрических приёмников (скалярного приёмника гидроакустического давления и двух векторных приёмников колебательной скорости акустического поля), а также современных аналого-цифровых средств приёма и обработки информации.

Общий вид разработанного ЦВСП представлен на рис. 1.

Разработанный цифровой векторно-скалярный приемник (ЦВСП) включает размещенные в металлическом герметичном корпусе следующие узлы: приемник акустического давления (скалярный приёмник), приемники колебательной скорости (ПКС) каналов X и Y (векторные приёмники), плата обработки и управления. Структурная схема ЦВСП приведена на рис. 2.



а) б) в)

Рис. 1. Общий вид разработанного ЦВСП:
а) ЦВСП в сборе; б) электронный узел ЦВСП;
в) скалярные и векторные приёмники в корпусе

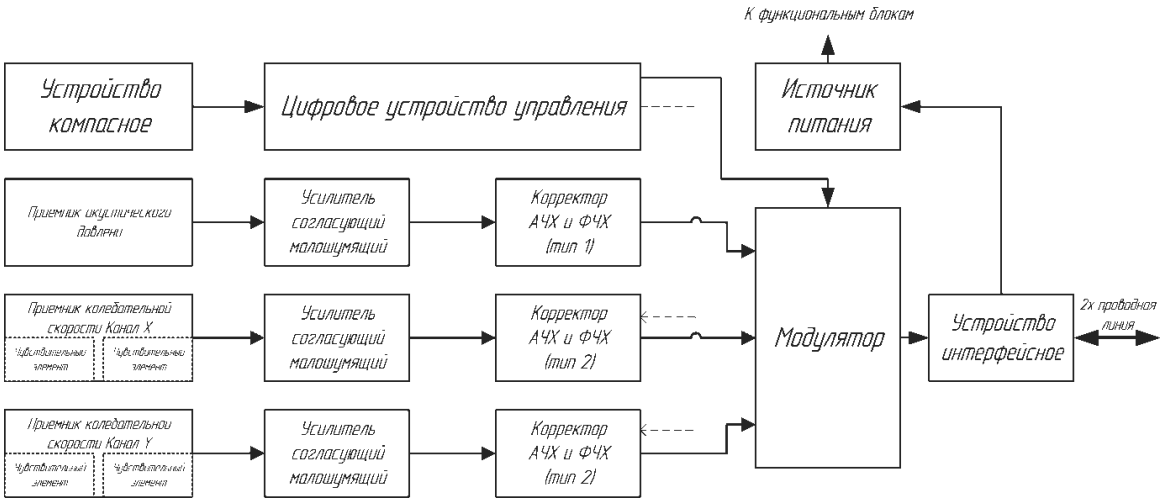


Рис. 2. Структурная схема ЦВСП

Плата обработки и управления объединяет все электронные узлы ЦВСП, а именно: цифровое устройство управления, компасное устройство, источник питания (вторичный), усилители согласующие малошумящие каналов ПКС и акустического давления, корректоры амплитудных и фазовых частотных характеристик каналов, модуляторы и интерфейсное устройство.

ЦВСП функционирует по следующему алгоритму: цифровое устройство управления при подаче питания на ЦВСП инициализирует корректоры амплитудных и фазовых частотных характеристик ПКС и приемника акустического давления, инициализирует компасное устройство, генератор сигналов опорной фазы и опорной частоты. По окончании инициализации запускается опрос компасного устройства, выполняется расчет направления

на магнитный северный полюс, формируются сигналы управления модуляторами каналов, сигнала опорной частоты и сигнала опорной фазы в соответствии с вычисленным направлением. Управляющее устройство отслеживает события появления команд управления на линии связи. С помощью команд управления могут быть изменены параметры работы некоторых функциональных узлов ЦВСП.

В модуляторе принятые сигналы ПКС, используя квадратурную модуляцию, переносятся по частоте вверх. При переносе проводится коррекция сигналов на магнитный северный полюс в соответствии с показаниями компасного устройства. Коррекция сигналов ПКС производится таким образом, чтобы направление максимума чувствительности канала Y соответствовало направлению на магнитный северный полюс, а канала X был ортогонален. Сигнал, принятый каналом акустического давления, передается без переноса спектра.

Интерфейсное устройство реализует физический уровень взаимодействия ЦВСП с внешними устройствами. Передача принятых акустических сигналов, питающего напряжения и сигналов управления осуществляется по двухпроводной кабельной линии связи с обеспечением «общей» цепи питания посредством контакта корпуса ЦВСП с морской средой.

ПКС состоит из двух, электрически последовательно соединенных, чувствительных элементов (ЧЭ), расположенных симметрично относительно приемника акустического давления и оси всего ЦВСП. Таким образом реализуется условие единого фазового центра приемника и обеспечивается компенсация возможных крутильных колебаний корпуса ЦВСП.

Известно [4], что пьезоэлектрические приёмники обеспечивают наиболее оптимальные значения параметров приёма акустических сигналов. Поэтому в ЦВСП реализованы пьезоэлектрические преобразователи в качестве скалярного приёмника и приёмников колебательной скорости. Последние оптимизированы в соответствии с рекомендациями, представленными в [3,].

Одним из основных требований, предъявляемых к ЦВСП, является возможность регистрации акустических сигналов, сравнимых по величине с уровнем спектральной плотности шума среды – $S_{ш.среда}(f)$ (рис. 3) [5]. Это требование вытекает из необходимости обеспечения минимального порогового уровня ПКС (минимального регистрируемого сигнала).

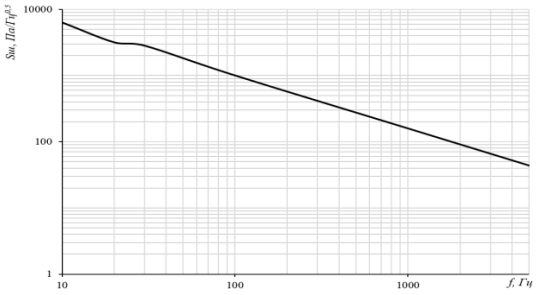


Рис. 3. Частотная зависимости спектральной плотности шума среды [5]

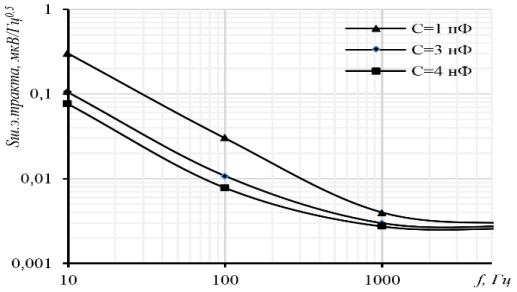


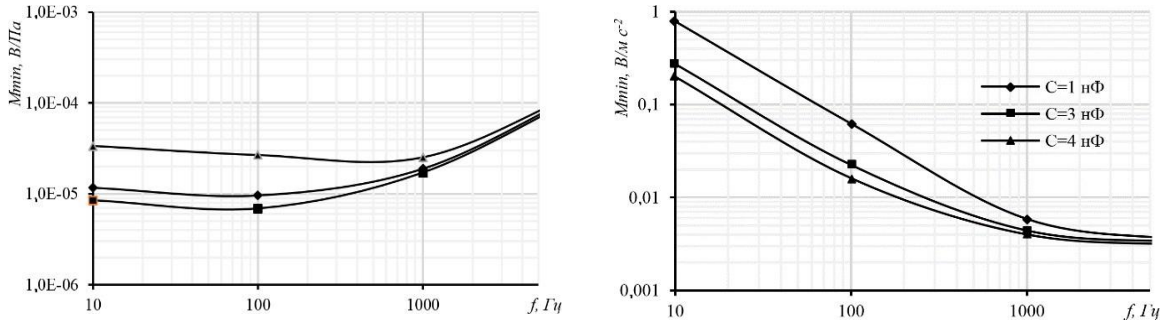
Рис. 4. Частотная зависимости спектральной плотности шума согласующего усилителя

Пороговый уровень зависит от уровня собственных шумов входного электронного тракта, теплового шума ЧЭ, тепловых флуктуаций смещения ЧЭ и элементов конструкции ЦВСП, а также применяемого алгоритма обработки сигналов. Известно [6], что для обеспечения стабильных характеристик и режима работы входного электронного тракта (согласующего усилителя напряжения), входное сопротивление выбирается много меньше сопротивления утечки ЧЭ (определяется тангенсом диэлектрических потерь), следовательно, тепловым шумом ЧЭ в рабочей полосе можно пренебречь. Ввиду особенностей применения ЦВСП, в среде относительно стабильной по температурному режиму, также пренебрегаем составляющими вызванными тепловой флуктуаций смещения ЧЭ и элементов конструкции ВСП. Таким образом пороговый уровень в большей степени определяется уровнем собственных шумов входного электронного тракта. Данное условие выполняется когда спектральная плотность шума электронного тракта – $S_{ш.э.тракта}$ приведенная в соответствии с чувствительностью ЧЭ ПКС меньше, либо равна $S_{ш.среда}$. На рис. 4 приведены рассчитанные в программе Or CAD PSpice графики спектральной плотности шума разработанного для данного при-

емника согласующего усилителя напряжения – $S_{ш.э.тракта}(f)$ при различных значениях электрической емкости ЧЭ. Подъем уровня спектральной плотности шума в области низких частот обусловлен фликкер-эффектом шума типа *1/f*. Используя рассчитанные значение $S_{ш.э.тракта}(f)$ и уровень спектральной плотности шума среды $S_{ш.среда}(f)$, установленный при штиле [5], определим минимально необходимое значение чувствительности ЧЭ ПКС – $M_{min}(f)$ [В/Па] по формуле:

$$M_{min}(f) = \frac{S_{ш.э.тракта}(f)}{S_{ш.среда}(f)} \qquad (1)$$

На рис.5.а представлены результаты расчета минимально необходимого значения чувствительности ЧЭ ПКС. Так как предлагаемый ЧЭ по сути является вибропреобразователем, то для дальнейшего рассмотрения удобно использовать чувствительность, выраженную в единицах виброускорения (рис. 5.б). Из представленного графика (рис. 5.б) следует, что чувствительность ЧЭ ПКС должна падать при увеличении частоты с крутизной ~20 дБ/дек.



а б

Рис. 5. График частотной зависимости минимальной чувствительности ПКС (а - приведенная к акустическому давлению, б - к виброускорению)

Традиционные пьезоэлектрические акселерометры используют в частотном диапазоне, ограниченном нижней частотой среза (определяется параметрами преобразователя и входной цепи электронного тракта), частотой основного (установочного) резонанса – ω_0 и значением механических потерь – β (рис. 6, частотная область – 1).

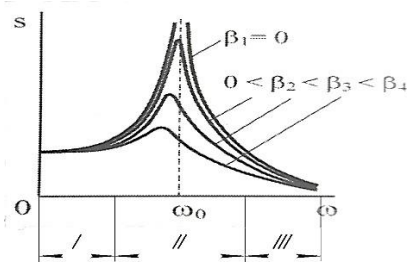


Рис. 6. Типовая частотной характеристики чувствительности вибропреобразователей

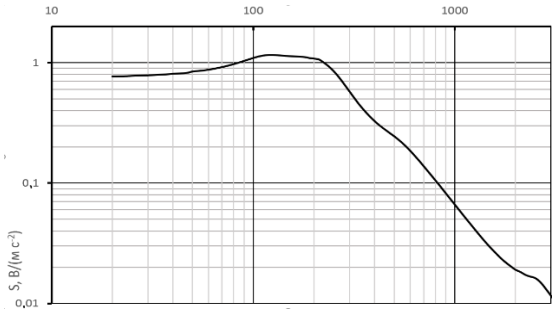


Рис. 7. Частотная характеристика чувствительности разработанного ПКС

При использовании акселерометра только в частотной области I (рис.6), ЦВСП будет обладать излишне высокой чувствительностью в области высоких частот, что ограничит динамический диапазон. Ограничение частотного диапазона в области высоких частот вызвано тем фактом, что ПКС будет обладать чувствительностью к колебательной скорости и акустическому давлению линейно возрастающей с крутизной 20 дБ/декаду.

Рассмотрим частотную характеристику чувствительности акселерометра за частотой основного резонанса (рис. 6, частотная область – III). Чувствительность монотонно убывает с крутизной 20 дБ/дек до частоты следующего резонанса, как и требуемая чувствительность (см. рис. 7). Следовательно, если применять меры демпфирования колебаний ЧЭ, т.е. увеличить механические потери β на частоте основного резонанса (рис. 6, частотная область – II) и применить частотную коррекцию, становится возможным использовать практически весь частотный диапазон (рис. 6 частотная область – I, II, III), в котором данная характеристика достаточно хорошо повторяет форму требуемой.

В качестве ЧЭ ПКС разработан биморфный изгибный преобразователь с распределенной инерционной массой, применены технические решения, обеспечивающие демпфирование основного механического резонанса пластины. Использование ЧЭ с деформацией изгиба позволило значительно повысить коэффициент преобразования, при малых массах и габаритных размерах преобразователя в диапазоне низких и средних частот, что особенно необходимо для регистрации чрезвычайно малых уровней

колебательных скоростей. Так же при проведении расчета и оптимизации ЧЭ КС выбраны геометрические размеры элементов конструкции, обеспечивающие требуемую чувствительность и отсутствие паразитных резонансов [3]. На рис. 9 приведены частотные характеристики чувствительности каналов акустического давления и ПКС.

Использование в качестве ЧЭ ПКС изгибного вибропреобпазователя с демпфированием частоты основного резонанса, позволило создать малогабаритный высокочувствительный ПКС, обладающий оптимальным соотношением чувствительности и рабочего диапазона частот.

Для того чтобы наиболее полно использовать динамический диапазон линии связи, после предварительного усилителя применяется частотная коррекции, с характеристикой обратной частотной зависимости шума среды. Также частотный корректор выполняет функцию формирования рабочей полосы частот приемных каналов. Ввиду различных частотных характеристик чувствительности приемника акустического давления и ПКС применяются частотные корректоры разной структуры. В результате амплитудные и фазовые характеристики каналов ЦВСП одинаковы (см. рис. 9).

Ниже приведены основные технические характеристики разработанного ЦВСП:

– рабочий диапазон частот, Гц от 5 до 2500;

– диапазон автоматической регулировки усиления, дБ от минус 20 до 20;

– напряжение питания, В от 12 до 20;

– потребляемый ток, мА не более 80;

– глубина погружения, м, не более 350;

– размеры, мм, не более 130;

– масса (в воздухе), кг, не более 1.2.

На рис. 10 представлены результаты натурных испытаний разработанного ЦВСП в условиях морского полигона (г. Анапа). В левой части рисунка – акустические сигналы, генерируемые в процессе испытаний различными объектами (цель №1 и цель

№2); в правой части – пеленг и сила цели. Проведенные испытания показали, что ЦВСП обеспечивает как обнаружение объекта, так и его сопровождение путём определения текущего пеленга.

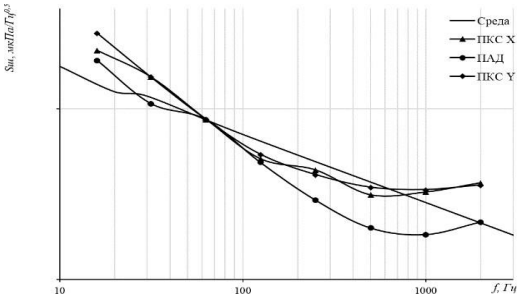


Рис. 8. Спектральная плотность шума среды, каналов акустического давления и колебательной скорости ЦВСП

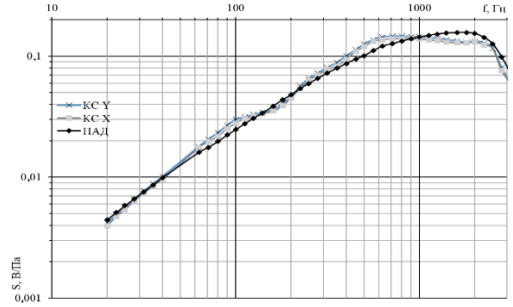


Рис. 9. Частотная характеристики чувствительности каналов акустического давления и ПКС ЦВСП (после частотной коррекции)

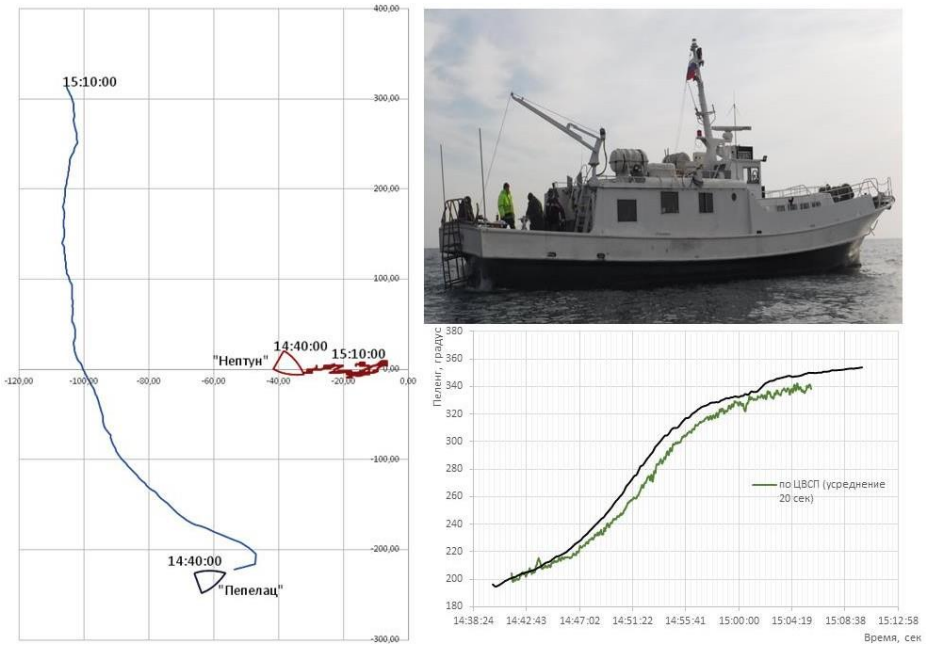


Рис. 10 Пеленгограмма, рассчитываемая по сигналам с векторно-скалярного приемника

Список литературы

1. Crance, J.L., Berchok, C.L., and Keating, J.L. (2017). “Gunshot call production by the North Pacific right whale Eubalaena japonica in the south-eastern Bering Sea”, Endangered Species Research, 34, 251-267.

2. Gillespie, D., Gordon, J., McHugh, R., McLaren, D., Mellinger, D. K., Redmond, P., Thode, A., Trinder, P., and Deng, X.-Y. (2008). “PAMGUARD:

Semiautomated, open source software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans,” J. Acoust. Soc. Am. 30, 54-62.

3. Патент РФ 180 726. Доля В.К., Ламека А.П., Галий С.Н. Пьезоэлектрический изгибный преобразователь. Заявл.: 2017141646, 29.11.2017. Опубл.: 21.06.2018 Бюл. № 18

4. Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПБ. Изд-во «Элмор», 1997

5. Technical documentation hydrophones type 8103, 8104, 8105, 8106. Bruel & Kjer 1992

6. Levinzon F., Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics. Springer. 2014

Измерительные преобразователи с двумя степенями свободы на базе составных пьезотрансформаторов

В. Н. Седалищев

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

Пьезорезонансные датчики (ПРД) являются широко распространенными измерительными устройствами [1, 2]. На основе пьезокварца создают ПРД с частотным выходом. Пьезокерамические материалы обладают более высоким пьезомодулем, что позволяет создавать на их основе датчики с амплитудным выходом, в том числе, пьезотрансформаторные датчики (ПТД) [3, 4, 5].

Достоинствами ПТД являются простота конструкции, технологичность изготовления, низкая стоимость, надежность в работе, применимость для работы тяжелых условиях. Основным их недостатком является низкая точность измерений, обусловленная нестабильностью свойств пьезокерамических материалов [6].

С целью повышения метрологических характеристик ПРД применяют дифференциальный способ формирования выходного сигнала. Для этого в конструкции датчика используют два пьезорезонатора. На один из них воздействует измеряемая физическая величина, а второй - используется для сравнения. При этом приходится решать ряд трудновыполнимых задач: производить подбор пар пьезоэлементов с близкими характеристиками, обеспечивать акустическую развязку и др. В связи с этим было предложено новое поколение ПРД (ПТД), основанное на использовании связанных колебаний в системах с двумя и более степенями свободы. Конструктивно ИП на связанных колебаниях могут включать в себя пьезорезонаторы (пьезотрансформаторы), дополнительные вибраторы, элементы связи между ними [7, 8].

Измерительные устройства такого типа характеризуются следующими особенностями реализации связанных колебаний в системе:

- управление добротностью резонаторов приводит к перераспределению амплитуд связанных колебаний в системе, при

этом на нормальные частоты синхронизации (НЧС) изменяются существенно меньше;

- при воздействии на частотозадающие параметры резонаторов изменяются как амплитуды, так и частоты связанных колебаний в системе,
- при управлении активными потерями энергии в элементе связи изменяются амплитуды колебаний резонаторов, но только на одной из НЧС, сами НЧС при этом остаются практически неизменными;
- при воздействии на частотозадающие параметры элемента связи изменяется одна из НЧС, амплитуды колебаний резонаторов при этом не изменяются.

Важной особенностью ИП такого типа является то, что в качестве степеней свободы могут рассматриваться не только непосредственно сами резонаторы, но также и процессы синхронизации синфазных и противофазных колебаний в системе. Это позволяет создавать ИП с двумя степенями свободы на базе составного ПЭТ с согласованными размерами (рис. 1).

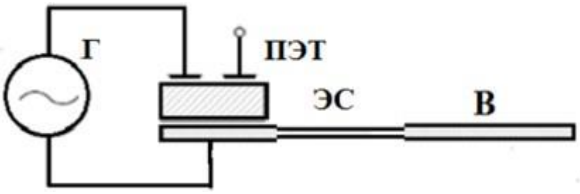


Рис. 1. Структурная схема ИП на базе составного ПЭТ

В таком ИП специальный вибратор (В), имеющий согласованные геометрические размеры, взаимодействует с ПЭТ через элемент связи (ЭС). Для формирования выходного сигнала ИП может быть использовано отношение выходных напряжений ПЭТ, измеренные на НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе, а также отношение НЧС. Такой способ построения ИП с дифференциальным (логометрическим) выходом позволит избавиться от необходимости подбора пар пьезоэлементов с идентичными характеристиками, повысить точность измерений. В зависимости от реализуемого механизма чувствительности в

качестве чувствительного элемента датчика может выступать вибратор или элемент связи между ПЭТ и вибратором.

На рис. 2 представлен конструкция датчика уровня сыпучих материалов на базе составного пьезотрансформатора с протяженным элементом связи, применимого для работы в тяжелых условиях.

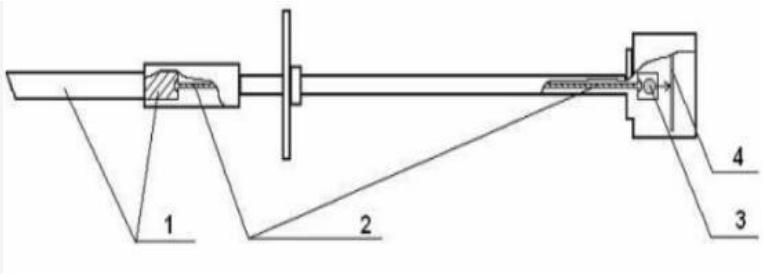


Рис. 2. Датчик уровня сыпучих материалов на базе составного ПЭТ:
1 - вибратор; 2 – протяженный элемент связи; 3 - ПЭТ;
4 - электронный блок

На рис. 3 приведен внешний вид датчика вязкости на базе составного ПЭТ с согласованными размерами.

Рис. 3. Внешний вид вискозиметра на базе составного ПЭТ

Чувствительным элементом датчика является вибратор, совершающий высокочастотные продольные колебания. Вибратор выполнен в виде металлической пластины, по длине которой устанавливается определенное число стоячих волн.

Датчики на базе составных ПЭТ с согласованными размерами имеют простую конструкцию, низкую стоимость, технологичны при изготовлении, надежны в эксплуатации, применимы для работы в тяжелых условиях.

Список литературы

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М., 2007.

3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации // Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Ростов-на-Дону, 2006.

4. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М., 2006.

5. Трофимов А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статистических нагрузок: – М.: Энергоатомиздат, 1979 – 95 с.

6. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение / пер. с. англ. С.Н. Жукова. Минск, 2003.

7. Седалищев В. Н., Хомутов О. И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. 184 с.

8. SedalischevV., SergeevaYa. Simulation of measuring transducers based on interconnected piezoresonators // X International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2020. Barnaul, 24-25 April 2020. / J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1615, article: 012030.

Разработка преобразователей пространственной вибрации

А.В. Орлов, В.Я. Смирнов
АО «Вибро-прибор», г. Санкт-Петербург, Россия

Среди многообразия применяемых вибропреобразователей всё большее значение приобретают многокомпонентные преобразователи пространственной вибрации (ППВ), измеряющие параметры вектора вибрации (как правило, измеряется модуль вектора и его направление в декартовой системе координат, оси которой связаны с объектом измерений [1]). Учитывая, что среди многокомпонентных вибропреобразователей наибольшее распространение получили пьезоэлектрические вибропреобразователи, которые позволяют проводить измерение составляющих вектора виброускорения в достаточно широкой полосе частот, ниже основное внимание уделяется именно пьезоэлектрическим ППВ, измеряющим виброускорение. Рассмотрим некоторые трудности, возникающие при изготовлении и применении многокомпонентных ППВ.

Как правило, многокомпонентный ППВ состоит из однокомпонентных чувствительных пьезоэлементов (ЧПЭ), размещённых в одном корпусе. Это позволяет снизить себестоимость изготовления ППВ, с одной стороны, а с другой, – существует возможность применения при изготовлении многокомпонентных ППВ многих наработок, применяемых для однокомпонентных вибропреобразователей (ОВП), в т.ч. способов поверки (калибровки), регламентированных в [2]. Очень часто от разработчиков ППВ требуется создание таких средств измерений, работоспособность которых проверялась бы как перед эксплуатацией, так и в процессе эксплуатации.

Можно выделить несколько основных подходов разработчиков к вопросу проверки работоспособности ППВ. Как правило, для проверки их работоспособности в эксплуатации чаще используется свойство «обратимости» вибропреобразователей (в ППВ – свойство «обратного пьезоэффекта»), которое заключается в электрическом возбуждении ЧПЭ и определении параметров его

отклика на электрический сигнал. Наиболее вероятно, предпочтительность данного варианта объясняется возможностью его более простой реализации на практике.

Однако надо учесть, что при данном подходе проверяется только возможное изменение некоторых параметров (например, ёмкостей пьезоэлементов) и целостность электрических цепей ППВ, иногда проверяется и правильность работы согласующих усилителей (например, усилителей заряда). Но изменение ёмкостей ППВ зависит от изменения диэлектрической проницаемости материала пьезоэлементов, а изменение коэффициентов преобразования (чувствительностей) зависит ещё и от изменения пьезомодуля пьезоэлемента, поэтому при таком подходе можно определять только работоспособность ППВ по принципу «работает – не работает».

Существует ещё целый ряд предложений, позволяющих с большей или меньшей достоверностью определить правильность работы ППВ. Например, использование в одном ЧПЭ двух пьезоэлементов, которые при проверке последовательно возбуждаются нормированным значением тестового сигнала с одновременным съёмом сигнала с выхода невозбуждённого пьезоэлемента и сравнение его с ранее известным; использование второго возбудителя (любого принципа действия), непосредственно примыкающего к основным ЧПЭ или к корпусу, в котором размещены основные ЧПЭ; определение правильности работы ППВ по информации, полученной от других вибропреобразователей, установленных на этом же объекте (выходные сигналы таких вибропреобразователей должны быть коррелированы, что при определённом алгоритме их обработки позволяет выявить при наличии даже дефектный вибропреобразователь).

Как правило, перечисленные способы определения работоспособности пьезоэлектрических вибропреобразователей требуют применения более сложной конструкции преобразователя или более сложной схемы обработки информации. По этой причине внедрение этих способов может оказаться целесообразным на

объектах, аварии на которых могут привести к большим потерям (включая и человеческие).

Более приемлемыми и относительно простыми способами являются способы, позволяющие определить работоспособность с помощью дополнительных одного [3] или двух [4] контрольных каналов, расположенных в одном корпусе с ортогональными каналами ППВ.

Последовательность действий и теоретическое обоснование определения работоспособности с помощью четырёхкомпонентного ППВ довольно подробно приведено в [3]. В этой же работе приведены и результаты экспериментальных исследований. Однако, с помощью приведённого в [3] четырёхкомпонентного ППВ невозможно определить, какой ЧПЭ неисправен, если проверка показала неработоспособность ППВ. Это можно сделать с помощью пятого контрольного ЧПЭ [4], ось чувствительности которого расположена в одном корпусе с четырьмя ЧПЭ под фиксированными углами к осям чувствительности ортогональных ЧПЭ. Фиксированные углы между осью чувствительности пятого контрольного ЧПЭ и осями чувствительности ортогональных ЧПЭ должны отличаться от фиксированных углов между осью чувствительности четвёртого контрольного ЧПЭ и осями чувствительности ортогональных ЧПЭ.

Принцип работы пятикомпонентного ППВ основан на сравнении параметров вектора виброускорения, определённых в одной прямоугольной (декартовой) и шести косоугольных системах координат. Сравнением полученных значений параметров вектора виброускорения определяются работоспособность ППВ при наличии неисправного канала и сам неисправный канал с целью его отключения и дальнейшей эксплуатации по назначению уже четырёхкомпонентного ППВ. Дальнейшая эксплуатация четырёхкомпонентного ППВ с целью определения параметров вектора вибрации позволяет оценить только его работоспособность по принципу «правильное определение параметров вектора виброускорения или неправильное». Выявить при необходимости неисправный канал уже невозможно.

Исходными данными для определения работоспособности пятикомпонентного ППВ и неисправного канала (при необходимости) являются:

- коэффициенты преобразования каналов ППВ (k_X, k_Y, k_Z, k_{K_1} и k_{K_2}) определённые при первичной или периодической поверках (в каждый канал X, Y, K_1 и K_2 включают ЧПЭ, согласующий усилитель (как правило, усилитель заряда) и измеритель разности фаз, а в канал Z включают ЧПЭ и согласующий усилитель, при этом измеритель разности фаз при машинной обработке результатов может быть реализован с помощью компьютера);

- углы β_1, β_2, γ_1 и γ_2 определяющие положение осей чувствительности дополнительных каналов K_1 и K_2 относительно осей декартовой системы координат (углы должны определяться после изготовления ППВ и фиксироваться в паспорте изделия);

- зафиксированные на момент определения работоспособности ПВП измеренные выходные сигналы его каналов при воздействии на него вектора виброускорения (U_X, U_Y, U_Z, U_{K_1} и U_{K_2}). Выходные сигналы могут определяться их амплитудными или средними квадратическими значениями (далее – «значениями»).

По аналогии с теоретическими основами применения четырёхкомпонентного ППВ [3] с помощью выходных сигналов и коэффициентов преобразования каналов можно определить

- измеренные значения проекций вектора виброускорения на оси чувствительности каналов ($a^{\text{И}}_X$, $a^{\text{И}}_Y$, $a^{\text{И}}_Z$, $a^{\text{И}}_{K_1}$ и $a^{\text{И}}_{K_2}$);

- расчётные значения проекций вектора виброускорения на оси чувствительности каналов, определённые с помощью первого и второго контрольных каналов ($a^{\text{Р}}_{X_1}$, $a^{\text{Р}}_{X_2}$, $a^{\text{Р}}_{Y_1}$, $a^{\text{Р}}_{Y_2}$, $a^{\text{Р}}_{Z_1}$, $a^{\text{Р}}_{Z_2}$, $a^{\text{Р}}_{K_1}$, $a^{\text{Р}}_{K_2}$;

- значения вектора виброускорения в семи системах координат: одной декартовой ($|\vec{a}|$) и шести косоугольных ($|\vec{a}|_{X_1}$; $|\vec{a}|_{Y_1}$, $|\vec{a}|_{Z_1}$, $|\vec{a}|_{X_2}$; $|\vec{a}|_{Y_2}$; $|\vec{a}|_{Z_2}$):

- среднее арифметическое значение вектора виброускорения по результатм расчёта значений вектора виброускорения в семи системах координат - $|\vec{a}|_{\text{СА}}$;

- отклонения от среднего арифметического расчётных значений модуля вектора виброускорения в семи системах координат ($\delta|\vec{a}|,\ \delta|\vec{a}|_{X_1}, \delta|\vec{a}|_{Y_1}, \delta|\vec{a}|_{Z_1}, \delta|\vec{a}|_{X_2}, \delta|\vec{a}|_{Y_2}, \delta|\vec{a}|_{Z_2}$).

Если определённые значения относительных отклонений по абсолютной величине не превосходят заданное значение (например, 3%), то принимается, что пятикомпонентный ППВ работоспособен, а в его каналах отсутствует неисправность. Если же хотя бы одно из семи значений по абсолютной величине превышает заданное значение, то принимается версия, что пятикомпонентный ППВ неработоспособен, после чего необходимо определять неисправный канал последовательным сравнением расчетных и измеренных значений проекций ортогональных и контрольных каналов.

При сравнении расчетных и измеренных значений проекций могут возникать представленные в докладе различные варианты, позволяющие определить неисправный канал пятикомпонентного ППВ, при этом, возникновение неисправности в любом одном канале оставляет возможность дальнейшей эксплуатации ППВ, при условии исключения неисправного канала из дальнейшего процесса обработки результатов измерений.

Список литературы

1. Сабиров Ф.С. Датчики пространственных вибраций и диагностика процесса обработки на станках. Ж. «Датчики и системы» №3, 2017, с. 55 – 61.

2. ГОСТ Р 8.669-2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки».

3. Смирнов В.Я, Орлов А.В. и др. Проверка работоспособности трёхкомпонентного вибропреобразователя. Ж. «Мир измерений», №2, апрель 2016, с 46–52.

4. Патент РФ № 2667336. Изобретения. Полезные модели № 26, 18.09.2018.

Пьезоэлектрический датчик ускорения с многофункциональным преобразователем

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

Рассмотрена конструкция и работа многофункционального преобразователя пьезоэлектрического датчика ускорения с двумя динамическими диапазонами, стабилизацией температурного изменения характеристик и функцией тестирования. Преобразователь разработан в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ на основе проведенных исследований с целью создания пьезоэлектрического датчика, обладающего расширенным рабочим динамическим диапазоном, повышенной точностью работы при изменяющейся температуре окружающей среды и возможностью контроля его работоспособности без демонтажа с контролируемого объекта.

Преобразователь выполнен в виде диска с центральным отверстием для крепления к основанию датчика и содержит две пластины 1, 2 из пьезоэлектрической керамики (рис. 1), жестко соединенные между собой термодиффузионной сваркой по металлическому слою, образующему общий внутренний электрод 3. Пластины 1, 2 наполяризованы по толщине (направление поляризации обозначены стрелками). На внешней поверхности А пластины 1 расположены два концентрических кольцевых электрода 4, 5, а на противоположной поверхности Б пластины 2 – четыре концентрических кольцевых электрода 6–9.

Электрическая схема датчика (рис. 2) содержит коммутационную плату, на которой смонтированы два согласующих зарядовых усилителя (СЗУ) U1, U2 с постоянными конденсаторами C1, C2 в цепях их отрицательной связи и разделительный конденсатор C3, соединенные с электродами преобразователя Z (нумерация электродов соответствует рис. 1).

Преобразователь и коммутационная плата размещены в стандартном корпусе виброизмерительного преобразователя типа АК317 [1, с. 172–174].

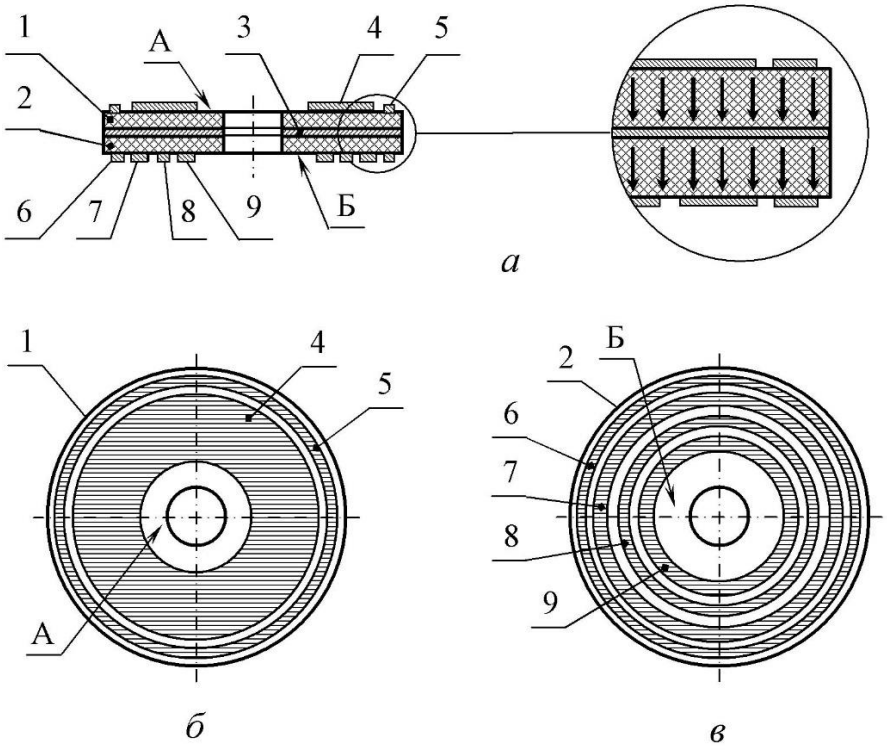


Рис. 1. Многофункциональный преобразователь: *а* – продольный разрез; *б*, *в* – вид со стороны поверхностей А и Б; 1, 2 – пластины из пьезоэлектрической керамики; 3 – внутренний электрод; 4–9 – внешние электроды

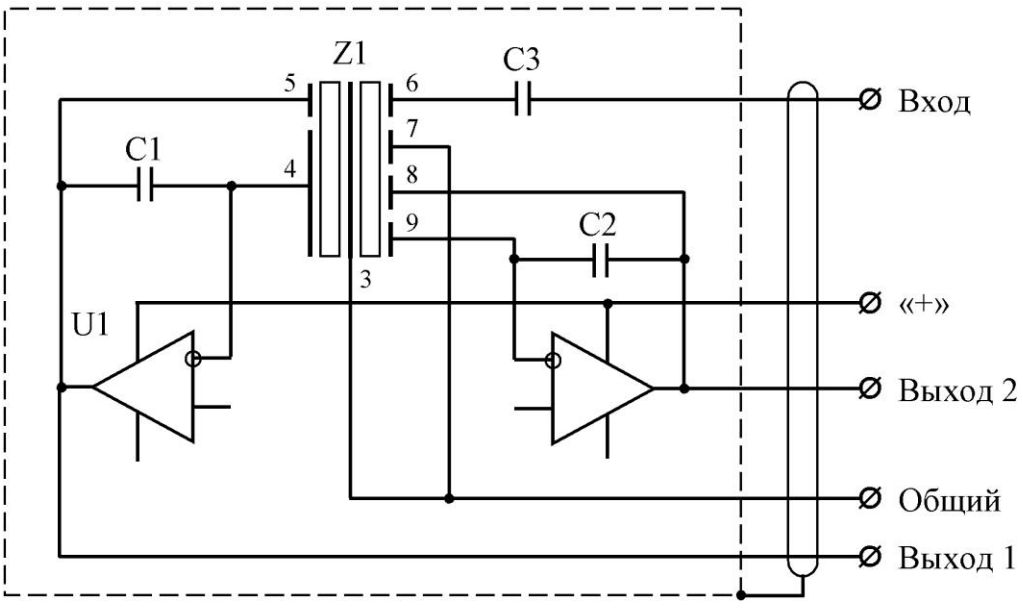


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема датчика

В процессе работы датчика выполняются четыре функции:

1 – преобразование ускорения в два различных напряжения на выходах СЗУ, соответствующих двум динамическим диапазо-

нам, благодаря чему расширяется общий динамический диапазон измерения;

2 – активная компенсация температурного изменения коэффициентов преобразования;

3 – дистанционная проверка работоспособности датчика во всем его рабочем диапазоне температур без демонтажа с контролируемого объекта;

4 – температурная стабилизация амплитуды колебаний преобразователя, возбуждаемых при проверке работоспособности во всем рабочем диапазоне температур.

Первая функция выполняется путем использования разных по площади электродов 4 и 9 преобразователя, с которых снимаются отличающиеся по значению электрические заряды при воздействии на датчик одного и того же ускорения [2].

Выполнение второй функции основано на использовании температурного изменения диэлектрической проницаемости пьезоэлектрической керамики, вызывающего пропорциональное изменение электрических емкостей между электродами 4, 5 и 8, 9 преобразователя, которые включены в цепи отрицательной обратной связи СЗУ. Эти емкости, вместе с выбранными значениями емкостей конденсаторов С1 и С2 обеспечивают изменение коэффициентов передачи СЗУ обратно пропорционально температурному изменению коэффициентов преобразования ускорения [3, с. 101–107, 120], [4].

Третья функция выполняется путем возбуждения в преобразователе за счет обратного пьезоэффекта контролируемых по амплитуде и частоте деформаций, аналогичных возникающим от воздействия ускорения, и сравнении напряжения отклика на выходе со значениями, полученными при калибровке датчика [1, с. 185–189], [3, с. 107–116], [5]. Это осуществляется путем подачи на электрод 6 преобразователя эталонного переменного напряжения от внешнего источника.

Четвертая функция осуществляется использованием делителя подаваемого напряжения, состоящего из постоянной емкости конденсатора С3 и зависящей от температуры емкости между

электродами 3, 6 преобразователя. При этом амплитуда напряжения на электроде 6 автоматически изменяется обратно пропорционально температурному изменению пьезомодуля d_{31} пьезоэлектрической керамики, что компенсирует температурную зависимость амплитуды возбуждаемых колебаний в преобразователе при тестировании.

Значение емкости конденсатора С3 может быть найдено из формулы:

$$C_3 = \frac{C_{3,6}^{(0)}\left(d_{31}^{(t)} - d_{31}^{(t)}\varepsilon_{33}^{(t)}/\varepsilon_{33}^{(0)}\right)}{d_{31}^{(0)} - d_{31}^{(t)}}$$

где $C_{3,6}^{(0)}$, $C_{3,6}^{(t)}$ – емкость между электродами 3, 6; $d_{31}^{(0)}$ $d_{31}^{(t)}$ – пьезомодуль, $\varepsilon_{33}^{(0)}, \varepsilon_{33}^{(t)}$ – диэлектрическая проницаемость при нормальной и текущей температуре соответственно.

Испытания проводились на трех макетных образцах датчиков с преобразователями ∅18×1,3 мм из ЦТС-19М. СЗУ собраны на операционных усилителях TL082IPT с предельной рабочей температурой 105 °С.

Усредненные значения метрологических характеристик образцов:

- коэффициент преобразования (амплитудные значения) первого диапазона 440 м/с^2, второго диапазона 3400 м/с^2;

- верхняя граница рабочих динамических диапазонов (амплитудные значения) – первого диапазона 440 м/с^2, второго диапазона 3400 м/с^2;

- частота установочного резонанса 13,86 кГц;

- относительное изменение коэффициента преобразования в диапазоне температур от 20 до 100 °С – без термокомпенсации 17 %, с термокомпенсацией от 1 до минус 2%;

- относительное отклонение при дистанционном тестировании от значений, полученных по стандартным методикам – коэффициента преобразования ±2,3 %, частоты установочного резонанса не более 1 %.

Таким образом, использование рассмотренного многофункционального преобразователя позволяет: расширить рабочий динамический диапазон более чем в 7,5 раз и использовать один датчик вместо двух с различными рабочими динамическими диапазонами, снизить температурную погрешность измерения в 5,6 раз, проводить дистанционную проверку работоспособности датчика с возможностью определения коэффициентов преобразования и фактической частоты установочного резонанса во всем рабочем диапазоне температур.

Список литературы

1. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) (Пьезоэлектрическое приборостроение). Т. 7) / – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с.

2. Янчич В.В., Джения Д.В., Янчич Вл.В. Пьезоэлектрические акселерометры с двумя динамическими и частотными диапазонами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 127–134.

3. Янчич В.В., Янчич Вл.В Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития) / – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland, 2013. – 142 с.

4. Янчич Вл.В., Джения Д.В., Иванов А.А. Компенсация температурного изменения коэффициента преобразования по заряду пьезоэлектрического виброизмерительного преобразователя // Сб. тр. II Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» 6–10 сентября 2015 г., Ростов-на-Дону – Т. 2 / – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 133–138.

5. Янчич Вл. В. Монолитный пьезоэлектрический преобразователь усилия с функцией калибровки // Сб. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» 10–15 сентября 2012 г., Ростов-на-Дону / – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 59–62.

Стенд воспроизведения углового ускорения

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

Стенд позволяет воспроизводить импульсы углового ускорения с заданными параметрами и предназначен для определения коэффициента преобразования углового ускорения и ротационной чувствительности датчиков различного типа. Метод измерения названных характеристик основан на передаче синусоидального или импульсного углового ускорения испытуемому датчику, расположенному соосно с осью вращения рабочего стола стенда. При этом поступательные колебания стола должны быть достаточно малыми, чтобы не оказывать существенного влияния на результаты калибровки [1]. Для создания вращения может использоваться сила гравитации, движение маятника или управляемый бесколлекторный электродвигатель [2, 3].

Целью разработки являлось создание сравнительно простого по исполнению стенда воспроизведения углового ускорения для испытания пьезоэлектрических датчиков, в том числе двухпараметровых акселерометров [4, 5], способных одновременно измерять линейное и угловое вибрационные ускорения контролируемого объекта в широком диапазоне частот и амплитуд.

Работа стенда основана на преобразовании кинетической энергии свободно падающего с задаваемой высоты h (рис. 1*а*) по направляющей струне 2 груза 12 в ускоренное вращательное движение ротора 7, на рабочем столе 8 которого соосно размещен испытуемый датчик 19. Импульс силы последовательно через прокладку 15, толкатель 16, струну 2, толкатель 4 и прокладку 5 передается ротору 7 и закрепленному на нем рабочему столу 8. Вращение ротора 7 относительно кронштейна 3, установленного на массивной неподвижной плите, осуществляется на безлюфтовых конических опорах 17, 18. Все помехи механического происхождения, возникающие при работе стенда, находятся за пределами временного интервала длительности импульса углового ускорения и не влияют на результаты измерений.

Параметры воспроизводимого импульса углового ускорения определяются массой и высотой свободного падения подвижного груза, механическими свойствами прокладок, а также моментом инерции испытуемого датчика. В этой связи в конструкции стенда предусмотрена дискретная регулировка высоты падения груза и использования сменных прокладок различной жесткости, благодаря чему имеется возможность настройки характеристик применительно к задачам измерения.

Для определения амплитуды и длительности воспроизводимого импульса углового ускорения служит контрольный пьезоэлектрический акселерометр 6 типа АК21-20 [6], установленный на роторе 7 (рис. 1*б, в*).

Угловое ускорение ε ротора определяют по формуле:

$$\varepsilon = \frac{a}{r},$$

где r – расстояние от оси вращения ротора до точки, соответствующей центру чувствительности контрольного акселерометра 6 (рис. 1*в*);

a – тангенциальное ускорение, измеренное контрольным акселерометром 6.

Коэффициент преобразования углового ускорения K_ε испытуемого датчика определяют по формуле:

$$K_\varepsilon = \frac{U}{\varepsilon},$$

где U – амплитуда напряжения на выходе испытуемого датчика;

ε – амплитуда углового ускорения, определенная по формуле (1).

Для запуска регистрирующей аппаратуры стенд снабжен синхроконтактом с напряжением 1,5 В. В комплект стенда входят сменные рабочие столы, предназначенные для размещения испытуемых датчиков с различными типами крепления, наборы прокладок и элементов крепления датчиков.

Внешний вид стенда и пример осциллограммы воспроизведенного импульса углового ускорения показаны на рис. 2.

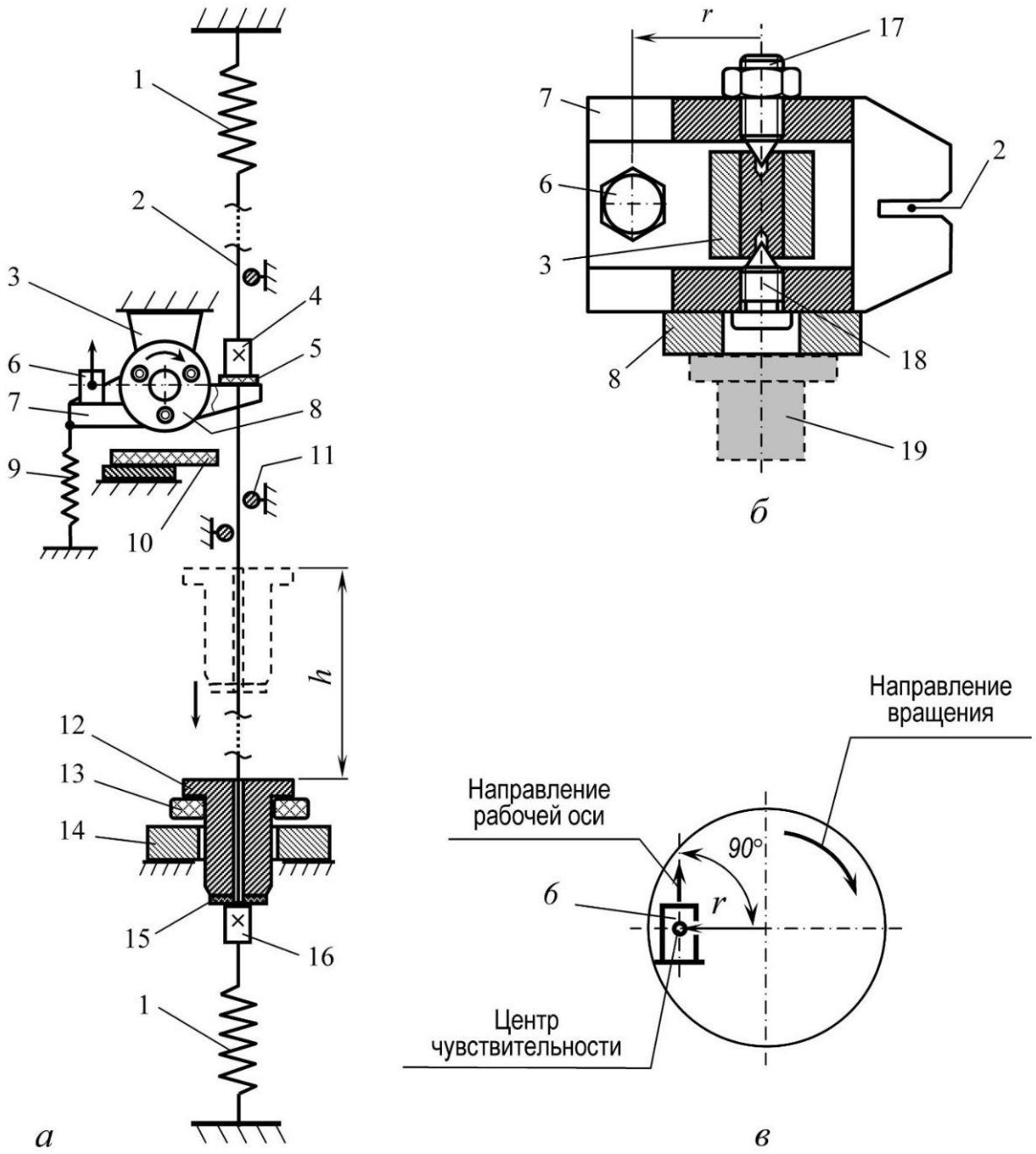
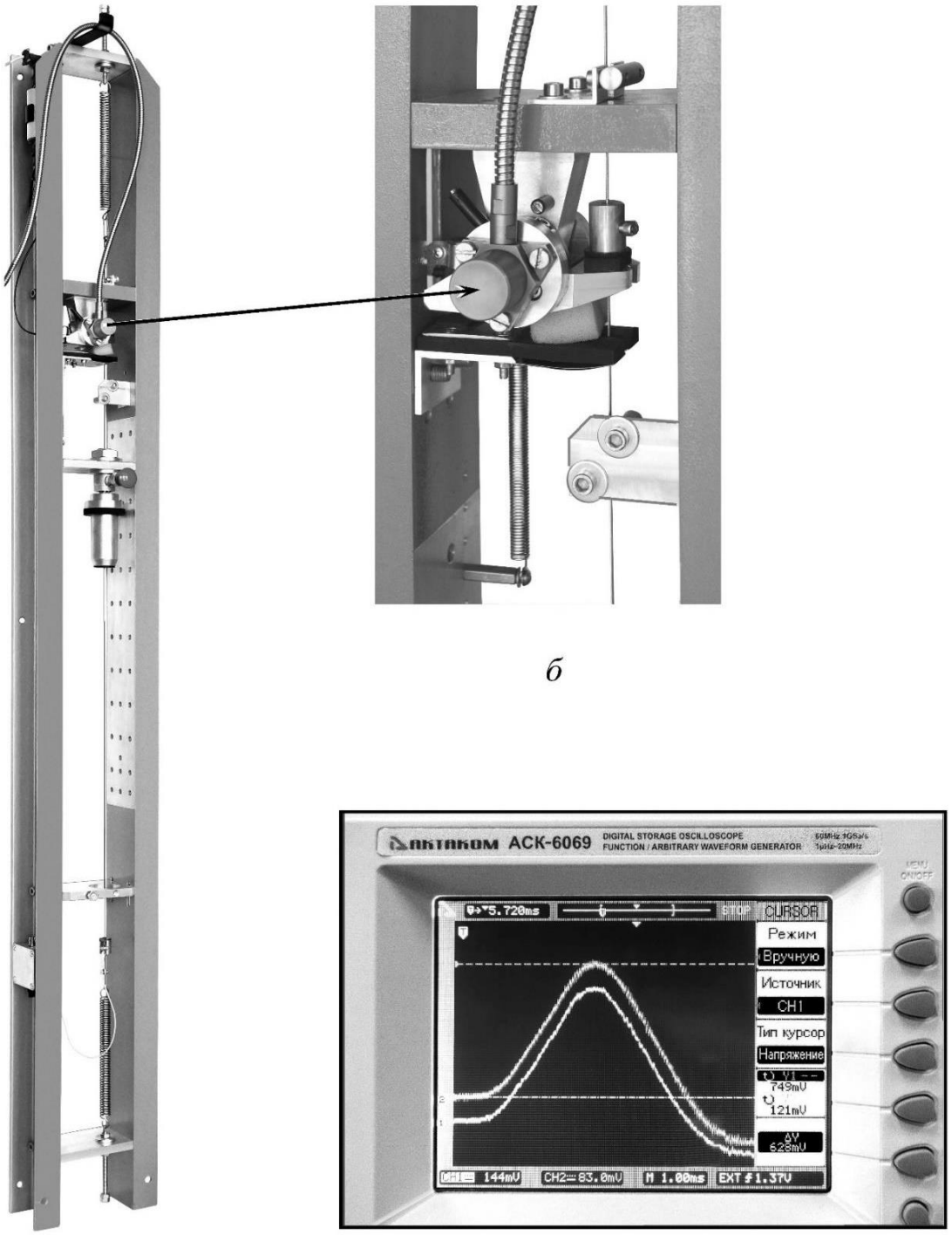


Рис. 1. Конструкция стенда воспроизведения углового ускорения: *а* – кинематическая схема стенда; *б* – ротор (вид сверху); *в* – схема расположения контрольного акселерометра на роторе; 1 – натяжная пружина; 2 – струна; 3 – кронштейн; 4, 16 – толкатели; 5, 15 –прокладки; 6 – контрольный акселерометр; 7 – ротор; 8 – стол; 9 – возвратная пружина; 10 – тормоз; 11 – ограничитель; 12 – груз; 13 – амортизатор; 14 – плита; 17, 18 – конические опоры; 19 – испытуемый датчик



б

а *в*

Рис. 2. Вид стенда (*а*) и ротора (*б*) с установленным испытуемым датчиком, осциллограммы выходных сигналов (*в*) испытуемого датчика (верхняя кривая) и контрольного акселерометра (нижняя кривая)

В НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ разработаны и изготовлены экспериментальные образцы стенда со следующими основными техническими характеристиками: амплитуда углового ускорения от 350 до 20000 $\text{рад}/\text{с}^2$ при длительности переднего фронта им-

пульса от 5 до 35 мкс, соответственно; относительная погрешность воспроизведения углового ускорения не более 4,5 %; габаритные размеры 195×1760×130 мм.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 16063-15-2012. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 15. Первичная калибровка датчиков угловой вибрации методами лазерной интерферометрии. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2014. 36 с.

2. Пат. 2568956 Российская Федерация, МПК G01P21/00. Способ калибровки датчика углового ускорения / В.В. Богданов, И.Н. Панченко, В.А. Някк и др.; заявл. 14.08.2014; опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32.

3. Schlaak H.J. Excitation of low-frequency rotation vibration // Journal of Low Frequency Noise and Active Control 12, –1993, № 4, – pp. 123–127.

4. Янчич Вл.В., Панич А.Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь // Сб. тр. Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» 23–27 сентября 2013 г., Анапа / – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 179–180.

5. Янчич В.В., Панич А.Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический датчик поступательного и углового ускорения // Известия ЮФУ. Технические науки. № 2, – 2016. – С. 191–199.

6. Янчич В.В., Иванов А.А., Ковалев С.Н. и др. Пьезоэлектрические акселерометры для высоких уровней вибрационного и ударного ускорений // Сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий» 22–26 сентября 2008 г., Анапа / – Ростов н/Д: Изд-во РГПУ, 2008. – С. 162–165.

Алгоритм оценки эффективности модели темпотрона

Н.А. Мишин, М.В. Терещенко, С.Г. Сафарянц

В работе рассматриваются различные подходы к решению задачи распознавания паттернов нейронной активности. Сравнивается эффективность бинового подхода и темпотрона. Показано, что темпотрон эффективнее бинового подхода.

Ключевые слова: импульсная активность, нейронная сеть, классификация

Введение

Нейронная активность представляет собой последовательности временных меток импульсов по каждому зарегистрированному нейрону. Для большинства алгоритмов машинного обучения, требующих векторизации входных данных, существующие декодеры нейронных сигналов преобразуют последовательности импульсов в количество возбуждений нейрона в рамках заданного окна (подходы на основе бинов) в качестве признаков. [Ming Li et al, 2019]

Однако подходы на основе бинов игнорируют временную составляющую в последовательностях импульсов, такую как момент возникновения импульса или временной интервал между соседними импульсами. Ключевой задачей является использование информации о времени импульсов для точного и эффективного декодирования нейронных сигналов.

Используя темпотрон, демонстрируется его способность решать задачу классификации, используя не информацию о количестве импульсов в заданном окне, а, скорее, временные интервалы между отдельными импульсами.

1. Методика получения данных и методы их обработки

Для исследования были сгенерированы обучающие данные, имитирующие активность нейронов. Для каждого класса были сгенерированы последовательности спайков для каждого афферентного нейрона таким образом, чтобы прецеденты разных классов отличались не количеством спайков в интервале времени, а моментами их появления. Для расширения базы прецедентов

был добавлен шум в процесс генерации моментов возникновения спайков. Так же был добавлен дополнительный шум в виде заданного количества спайков в случайные моменты времени. (Рис. 1).

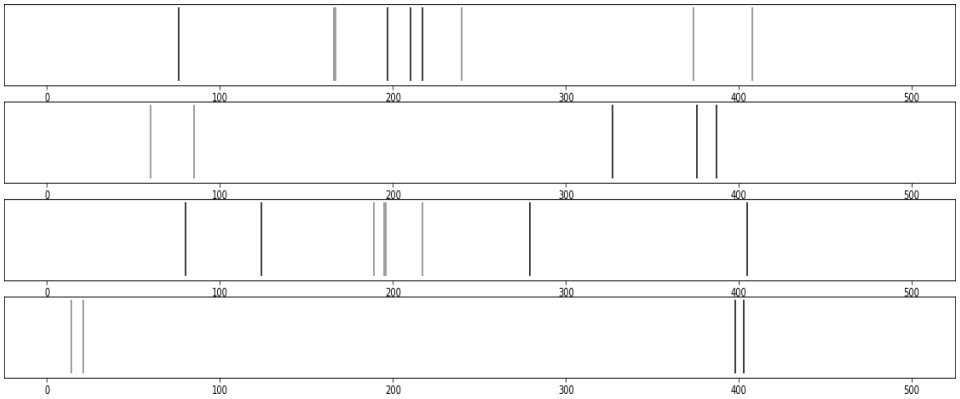


Рис. 1. Пример прецедента. Черным обозначены спайки для первого класса, серым – для второго класса

Всего было сгенерировано 15 прецедентов для каждого класса.

1.2. Биновый подход

В качестве признаков для классификатора на основе бинов мы используем количество спайков в небольших временных интервалах для каждого нейрона. Количество спайков подсчитывается для каждого бина и объединяется в вектор признаков. Сначала мы задаем размер бина, и для каждого подсчитываем количество спайков как признак , представляет порядковый номер нейрона, представляет тип запаха. Следовательно, вектор признаков для каждого нейрона n:

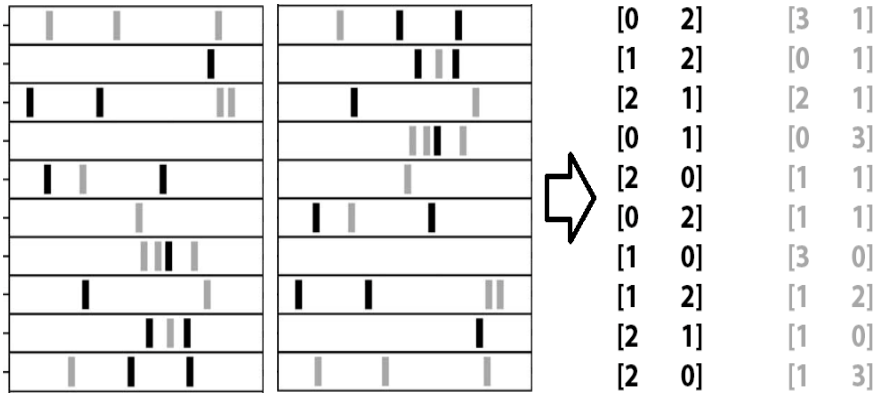


Рис. 2. Формирование вектора признаков

где M количество бинов во временном интервале. Таким образом, задав размер бина 0.5с и временной интервал 5с полу-

чим 10 бинов. Тогда вектора признаков для всех нейронов при каждой подаче стимула объединяются в новый вектор признаков:

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \ldots, x_n(k)].$$

После извлечения признаков возможно применить алгоритмы классификации.

1.3. Темпотрон

Данная модель основана на взвешенном суммировании постсинаптических потенциалов от всех поступающих спайков, которые экспоненциально затухают [Gütig et al, 2006]:

$$K(t - t_i) = V_0 \left(\exp\left[-\frac{t - t_i}{\tau} \right] - \exp\left[-\frac{t - t_i}{\tau_s} \right] \right),$$

Здесь t_i представляет время спайков от i афферента, а $K(t - t_i)$ – нормализованный постсинаптический потенциал от каждого входящего спайка. Параметрыτ и τ_s являются константами затухания возбуждения мембраны и синаптических токов соответственно (Рис. 3).

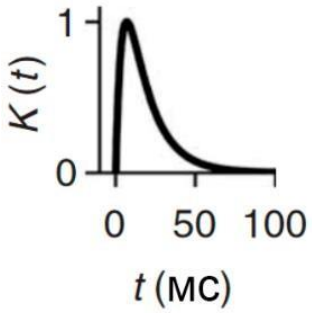


Рис. 3. Постсинаптическое ядро

В момент времени t, напряжение мембраны постсинаптического нейрона jявляется взвешенной суммой всех постсинаптических потенциалов, порожденных входящими спайками до момента t:

$$V_j(t) = \sum_i w_{ij} \sum_{t_i} K(t - t_i) + V_{rest} \qquad (1)$$

где w_{ij} является весом синаптической связи между предсинаптическим нейроном iи постсинаптическим нейроном j. При отсутствии входящего спайка, постсинаптический нейрон j сохраняет напряжение покоя V_{rest} (обычно задается равным нулю). Выходной спайк будет испущен, если $V_j(t)$ преодолеет определен-

ное пороговое значение (обычно задается равным 1). В данной работе временной интервал T был задан равным 500 мс, а коэффициенты T_i и T_s равными 15 и 3.75 соответственно.

В рассматриваемой задаче классификации каждый входной паттерн принадлежит к одному из двух классов (+ и -). Каждый паттерн состоит из N последовательностей входных спайков, по одной последовательности для каждого афферента в промежутке времени от 0 до T. Задача темпотрона состоит в том, чтобы на положительный паттерн преодолеть порог возбуждения, и оставаться в состоянии покоя при подаче отрицательного паттерна.

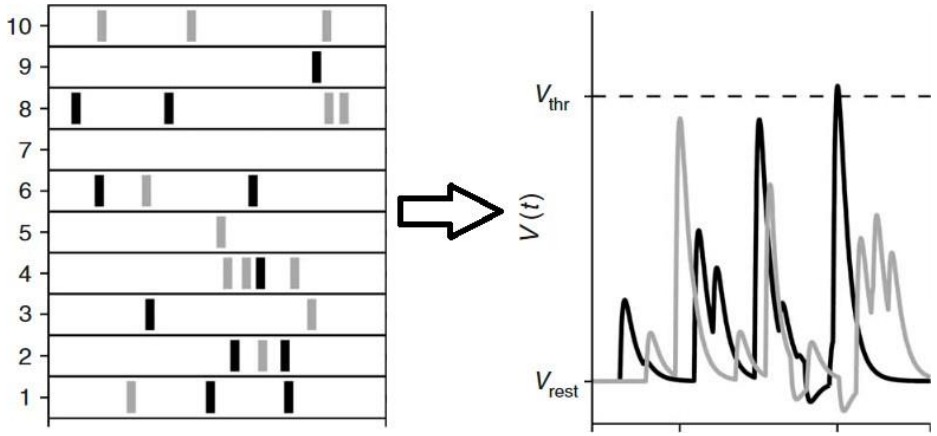


Рис. 4. Результирующее постсинаптическое напряжение

Правило обучения темпотрона изменяет вес синаптических связей всякий раз, когда совершается ошибка классификации. В ходе итераций синаптические веса должны подавляться на величину, которая отражает их вклад в ошибочный выходной спайк на паттерне, или усиливаться в соответствии с их вкладом в неспособность произвести выходной спайк на паттерне +. Для этого темпотрон использует следующее правило: если в ответ на + паттерн не был произведен выходной спайк, каждый синаптический вес увеличивается на следующую величину:

$$\Delta w_j = \lambda \sum_{t_i < t_{max}} K(t_{max} - t_i)$$

здесь t_{max} обозначает момент времени, когда постсинаптический потенциал достигает максимального значения. Константа λ определяет скорость обучения. Напротив, если выходной спайк возникает в ответ на – паттерн, синаптические веса уменьшаются на Δw_j.

Правило обучения темпотрона минимизирует функцию потерь, которая измеряет величину, на которую максимальное напряжение, генерируемое ошибочными паттернами, отклоняется от порога срабатывания. Для каждого шаблона +, который не вызвал выходной спайк, функция потерь равна $V_{thr} - V(t_{max})$. Для каждого паттерна, вызвавшего выходной спайк, функция потерь равна $V(t_{max}) - V_{thr}$.

Веса синаптических связей изменяются после каждого ошибочного прогноза. Для одного паттерна определена следующая функция потерь:

$$E_+ = (V_{thr} - V(t_{max}))\Theta(\pm(V_{thr} - V(t_{max}))$$

для + и – паттернов соответственно. Здесь t_{max} обозначает время максимального постсинаптического потенциала, Θ – пороговую функцию Хевисайда ($\Theta(x) = 1$ при $x \geq 0$, и $\Theta(x) = 0$ при $x < 0$), что обеспечивает нулевое значение функции потерь при верном прогнозе. При обучении на основе градиентного спуска изменение весов синаптических связей выражается как $\Delta w_i \propto -dE_+/dw_i$. Используя формулу (1), получим для паттернов, которые не привели к ошибочным прогнозам, тогда как для ошибочных прогнозов

$$-\frac{dE_\pm}{dw_i} = \pm\sum_{t_i<t_{max}} K(\Delta t_i)\frac{\partial V(t_{max})}{\partial t_{max}}\frac{dt_{max}}{dw_i}$$

Используя это правило, темпотрон способен учитывать пространственно-временные характеристики спайков для классификации.

2. Результаты

Обучающая выборка предполагает невозможность различения классов, без разделения на бины. Используя биновый подход и метод классификации ближайших соседей была подсчитана точность на тестовой выборке при разном размере бинов (Рис. 5).

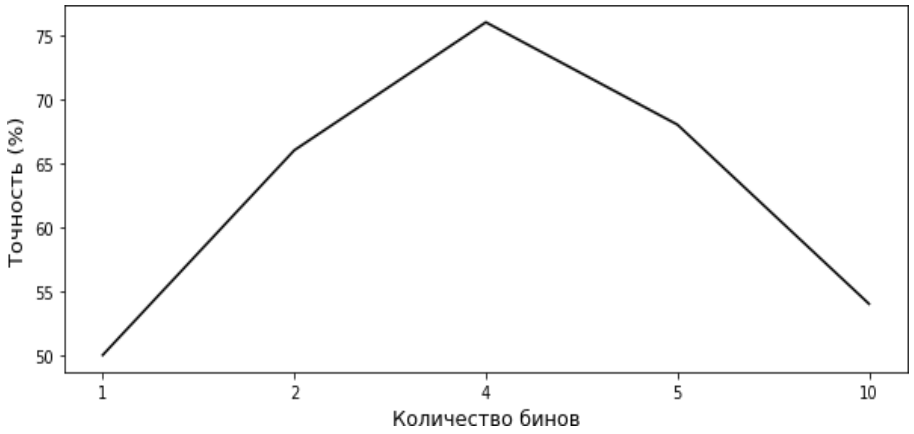


Рис. 5. Точности при биновом подходе

При добавлении шума в виде случайных спайков точность начинает деградировать (Рис. 6).

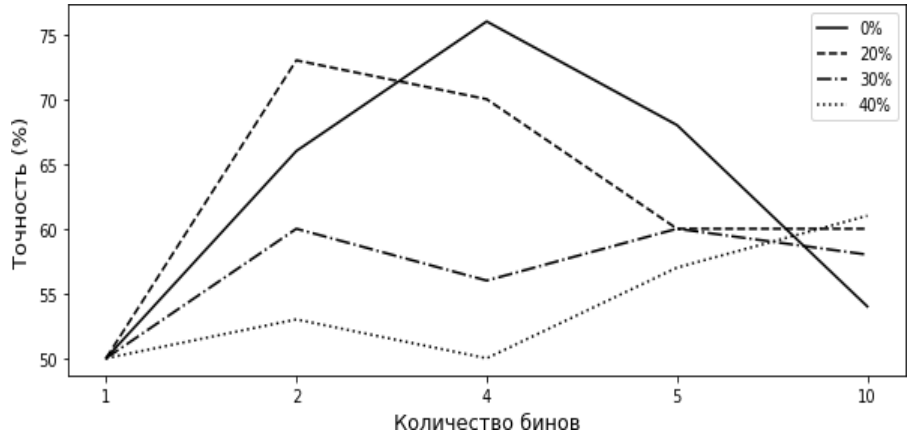


Рис. 6. Точности при разной степени зашумленности данных

Темпотрон демонстрирует лучшую точность относительно бинового подхода и не нуждается в разбиении входных данных на бины (Рис 7).

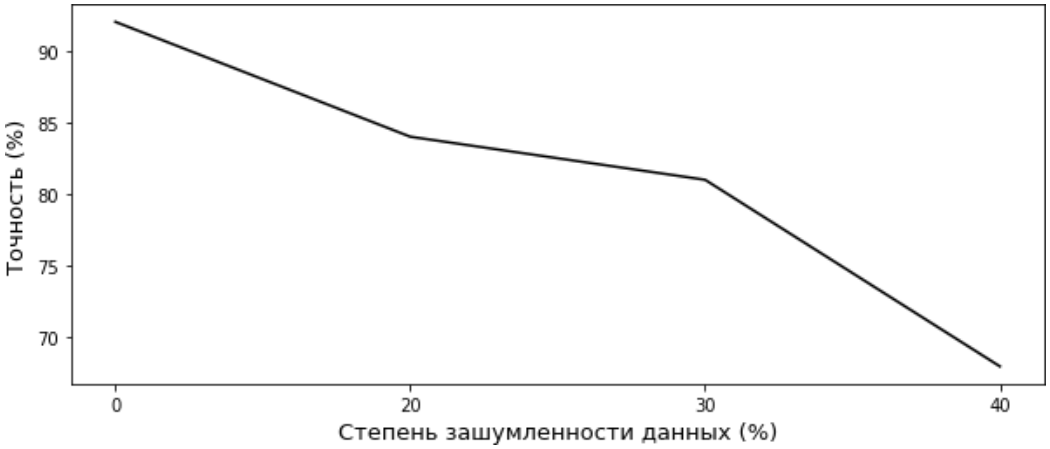


Рис. 7. Точности темпотрона при разной степени зашумленности данных

Тем не менее, лучшей устойчивостью к шуму обладает биновый подход с методом ближайших соседей (Рис 8.).

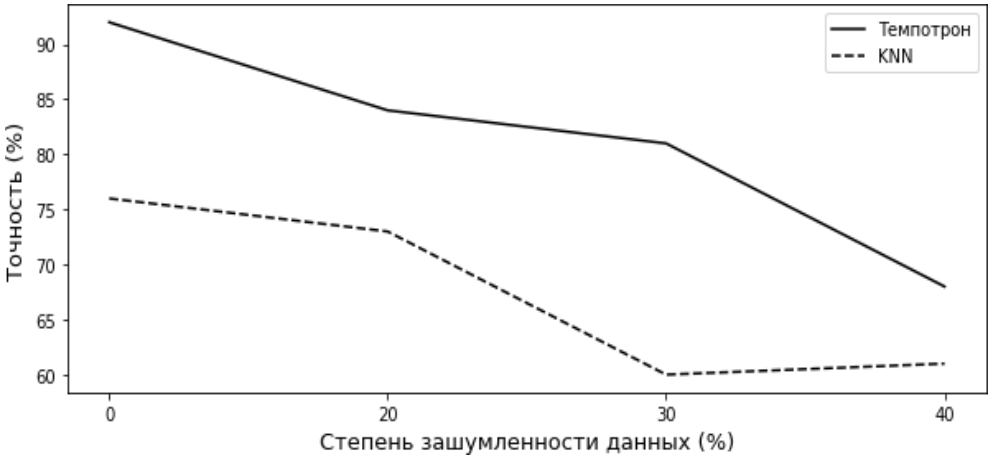


Рис. 8. Сравнение темпотрона и метода ближайших соседей

Недостатком темпотрона является относительно высокие временные затраты для обучения. На процессоре Intel(R) Core(TM) i9 7900X с 64 Гб ОЗУ одна эпоха проходит за 3с. Для больших обучающих выборок время обучения возрастает нелинейно (Рис. 9).

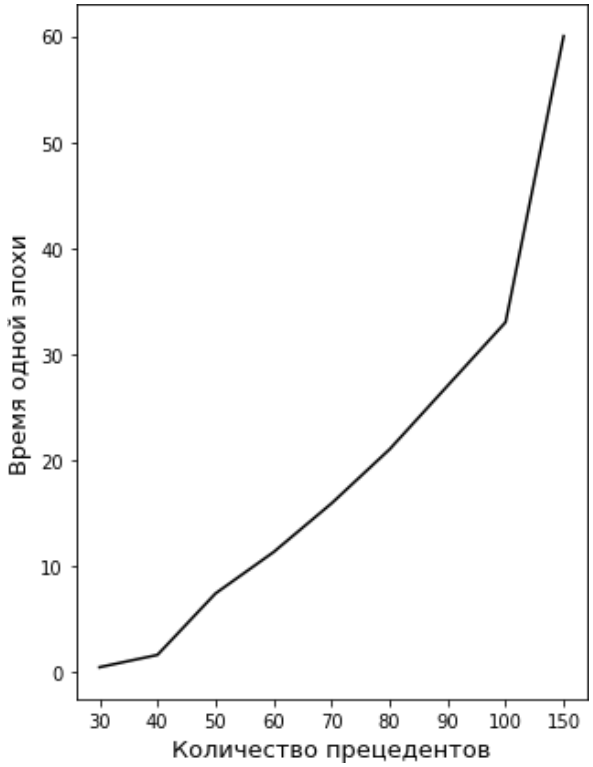


Рис. 9. Время одной эпохи в зависимости от размера выборки

Заключение

Результаты экспериментов подчеркивают способность темпотрона обучаться, используя временную характеристику спайков. Для проверки адекватности модели была использована метрика точности, составившая 0.75, в то время как модель на основе бинового подхода оказалась неспособна решить задачу классификации на имеющихся данных. Это подтверждает эффективность алгоритма темпотрона.

Список литературы

1. [Gütig et al, 2006] Gütig, Robert; Sompolinsky, Haim. The tempotron: a neuron that learns spike timing–based decisions – https://www.nature.com/articles/nn1643

2. [Ming Li et al, 2019] Ming Li, Haibo Ruan, Yu Qi, Tiantian Guo, Ping Wang, and Gang Pan. Odor Recognition with a Spiking Neural Network for Bioelectronic Nose – https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6427646/

Нелинейная акустика в исследованиях океана

С.П Тарасов, П.П Пивнев.
Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения

Аннотация: Рассмотрены гидроакустические параметрические системы и методы нелинейной акустики в исследованиях океана и арктического шельфа. Приведено краткое описание наиболее перспективных направлений развития гидроакустических систем с параметрическими излучающими антеннами. Приводятся характеристики параметрических приборов, и рассматриваются результаты их применений для решения различных задач гидроакустики. Обсуждаются новые возможности освещения подводной обстановки автономными подводными аппаратами, а также обеспечения их навигации на протяженных трассах, открывающиеся при применении параметрических антенн. Представлены результаты исследований, демонстрирующие одномодовое возбуждение волновода в широкой полосе частот параметрической антенной.

Ключевые слова: нелинейная гидроакустическая система, параметрическая антенна, акустический мониторинг акватории.

Системы мониторинга в подводной акустике в последнее время бурно развиваются. Исследование характеристик морской среды, может быть более эффективным при использовании аппаратуры, действующей на принципах нелинейного взаимодействия акустических волн [1-3]. Так называемая, параметрическая антенна, благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот, способна повысить эффективность акустического зондирования в мелком море, либо в морском волноводе, либо в арктическом волноводе, образованном дном и ледовой поверхностью.

Ранее считалось, что малая эффективность преобразования энергии волн накачки в энергию волн, генерируемых в нелинейной среде, ограничивает область применения гидроакустических систем с излучающими параметрическими антеннами. Однако

многочисленные исследования процессов нелинейной генерации волн нелинейной среде выявились наиболее перспективные применения гидроакустических систем с параметрическими излучающими антеннами, такие как:

- параметрические профилографы, предназначенные для исследования дна и верхнего слоя придонных осадков;

- параметрические системы траверзного обзора, для поиска биоресурсов на мелководье;

- параметрические гидроакустические системы мониторинга моря на протяженных трассах;

- параметрические гидроакустические системы передачи информации в водной среде.

Расширение областей применения гидроакустических систем с параметрическими антеннами удалось достичь, благодаря их уникальным характеристикам, с трудом, достигаемым в традиционных системах. К этим характеристикам относятся:

- широкий диапазон рабочих (разностных) частот, что позволяет применять сложные и широкополосные сигналы;

- высокая разрешающая способность по углу, за счет высокой направленности антенны в режиме излучения;

- высокая разрешающая способность по дальности, за счет излучения широкополосных сигналов;

- постоянство ширины характеристики направленности антенны во всем диапазоне рабочих частот, за счет особенностей формирования излучения сигналов на генерируемых частотах;

- высокая помехоустойчивость, за счет очень малого уровня бокового излучения параметрической антенны;

- малые габариты, а, следовательно, и вес антенны накачки.

Параметрическая антенна представляет собой антенну накачки (первичный преобразователь) и участок водной среды, где происходит взаимодействие волн накачки, за счет нелинейных свойств среды.

Для описания процессов нелинейного взаимодействия акустических волн используются различные математические модели, основанные на методах Вестервельта, Моффетта-

Меллена, волновых фронтов и, в том числе, - модели на основе решения уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова [1]. Математическое выражение, полученное на основе этой модели, является на наш взгляд наиболее перспективным и позволяет рассчитать амплитуду звукового давления на комбинационных частотах в любой точке пространства при разных параметрах антенны и сигнала. Решение уравнения для амплитуды акустического давления сигнала разностной частоты получено в виде [1-3]:

$$P_{-} = \frac{P_{01}P_{02}\varepsilon\Omega^2 a^2}{8c_0^4\rho_0 \exp(z/L_з)} i \int_0^{z_3} \frac{\exp\left[-y - \frac{r_w^2(1+iBy)}{d+(y-z_3)+yz_3B}\right]}{d+i(y-z_3)+yz_3B} dy,$$

где $P_{01}P_{02}$ - амплитуды давления волн накачки у поверхности антенны; ε- нелинейный параметр; $\Omega = 2\pi F_-$ - разностная частота; a - апертура излучателя накачки; $L_3 = 1/\alpha_-$; α_- - коэффициент затухания волны разностной частоты; $z_3 = z/l_3$; z – координата вдоль распространения волны; $l_3 = 1/\alpha_{1,2}$; $\alpha_{1,2}$ - коэффициенты затухания волн накачки; $d=L_D/l_3$, $B=L_D l_3/l_{D1} l_{D2}$, $r_w^2 = 2r^2 L_D/a^2 l_3$; $L_D = a^2\Omega/4c_0$; $l_{D1}, l_{D2} = a^2\omega_{1,2}/2c_0$; r - поперечная координата.

Это выражение позволяет рассчитать амплитуду звукового давления в любой точке пространства при разных параметрах антенны и сигнала.

К основным проблемам обнаружения подводных объектов на мелководье и вблизи поверхности относится наличие интенсивных реверберационных и шумовых помех. Выражение для расчета энергетических характеристик параметрического гидролокатора с учетом шумовой помехи, объемной и поверхностной реверберации получено в виде:

$$W_a = \frac{2\delta P_{по} 10^3 l_{D1} l_{D2} \cdot \frac{1}{F_-^2 \alpha L_D \gamma_{изл} \cdot \rho c \sqrt{\gamma_{пр}\tau}}}{\frac{I(B,y)}{10^{0,05\beta x}} e^{x/L_э} \left[\left(\frac{R_э}{2x}\right)^2 - \left(\delta \sqrt{\frac{\alpha_{op}\eta_{op}c\tau}{2\gamma_{изл}}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2}\sqrt{\frac{\alpha_{пр}h\eta_{пр}c\tau}{x\gamma_{изл}}}\right)^2\right]^{1/2}},$$

где δ - отношение сигнал-помеха; $P_{по}$ -уровень шумовой помехи; $I_{D1,D2} = a^2\omega_{1,2}/2c_0$; $F_- = \Omega/2\pi$; $\alpha = (\gamma+1) / 4\rho_0 c_0^3$; $L_D = a^2\Omega/4c_0$; $\gamma_{изл}$ - коэффициент концентрации в режиме излучения; $\gamma_{пр}$ - коэффициент концентрации в режиме приема; τ - длительность импульса; I(B,y) - интеграл, описывающий процесс нелинейной генерации; Rэ - радиус эквивалентной сферы; $\alpha_{ор},\alpha_{пр}$ - коэффициенты объемной и поверхностной реверберации; $\eta_{ор},\eta_{пр}$ - коэффициенты взаимной направленности; β - коэффициент затухания.

В соответствие с этим выражением можно рассчитать акустическую мощность по каждому каналу параметрической антенны, необходимую для того, чтобы в условиях шумовой и реверберационной помех обеспечить заданную дальность обнаружения.

Характеристики обнаружения в присутствии помех изменяются в зависимости от расстояния, на котором находится цель. На рис. 1 представлены зависимости отношения сигнал-помеха δ от расстояния обнаружения подводного объекта с $R_{экв}$ = 0,1 м при акустической мощности 70 Вт, излучаемой по каждой из частот накачки. Влияние отдельно объемной реверберации с $\alpha_{ор} = 10^{-6}$1/м, поверхностной реверберации с $\alpha_{пр}$ h = 10^{-3} и шума с уровнем $P_{по}$ = 0,01 Па представлено кривыми 1, 2 и 3 соответственно. Отношение сигнал/помеха падает при совместном воздействии шума и объемной реверберации (кривая 4), шума и поверхностной реверберации (кривая 5). При воздействии всех видов помех (кривая 6) отношение сигнал/помеха принимает наименьшее значение на всех расстояниях и характеризует возможность обнаружения цели с заданной вероятностью.

Зависимости рассчитаны с учетом влияния доплеровского смещения частоты за счет движения, что приводит к необходимости значительного расширения полосы пропускания приемного тракта и, соответственно, снижает помехоустойчивость и дальность действия. Сужение полосы и увеличение длительности зондирующих сигналов существенно увеличит дальность обнаружения.

Широкое применение находят параметрические профилографы, принцип действия которых основан на нелинейном взаимодействии акустических волн.

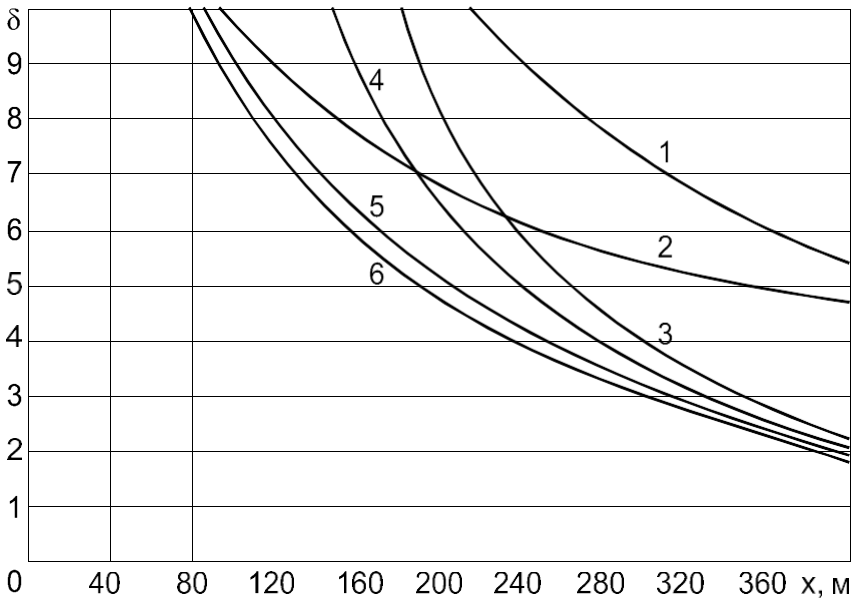


Рис. 1 – Зависимость отношения сигнал-помеха от дистанции

Малогабаритные профилографы широко применяются для решения актуальных задач:

- в геологии, геоакустике и сейсмоакустике на шельфе моря, связанных с исследованием и анализом донных структур;

- поиска полезных ископаемых, определения структуры дна для строительства инженерных гидросооружений;

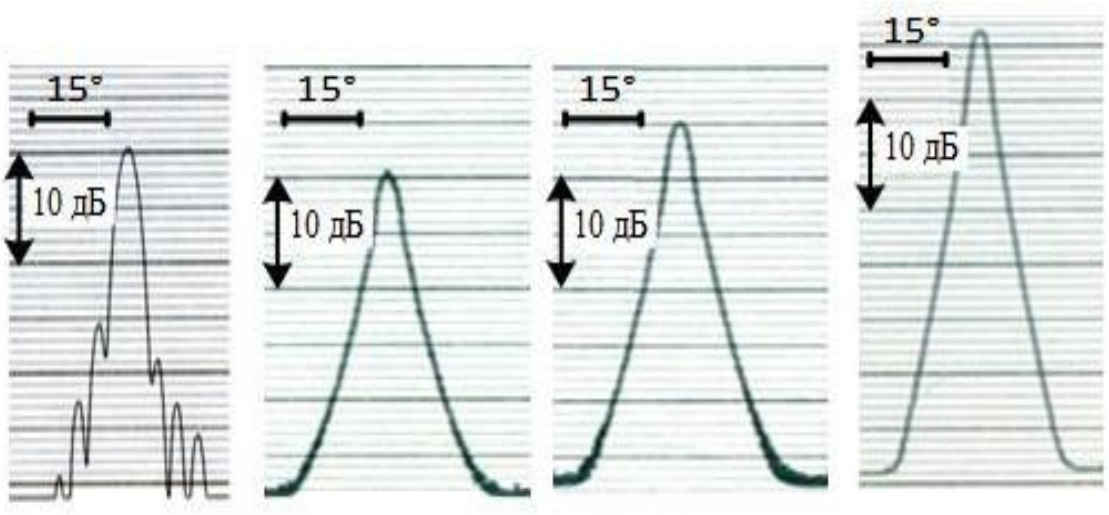
- диагностики и мониторинга подводных инженерных сооружений;

- оценки сапропелевых накоплений во внутренних водоемах для определения перспективности добычи при производстве органических удобрений, оценки иловых загрязнений для экологического контроля;

- гидроакустического поиска, картографирования и музеефикации подводного культурного наследия.

Разностные (рабочие) частоты таких локаторов лежат в диапазоне от 5 до 30 кГц, глубина проникновения в грунт до 30-50 метров (зависит от типа грунта), ширина характеристики направленности единицы (2-5) градусов.

На рис. 2 приведены экспериментально измеренные в гидроакустическом бассейне характеристика направленности антенны на частоте накачки (140 кГц) (рис. 3а) и на разностных частотах (рис. 3б - 3г).



а) б) в) г)

Рис. 2 – Характеристики направленности антенны:
а) - на частотах накачки; б) – на разностной частоте 10 кГц;
в) – на разностной частоте 15 кГц; г) – на разностной частоте 20 кГц;

На рис. 3, для примера, приведена профилограмма осадочных пород полученная параметрическим профилографом.

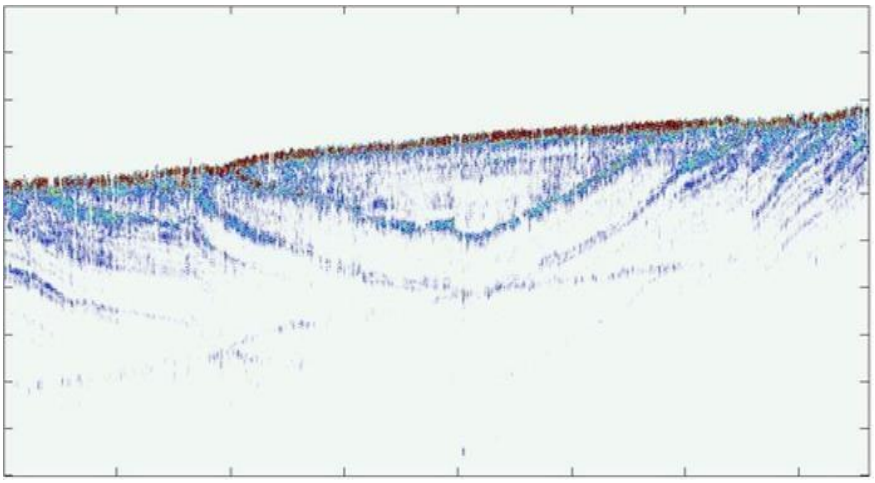


Рис. 3 – Профиль донных осадочных структур

В настоящее время для обнаружения и мониторинга биоресурсов на мелководье используются только эхолоты (вертикальная локация), при этом зона обзора водного пространства очень ограничена. При малых глубинах существенно сказывается на

поведении рыб «отпугивающий эффект» при движении судна. Применение приборов горизонтальной локации («обычных» гидролокаторов) со значительно большей зоной обзора крайне неэффективно из-за помеховой обстановки, обусловленной реверберацией и многократными отражениями акустических сигналов от дна и поверхности [6, 15].

Применение параметрического гидролокатора траверзного обзора позволит рыбакам и гидробиологам значительно повысить производительность поиска объектов лова и проведения мониторинга биоресурсов и гидробионтов за счет существенного увеличения размеров обследуемой зоны (в десятки раз больше по сравнению с эхолотами) [13].

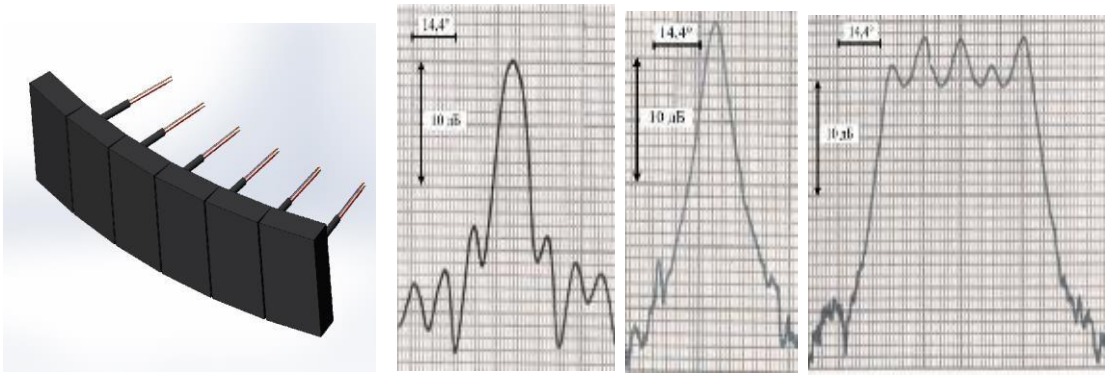
Разностные (рабочие) частотамы лежат в диапазоне от 5 до 40 кГц, с дальностью обзора пространства до 1000 – 1500 метров, в том числе в условиях мелководья. Область применения таких систем весьма широка - это и экологический мониторинг акватории, и поиск объектов (поиск рыбных скоплений) в толще воды, в том числе на мелководье. При этом ширина характеристики направленности таких систем составляет: по вертикали несколько (2-8 град), по горизонтали от 2 до 60 градусов.

На рис.4 представлен внешний вид и ДН антенны накачки. Антенна накачки параметрического гидролокатора состоит из 6 модулей в каждом из которых располагается две частотные подрешетки.

При мониторинге мелководных водоемов с применением широкополосных сигналов на больших расстояниях (при траверзном обзоре) необходимо учитывать наличие в среде геометрической и физической дисперсии. Наличие физической и геометрической дисперсии необходимо учитывать при выборе диапазона рабочих частот [10].

Таким образом, определение количества биоресурсов актуальная и сложная научно-техническая задача с точки зрения экологического мониторинга водоема. Параметрические гидролокаторы траверзного обзора являются перспективным инструмен-

том, способным существенно повысить производительность поиска и мониторинга биоресурсов на мелководье.



а) б) в) г)

Рис. 4 – Антенна накачки гидролокатора траверзного обзора
а) внешний вид антенны; б) ДН 1 модуля на частоте накачки 250 кГц;
в) ДН 1 модуля на разностной частоте 30 кГц;
г) ДН антенны из 6 модулей на разностной частоте 30 кГц

Практика применения параметрических антенн показывает, что с их помощью можно передавать широкополосный сигнал, наилучшим образом согласованный со слоистой структурой океанического волновода. Предварительные расчеты, которые были сделаны для особенностей применения параметрических антенн, показывают возможность управлять числом возбуждаемых мод сигнала.

Перспективы применения широкополосных сигналов для исследования океана заключаются в том, что открывается возможность для развития нового подхода акустической томографии морских акваторий с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [6].

Области применения мощной высоконаправленной широкополосной излучающей параметрической системы стационарного типа могут быть различными. Параметрические антенны (антенны на основе нелинейных эффектов), являются перспективным инструментом, способным предоставлять новые возможности для акустического зондирования в океане, особенно в морском волноводе. А высокая направленность гидроакустической антенны

на основе нелинейных эффектов позволяет применить этот инструмент для исследования характеристик морского волновода [1-2].

Методы параметрического излучения представляют возможность селективного возбуждения мод в широкой полосе частот (2–3 октавы). При этом излучаемый широкополосный сигнал может быть идеально согласован со слоистой структурой морской среды [7].

Эти качества параметрической антенны представляется наиболее важным для гидрофизических исследований в Арктике [8].

Таким образом, излучающая параметрическая антенна, согласованная с морским волноводом, в силу своих особенностей открывает возможность методам нелинейной акустики включить в гидроакустическую практику частотную область волновода, другими словами – использовать методы частотной томографии вместо пространственной томографии. Это новое качество параметрических гидроакустических систем создает дополнительные возможности для мониторинга морских акваторий на протяженных трассах. Селективное возбуждение мод в широкой полосе частот в волноводах представляется наиболее эффективным инструментом для исследований сжатия акустических сигналов в морских волноводах, создания высокоэффективных систем зондирования моря с целью обнаружения и исследования неоднородностей.

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода [6]. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно протяженные расстояния, либо к концентрации энергии акустического сигнала в коротком интервале времени, если частотная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В таком случае можно говорить о том, что происходит фокусировка или сжатие акустического сигнала во времени. Зная закон дисперсии в волноводе (а они будут изменяться в

зависимости от изменения глубины водоема, плотности дна, наличия и толщины ледового покрова и т.п.), можно сформировать сигнал определенной формы, такой чтобы в некоторой точке волновода сигнал ВРЧ максимально сжался.

Явления волноводной дисперсии и сжатия широкополосного сигнала в морском волноводе были экспериментально исследованы на примере распространения акустических волн в условиях мелкого моря.

Экспериментальные исследования выполнялись летом в Таганрогском заливе Азовского моря на двух маломерных судах. На одном была установлена излучающая антенна, с другого судна обеспечивалась работа приемной антенны. Излучающая антенна крепилась на поворотном устройстве к борту судна и могла обеспечивать сканирование акватории узким лучом параметрического излучения в диапазоне углов -90° - +90° в горизонтальной плоскости. Глубина места в районе экспериментов составляла 2,5 – 3 м. Средняя частота излучения (частота накачки) составляла 150 кГц. Разностная частота или частота излучения сигнала лежала в диапазоне 5 кГц – 20 кГц. Электрическая мощность усилителя антенны - 1 кВт для каждой из частот накачки. Приемная антенна выполнена в виде вертикальной цепочки восьми гидрофонов, которые располагались с шагом 0,25 м на металлической штанге.

На рис. 5 приведено экспериментально измеренное нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода (обозначено точками) и результаты расчета собственной функции первой моды (сплошная кривая) на расстоянии 1000 м от излучателя. Видно, что основная энергия излучения концентрируется в средней части волновода. Таким образом, в условиях эксперимента параметрическая антенна возбуждала первую моду волновода. Экспериментальные данные соответствуют амплитуде импульсов на вертикальной цепочке гидрофонов на частоте 15кГц (полоса 500Гц). Собственная функция первой моды рассчитана для измеренного профиля скорости звука и дна в виде жидкого полупространства со следующими параметрами: плот-

ность грунта на дне 1800 кг/м^3, а скорость распространения звука в грунте считалась равной 1520 м/с. Скорость звука в воде принималась равной 1499 м/с.

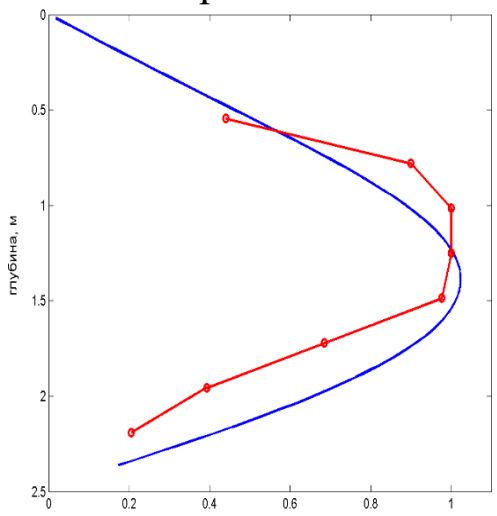


Рис. 5 – Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода и расчет первой моды

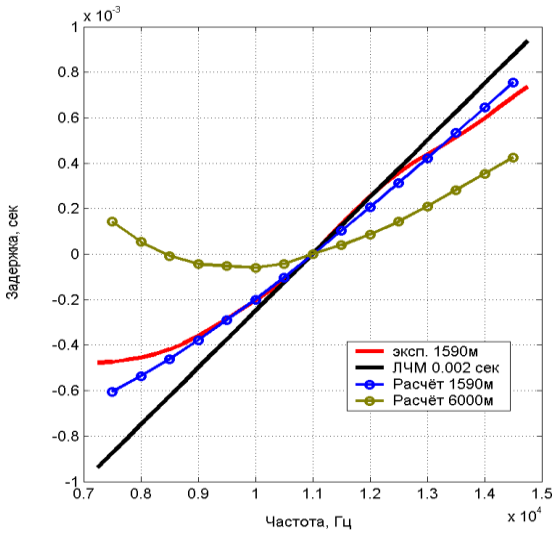


Рис. 6 – Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала Результаты эксперимента и расчета.

Расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в мелководном волноводе. На рис. 6 показаны зависимости такой задержки для различных дистанций, пройденных сигналом. Как видно, наклон дисперсионной кривой для ЛЧМ сигнала, хорошо соответствует частотно-временной обработке сигнала, измеренного на дистанции 1590 м. С увеличением дистанции меняются частотно-временные соотношения в сигнале. Растет задержка низкочастотных составляющих сигнала, что соответствует сокращению его длительности. Анализ показывает, что время прихода низкочастотных и высокочастотных составляющих может совпасть на дистанции приблизительно в 6 км для условий настоящего эксперимента. Поскольку дисперсия скорости распространения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

Такой инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, предоставляет возможность проводить исследования на

протяженных трассах в широкой полосе частот при одномодовом волноводном распространении.

Моделирование условий применения параметрической антенны, оптимальной для излучения акустического сигнала в диапазоне частот 100 – 400 Гц в условиях Баренцева моря, указывает на принципиально новые возможности гидроакустических методов освещения подводной обстановки на обширных мелководных акваториях.

На рис. 7 показаны профиль волновода и типичное распределение скорости звука по трассе Новая Земля – Шпицберген протяженностью1048 км.

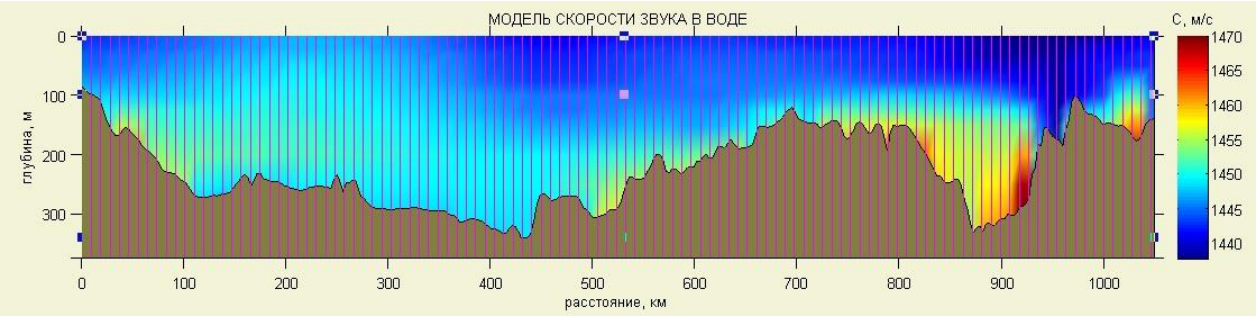


Рис. 7 – Типичная гидрология волновода Баренцева моря на трассе Новая Земля – Шпицберген

Условию распространения сигнала в таком волноводе соответствует интегральная дисперсия, вид которой показан на рис. 9. На этом рисунке представлены задержки времени распространения первой моды от частоты сигнала в диапазоне частот 100 – 400 Гц.

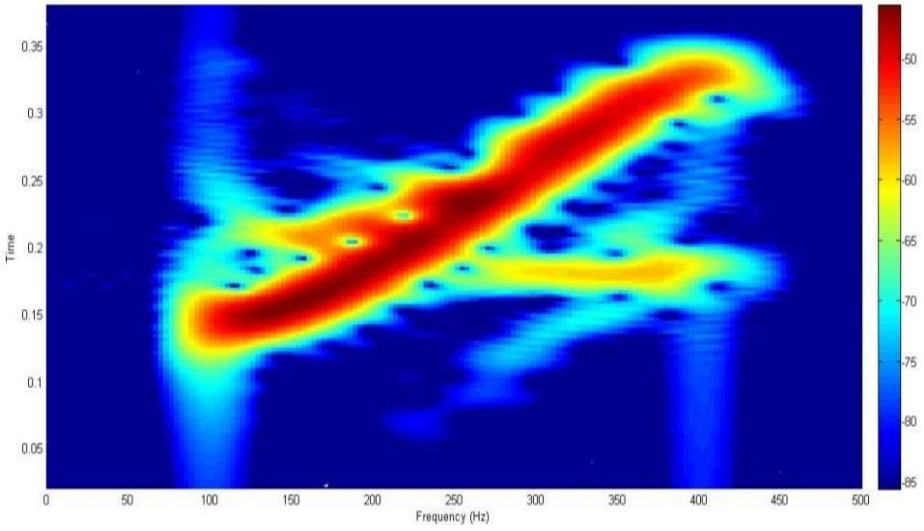
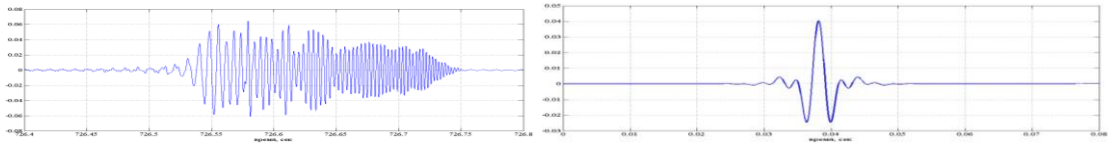


Рис. 8 – Зависимость времени распространения сигнала от частоты в волноводе на трассе Новая Земля – Шпицберген

Как показывает моделирование, время распространения по этой трассе сигнала частоты 100 Гц приблизительно на 0,2 с меньше времени распространения сигнала частоты 400 Гц (рис. 10а). Поэтому, применяя специальную частотную модуляцию излучаемого акустического сигнала длительностью 0,2 с, когда сигнал начинается с излучения волн высокой частоты (400 Гц), постепенно снижаясь до 100 Гц через 0,2 с можно получить полную синхронность прихода волн разных частот после распространения по этой трассе. В результате такого синхронного прихода длинный сигнал сворачивается в короткий импульс длительностью, определяемой частотной полосой сигнала (рис. 10б). В данном примере длительность такого импульса составляет около 350 мс, что в 60 раз меньше длительности излучаемого сигнала. При модуляции, согласованной с частотной дисперсией волновода, происходит сжатие сигнала с ростом соотношения сигнал/шум.

Эта новая возможность концентрировать энергию излучения на больших дистанциях позволяет создавать удаленные виртуальные рубежи, на которых с высоким соотношением сигнал/шум осуществляется гидроакустическое зондирование. Такая возможность реализуется с помощью параметрической антенны, которая, благодаря острой характеристике направленности, позволят селективно возбуждать волновод в широкой полосе.



а) б)

Рис. 10 – Прохождение сигнала разных частот по трассе Новая Земля – Шпицберген. Акустический импульс с обращенной во времени частотной модуляцией (а); акустический импульс, соответствующий сжатию сигнала (б)

Области применения высоконаправленной мощной низкочастотной параметрической антенны стационарного типа могут быть достаточно разнообразны. Параметрическая антенна, благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот, является новым перспективным инструментом, способным существенно повысить эффективность акустического зондирова-

ния в океане, особенно в морском волноводе. Высокая направленность параметрического излучения позволяет применить эту антенну для исследования характеристик самого морского волновода.

В частности, для определения профиля скорости звука в подводном звуковом канале наиболее информативной является дисперсия нижних мод. Обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала, идеально согласованного со слоистой структурой морской среды в волноводе, удается путем использования методов нелинейной гидроакустики.

Появляется возможность исследовать волноводную дисперсию скорости распространения в низкочастотном диапазоне на трассах сотни километров.

Другой областью возможных применений высоконаправленной широкополосной параметрической антенны является то, что она может быть использована для дальней звукоподводной связи и передачи данных.

Таким образом, параметрическая антенна, в силу особенностей селективного возбуждения мод в волноводах, представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в океанических волноводах, проведения мониторинга океана на протяженных трассах.

Параметрические гидроакустические системы являются перспективным инструментом исследования Мирового океана. Некогда новое направление нелинейной акустики в настоящее время широко развивается, появляются новые системы и комплексы поиска, мониторинга и диагностики водной среды и донного грунта, в том числе на мелководье. Малогабаритность параметрических систем позволяет их применять на различных судах (в том числе маломерных). А постоянство ширины диаграммы направленности в широком диапазоне частот и отсутствие боковых лепестков делает гидроакустические системы с параметрическим режимом работы практически незаменимым инструментом для исследования мелководных районов арктического шельфа и Мирового океана в целом.

Список литературы

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. - 416 с.

2. Pivnev, P.P., Voronin, V.A., Tarasov, S.P., Soldatov, G.V. The application features of sonar systems for control of underwater engineering structures and monitoring area (2018) Exploration and Monitoring of the Underwater Environment of the Shelf Zone, pp. 267-291. DOI: 10.1002/9781119488309.ch9.

3. Воронин В.А., Тиссенбаум Ю.Л., Усов В.П. Исследование антенны накачки параметрического профилографа // Нелинейные акустические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2008. - С. 38-49.

4. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 264 с.

5. Новиков Б.К. Руденко О.В. Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. - Ленинград: Судостроение, 1981. - 264 с.

6. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics. (Stockholm, Sweden, 7—10 July 2008). P. 393.

7. Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В. А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акустический журнал. - 2009. - №№1 (55). - С. 56-61.

8. Бреховских Л. М., Лысанов Ю.Л. Теоретические основы акустики океана. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1982. - 264 с.

9. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2007. – 448 с.

10. Есипов И.Б., Иоханнессен О.Н., Наугольных К.А., Уанг Ю.Ю., Шанг И.С. О применении параметрического излучателя для мониторинга пролива Фрама // Акустический журнал. - 1999. - №4 (45). - С. 504-511.

11. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). C. 325.

12. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. - Ленинград: Судостроение, 1973 , - 275 с.

Терапевтический HIFU преобразователь

А.А. Панич, А.В Скрылёв, К.А Гореленко,
А.Ю Малыхин, Р.А Байдаров, В.В Немыкин
Научное конструкторско-технологическое бюро
«Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

Настоящее исследование выполнено на стыке двух направлений: инженерно-технологического и биомедицинского, в результате которого разработан терапевтический фокусирующий ультразвуковой преобразователь, предназначенный для выявления и неинвазивного лечения новообразований. Принцип действия заключается в излучении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в пятно фокуса (High Intensity Focused Ultrasound – HIFU). Это позволяет точечно воздействовать на выбранные области и проводить абляцию воспалённых, либо чужеродных тканей без открытого хирургического вмешательства.

На основе характеристик пьезокерамических материалов, выпускаемых в НКТБ «Пьезоприбор» выполнено математическое моделирование HIFU-преобразователя. Основу составляет пьезокерамический элемент, выполненный в форме тонкостенного сегмента сферы с центральным отверстием, изготовленный из пьезоматериала ПКП-35. Центральное отверстие диаметром 41,4 мм предназначено для датчика визуализации, выполняющего роль «наводчика» сфокусированного ультразвукового пучка. Принцип работы преобразователя заключается в следующем: фокусное пятно с максимальным акустическим давлением находится в области, захватываемой УЗИ-совместимым датчиком. Изображение передаётся на монитор, после чего принимается решение на какие области и с какой интенсивностью воздействовать ультразвуковым преобразователем. Изучены амплитудно-частотные характеристики преобразователя. Получены зависимости активной проводимости от частоты в свободном и нагруженном на воду состояниях. Измерены уровни акустического давления в пятне фокуса. Построены диаграммы распределения интенсивности из-

лучения в плоскости и в трехмерном пространстве, проведены работы по воздействию ультразвукового преобразователя на различные органические материалы и ткани: органическое стекло толщиной 10мм, мышечная ткань курицы. Получены зависимости силы воздействия от подводимой к преобразователю мощности, а также частоты задающего сигнала. Экспериментально показана возможность использования преобразователя в составе комплекса HIFU-терапии. Сформулированы выводы о перспективах использования одноэлементных фокусирующих ультразвуковых преобразователей и многоэлементных с распределённым пятном фокуса.

Ключевые слова: фокусированный ультразвук, пьезоэлектрический преобразователь, HIFU, система ЦТС, терапевтический ультразвук, медицинское приборостроение, неинвазивная терапия

Введение

Мировой опыт применения и совершенствования технологии фокусированного ультразвука высокой интенсивности (HIFU) в медицине насчитывает более 60 лет [1]. К настоящему времени сформировалось около 20 крупных научных центров, занимающихся этой тематикой. Объём публикаций HIFU-направления составляет более 700 в год (по состоянию на 2013 г. [2]). В 2001 году сформировано Международное сообщество терпевтического ультразвука (ISTU - International Society for Therapeutic Ultrasound), а в 2006 г. – фонд хирургии с применением фокусированного ультразвука (Focused Ultrasound Surgery Foundation) [2]. Различные медицинские приборы, построенные на основе технологии фокусирования ультразвука активно применяются для разрушения опухолей различной этиологии, остановки кровотечений (в том числе и внутренних), лечения кардиологических, офтальмологических, неврологических заболеваний, удаления почечных камней, стимуляции нервных структур [3-8].

Существует несколько основных типов фокусирующих ультразвуковых преобразователей: плоские в форме диска или шайбы, выпукло-вогнутые в форме сегмента сферы, тороидальные [9-

11]. Главный принцип медицинского фокусированного ультразвука заключается в преобразовании акустической энергии в тепловую: в точке фокуса происходит локальный нагрев тканей с последующим терапевтическим эффектом. В случае воздействия на злокачественные опухоли, происходит их абляция – разрушение с последующим выведением из организма.

В настоящее время наблюдается значительная потребность в приборах HIFU-терапии. Имеющийся научно-технический и инженерный потенциал НКТБ «Пьезоприбор», а также сложившийся рыночный дефицит в медицинских ультразвуковых преобразователях способствовали выполнению данного исследования. Основная цель – создание прототипа фокусирующего HIFU преобразователя с центральным отверстием, работающего на частоте 2 МГц. Для этого необходимо провести математическое моделирование, изготовить макетный образец и измерить полученные характеристики. В ходе реализации данного исследования было использовано оборудование ЦКП «Высокие технологии».

Математическая модель фокусирующего пьезокерамического преобразователя

На практике применяют различные виды пьезокерамических излучателей (ПИ): сферические и параболические преобразователи [9], плоские преобразователи с рефлектором или фокусирующей головкой [10], тороидальные и другие [11-13]. Актуальной задачей при построении фокусирующего ПИ является наличие центрального отверстия для закрепления датчика ультразвуковой визуализации (УЗИ).

Для решения поставленной задачи применялся метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Основным критерием при выполнении математического моделирования являлось появление устойчивого пятна фокуса акустического давления в центре геометрической оси. В качестве основы моделируемого ПИ выбран сегнетожёсткий пьезокерамический материал ПКП-35 [14]. В результате построения осесиметричной модели ПИ в форме сегмента полой сферы толщиной 1 мм и радиусом излучающей поверхности 75 мм, нагруженной на воду, был полу-

чен график распределения давления вдоль фокусной оси в диапазоне частот 1,8-2,5 МГц (Рис. 1, а), а также визуализация распределения давлений при возбуждении на частоте 2 МГц (Рис. 1, б).

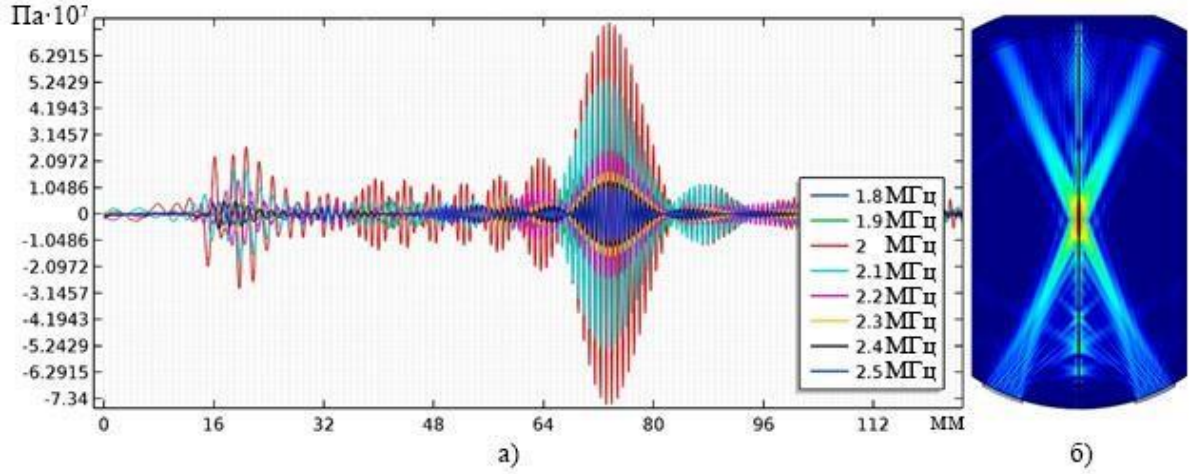


Рис. 1: а) График распределения давления вдоль фокусной оси исследуемого ПИ в диапазоне частот 1,8-2,5 МГц; б) визуализация распределения давлений

В источнике [15] описывается методика измерения пятна фокуса с использованием жидкой среды. Данная методика позволяет получить численные значения давления в пятне фокуса ПИ, нагруженного на воду. В нашем случае, на уровне -6 Дб размер эллиптического пятна составил Ø1 · 13 мм.

Построение прототипа пьезокерамического HIFU-излучателя

Опираясь на полученные результаты, созданы образцы пьезокерамических элементов заданной формы по классической керамической технологии [16]. Заготовки получены методом полусухого прессования, обожжены в муфельной печи и обработаны с точностью ±0,15 мм. На излучающие поверхности наносились серебряные электроды, после чего образцы подвергались поляризации в постоянном электрическом поле. Внешний вид изготовленных пьезоэлементов представлен на рис. 2.

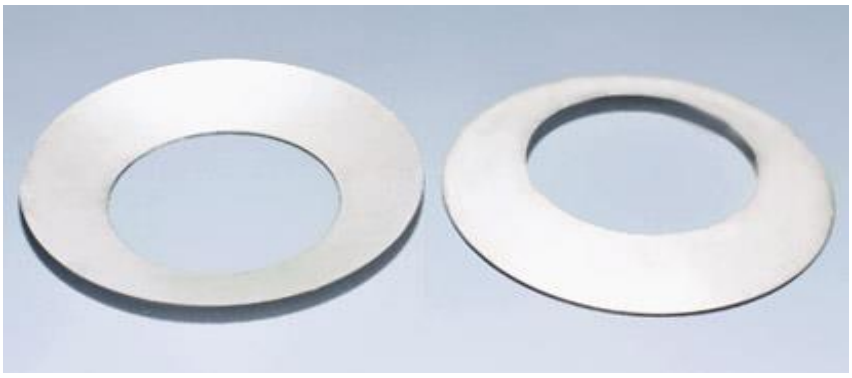


Рис. 2 – Внешний вид пьезокерамических элементов

Для оценки качества изготовленных элементов, на анализаторе иммитанса Е7-28 измерены их электрофизические параметры (ЭФП):

- Статическая ёмкость $C_t = 45$ нФ
- Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях $tg\delta < 0.0025$
- Эффективный коэффициент электромеханической связи $K_{eff} = 0.43$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) активной составляющей проводимости показана на Рис. 3.

Для обеспечения согласования ПИ и воды подобраны оптимальные характеристики согласующего слоя.

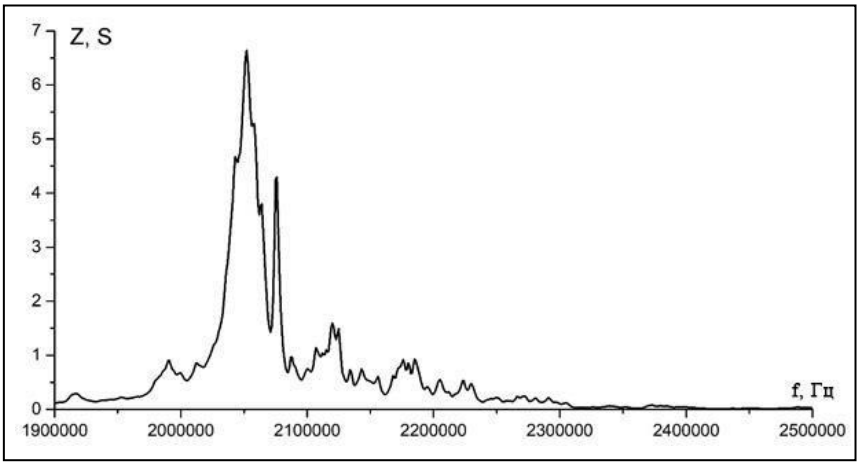


Рис. 3 – Зависимость амплитуды активной составляющей проводимости исследуемых элементов от частоты

АЧХ свободного и нагруженного на воду ПИ с согласующим слоем представлена на Рис. 4.

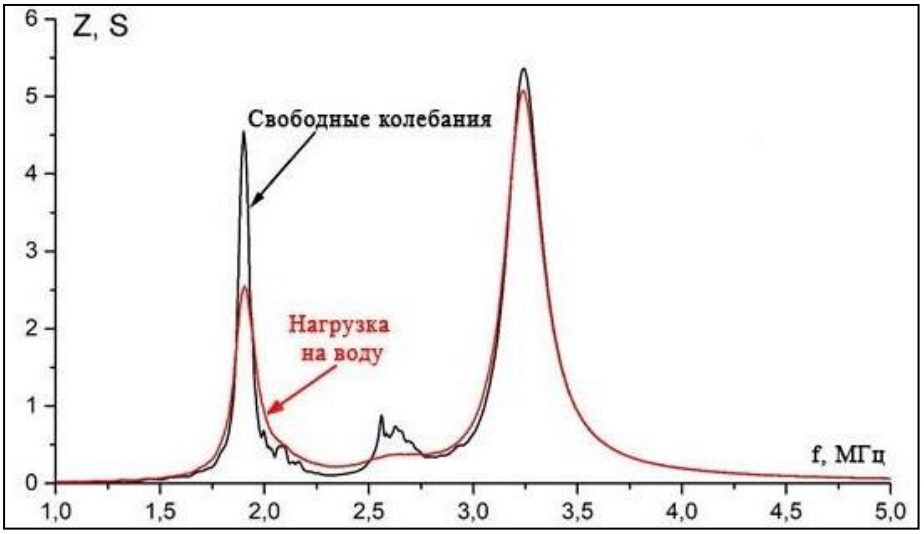


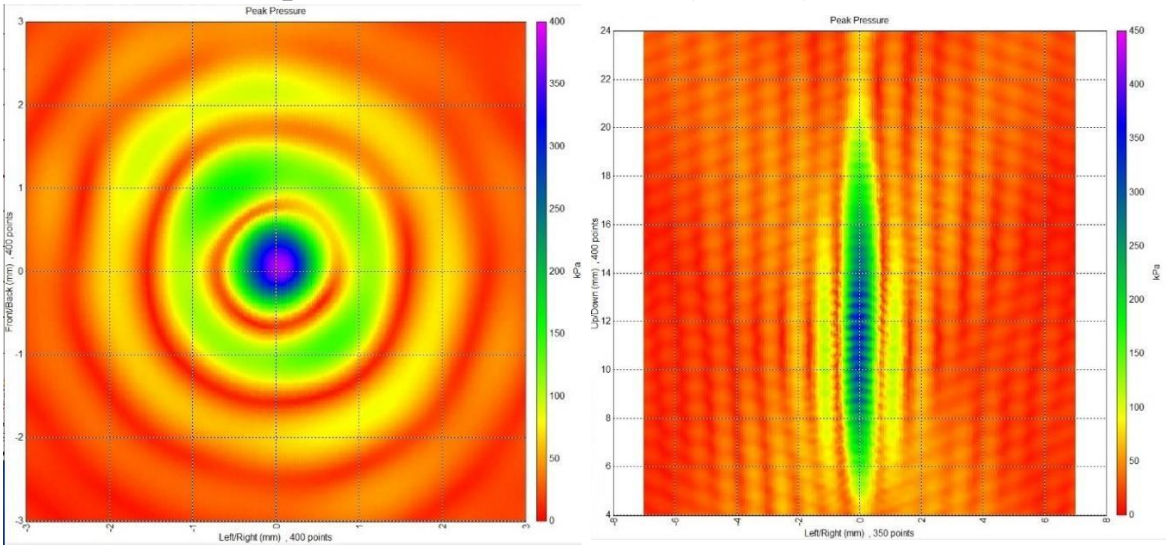
Рис. 4 – Зависимость амплитуды активной составляющей проводимости исследуемых пьезоэлементов от частоты свободного и нагруженного на воду

Заключительным этапом создания фокусирующего HIFU-преобразователя стала сборка в корпус и герметизация ПИ. Материал корпуса изготавливался из нержавеющей стали. Пьезокерамический элемент с согласующим слоем укладывался в радиальную сферическую выточку и после этого все стыковые соединения покрывались герметизирующим составом на основе полиуретана. Через боковое отверстие на корпусе выводился кабель питания, помещённый в гибкую силиконовую трубку. Внешний вид преобразователя в сборе представлен на Рис. 5.

Рис. 5 – Внешний вид собранного прототипа HIFU-преобразователя

Экспериментальные данные

С целью оценки рабочих диапазонов созданного ультразвукового преобразователя проведены исследования, направленные на определение размеров фокусного пятна, а также интенсивности развиваемого акустического давления. Для этого использовалась система измерения акустической интенсивности ONDA AIMS III. Преобразователь помещался в воду напротив измерительного гидрофона и на вход преобразователя подавался модулированный сигнал генератора. Кронштейн с измерительным гидрофоном дискретно перемещался с шагом 0,05 мм в поле акустического воздействия, фиксируя уровень излучения на каждом шаге. Полученные данные обрабатывались с помощью прикладного программного обеспечения Soniq Software и представлены в виде двумерного массива и графиков зависимости акустического давления от координат на плоскости. (Рис. 6).



а) б)

Рис. 6 – распределение интенсивности акустического давления вдоль горизонтальной (а) и вертикальной (б) оси

Основываясь на статистической выборке из массива данных, определены размеры фокусного пятна по уровню -6 дБ, фокусируемого преобразователем. Площадь составила 0,583 мм^2, а размеры 0,8238 на 10,06 мм. Эти размеры соответствуют приближённым вычислениям, полученным в ходе математического моделирования. Таким образом, результаты математического моде-

лирования и создания прототипа HIFU-преобразователя доказали работоспособность выбранной конструкции.

Для наглядной демонстрации возможностей использования преобразователя на органических материалах и биологических тканях проведён эксперимент по воздействию фокусированным ультразвуком на 10-мм пластину из полиметилметакрилата (ПММА) и мышечные ткани курицы (Рис. 7). В ходе серии экспериментов получен ряд размеров фокусного пятна. Минимальное значение составило 0,8 мм, максимальное – около 3 мм. В зависимости от подводимой к преобразователю мощности, а также времени воздействия определены оптимальные режимы воздействия.

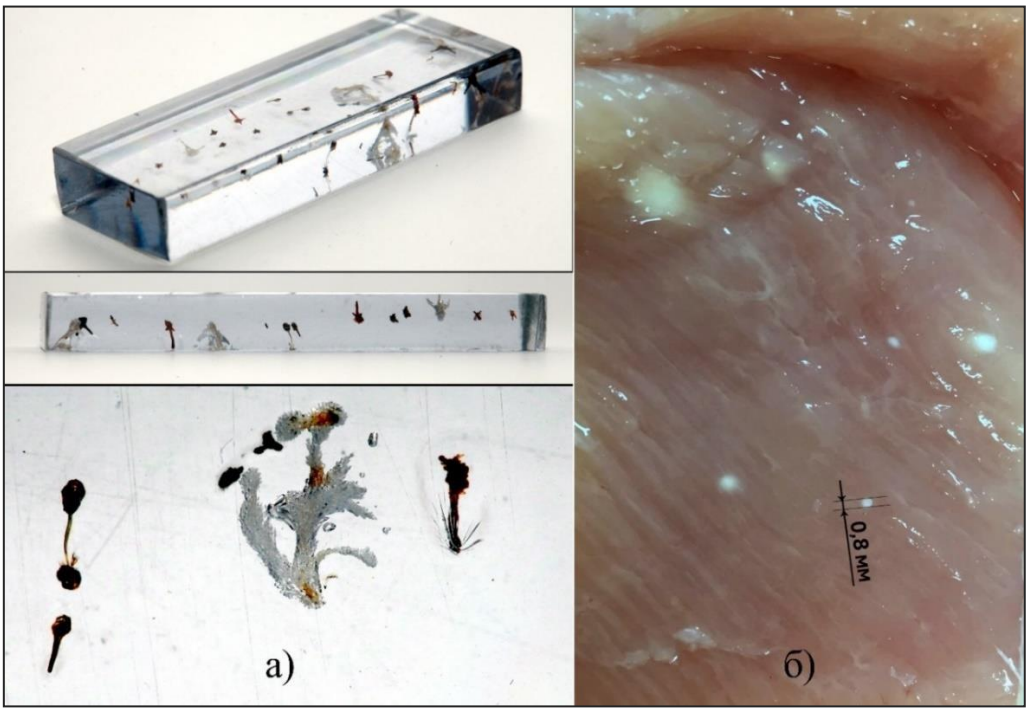


Рис. 7 – результат воздействия HIFU-преобразователя на
а) пластину из ПММА, б) мышечные ткани курицы

Обсуждение результатов

В результате проделанной работы смоделирован и изготовлен прототип фокусирующего ультразвукового преобразователя. Из пьезокерамического материала ПКП-35 создан излучатель в виде тонкостенного сегмента сферы с центральным отверстием, предназначенным для датчика ультразвуковой визуализации. Преобразователь представляет собой ПИ, помещённый в герметичный корпус из нержавеющей стали. Измеренные параметры

(геометрические размеры фокусного пятна, максимальная интенсивность акустического давления, амплитудно-частотная характеристика), а также результаты экспериментов на органических материалах и тканях позволяют сделать вывод о возможности применения созданного устройства в качестве терапевтического HIFU-преобразователя в медицинской практике.

Заключение

Характеристики фокусирующего ультразвукового преобразователя, измеренные на оборудовании ЦКП «Высокие технологии» Южного федерального университета соответствуют расчётам математической модели ПИ, взятого за основу. Экспериментальные данные позволяют сделать вывод о возможности использования в составе терапевтических комплексов, предназначенных для неинвазивного воздействия на локальные участки тканей человеческого тела, размером от 0,8 мм. Интенсивность и время воздействия регулируются с использованием программно-аппаратных средств. Выполнение данного исследования открывает путь к изучению как одноэлементных фокусирующих ультразвуковых преобразователей, так и многоэлементных с распределённым пятном фокуса, построенных на основе современных технологий.

Авторы выражают благодарность коллегам из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Александру Ефимовичу Берковичу и Андрею Борисовичу Белянкину за помощь в проведении исследований.

Список литературы

1. Fry, W.J. Use of intense ultrasound in neurological research // Amer. J. Phys. Med. — 1958. — V. 37, № 3. — P. 143−147.

2. Tyshlek, D., Aubry, J-F, Ter Haar, G., Hananel, A., Foley, J., Eames, M., Kassell, N., Simonin, H.H. Focused ultrasound development and clinical adoption: 2013 update on the growth of the field // Journal of Therapeutic Ultrasound. — 2014. — 2:2.

3. Wu, F., Wang, Z.B., Chen, W.Z., Zou, J.Z., Bai, J., Zhu, H., Li, K.Q., Xie, F.L., Jin, C.B., Su, H.B. Extracorporeal focused ultrasound surgery for treatment of human solid carcinomas: early Chinese clinical experience // Ultrasound in Med. and Biol. — 2004. — V. 30, № 2. — P. 245−260.

4. Ninet, J., Roques, X., Seitelberger, R., Deville, C., Pomar, J.L., Robin, J, Jegaden, O., Wellens, F., Wolner, E., Vedrinne, C., Gottardi, R., Orrit, J., Billes, M.A., Hoffmann, D.A., Cox, J.L., Champsaur, G.L. Surgical ablation of atrial fibrillation with offpump, epicardial, high-intensity focused ultrasound: Results of a multicenter trial // J. Thorac. Cardiovasc. Surg. — 2005. — V. 130, № 3. — P. 803−809.

5. Aptel, F., Lafon, C. Treatment of glaucoma with high intensity focused ultrasound // Int. J. Hyperthermia. — 2015. — V. 31, № 3. — P. 292−301.

6. Vaezy, S., Martin, R., Schmiedl, U., et al. Liver hemostasis using high-intensity focused ultrasound // Ultrasound in Med. and Biol. — 1997. — V. 23, № 9. — P. 1413−1420.

7. Cleveland, R.O., Sapozhnikov, O.A. Modeling elastic wave propagation in kidney stones with application to shock wave lithotripsy // J. Acoust. Soc. Am. — 2005. — V. 118, № 4. — P. 2667−2676.

8. McDannold, N., Clement, G., Black, P. Jolesz, F., Hynynen, K. Transcranial MRI-guided focused ultrasound surgery of brain tumors: Initial findings in three patients // Neurosurgery. — 2010. — V. 66, № 2. — P. 323−332.

9. Kim V, Maxwell A.D., Hall T., Xu Z., Lin K., Cain C. Rapid prototyping fabrication of focused ultrasound transducers // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, vol. 61, no. 9, September 2014

10. K. Chen, T. Irie, T. Iijima and T. Morita, "Wideband Multi-modes Excitation by one Double-parabolic-reflectors Ultrasonic Transducer (DPLUS)," // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, doi: 10.1109/TUFFC.2020.2978234.

11. R. Martínez, A. Vera and L. Leija, "Heat therapy HIFU transducer electrical impedance modeling by using FEM" // 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo, 2014, pp. 299-303, doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860756.

12. S. Cambronero, M. Rivoire, A. Dupré and D. Melodelima, "Non-invasive fast, large and selective in vivo HIFU ablation of the liver with a toroidal transducer," // 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, United Kingdom, 2019, pp. 2126-2128, doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926054.

13. O. Lorton et al., "Self-Scanned HIFU Ablation of Moving Tissue Using Real-Time Hybrid US-MR Imaging," // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 66, no. 8, pp. 2182-2191, Aug. 2019, doi: 10.1109/TBME.2018.2885233.

14. Малыхин А.Ю., Нестеров А.А., Панич А.Е. «Особенности механических характеристик сегнетожесткого материала ПКП-35 при использовании в условиях силового ультразвука» // Материалы XIV всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий», г. Москва, 2019

15. К. Окадзаки «Технология керамических диэлектриков» // перевод с японского, М. «Энергия», 1976

16. H. Wang, W. Zheng, L. Huang, T. Zhang and Z. Yang, "A Rapid and Non-Invasive Method for Measuring the Peak Positive Pressure of Hifu Field Based on Acousto-Optic Deflection Effect," 2019 13th Symposium on Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), Harbin, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SPAWDA.2019.8681819.

17. Беспалов В.Г., Точильников Г.В., Сенчик К.Ю., Ермакова Е.Д., Ковалевская Е.И., Гафтон Г.И., Беркович А.Е. «Высокоинтенсивный сфокусированный ультразвук в лечении злокачественных и доброкачественных опухолей» // Вопросы онкологии. 2020. Т. 66. № 1. С. 29-35.

18. Малыхин А.Ю., Дыкина Л.А., Панич Е.А. «Управление свойствами пьезокерамического материала на основе системы ЦТС для устройств электроакустической техники» // Российский химический журнал, 2020. Т. 64. № 3. С. 97-102.

19. Панич А.Е., Панич А.А., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В., Алексюнин Е.С., Панич Е.А «Инновационные технологии для биомедицинского применения» // Материалы VIII научно-практической конференции с международным участием «Генетика - фундаментальная основа инноваций в медицине и селекции.», Ростов-на-Дону - Таганрог, 2019. С. 175-179.

20. Змитриченко Ю.Г., Точильников Г.В., Беспалов В.Г., Бусько Е.А., Козубова К.В., Сенчик К.Ю., Ермакова Е.Д., Жилинская Н.Т., Беркович А.Е. «Оценка эффективности термической абляции высокоинтенсивным сфокусированным ультразвуком на модели мышечной ткани крысы» // Сборник тезисов VI Петербургского международного онкологического форума «Белые ночи 2020», 2020. С. 282.

Исследование метрологических характеристик вибрационного преобразователя плотности с пьезоэлектрическим возбуждением и измерением параметров колебаний

О.В Зацерклянный

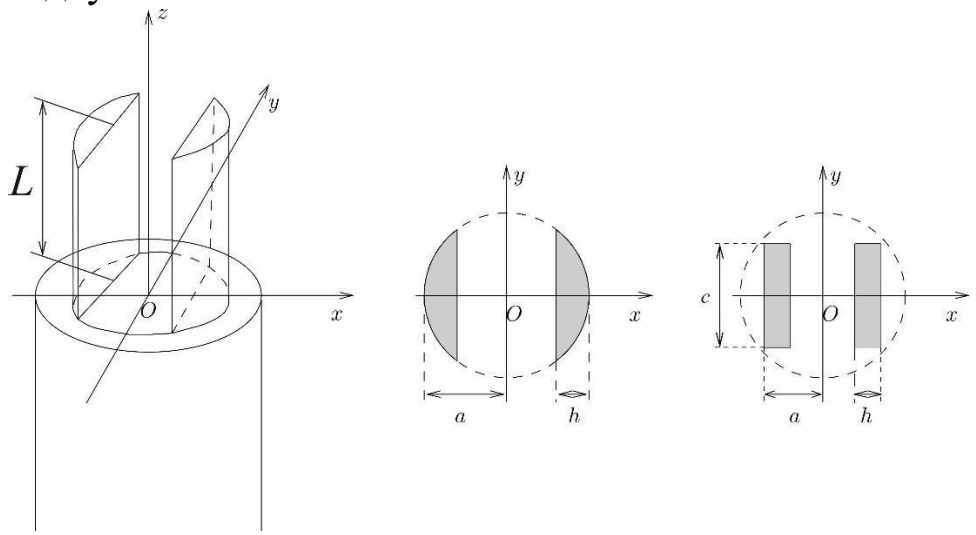
В основе действия погружных вибрационных плотномеров лежит понятие «присоединённой массы». При неустановившемся движении твердого тела в жидкости или газе необходимо преодолевать инерцию окружающей тело массы вещества, что вызывает дополнительное сопротивление. В случае колебательного движения малой амплитуды скорость жидкости и твёрдого тела имеет одинаковое значение и равна скорости перемещения тела. При подсчёте присоединённой массы жидкость считают лишённой вязкости и обычно пренебрегают её сжимаемостью [1]. Физический смысл присоединённой массы заключается в том, что если присоединить к телу, движущемуся в жидкости, дополнительную массу, равную массе жидкости увлекаемой телом, то закон движения тела в жидкости будет таким же, как в пустоте. Таким образом, измеряя значение присоединённой массы жидкости при колебаниях тела определённой формы, мы измеряем плотность этой жидкости. При этом можно считать объём присоёдинённой жидкости постоянным для данной формы тела и моды колебаний [2].

В погружных вибрационных плотномерах чувствительный элемент находится в резервуаре или трубопроводе, со всех сторон окружённый жидкостью или газом и измеряет плотность вещества в небольшой зоне колебаний среды вокруг чувствительного элемента. Обычно чувствительный элемент представляет собой металлический вибропреобразователь (ВПП) камертонного типа. Резонансная частота колебаний вибратора зависит от его механических характеристик, температуры и плотности измеряемой среды.

Основным элементом вибрационного преобразователя плотности жидкостей и газов является колебательная система, которая изменяет свою собственную резонансную частоту в зави-

симости от плотности окружающей его среды. Контролируя резонансную частоту, можно судить о плотности среды.

Типичный вариант реализации ВПП камертонного типа представлен на рис. 1. Механическая колебательная система состоит из двух лопастей



а) б) в)

Рис. 1 – Схема погружного камертонного ВПП:
а – модель камертонного ВПП;
б и в – различный профиль лопастей длиной L, расположенных на мембране симметрично относительно центральной оси Z.

Мембрана жёстко соединена с защитным цилиндром, отделяющим систему возбуждения колебаний от измеряемой среды. Частота колебаний вибратора определяется геометрическими размерами лопастей, расстоянием между ними, размерами мембраны, плотностью материала камертона и присоединённой массой жидкости вокруг него. Лопасти могут выполняться из различных материалов и иметь различную форму и размеры.

Частота первой моды колебаний в вакууме описывается уравнением:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_0}{\theta_0}}, \qquad (1)$$

где C_0 – жесткость лопатки камертона; θ_0 – момент массы лопатки камертона в вакууме.

При колебаниях, которые совершаются в среде с плотностью, отличной от нуля, появляется момент присоединенной массы:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_0}{\theta_0 + \theta}}, \quad (2)$$

где θ – момент присоединенной массы [3].

Из этого выражения можно получить простую функцию вычисления плотности жидкости $\rho_ж$от периода колебаний ВПП

$$\rho_ж = ax^2 + b, \quad (3)$$

где a и b – некоторые константы, определяемые при калибровке в двух средах с известной плотностью.

Общепринятым является решение, когда значение плотности из периода получается в результате вычисления полинома второй степени, в котором все члены не равны нулю, при этом, наличие линейного члена объясняется влиянием внутренних и внешних потерь на трение [4]. Применение ВПП, в котором возбуждение и измерение колебаний проводится с помощью высокоэффективных пьезоэлектрических преобразователей, значительно снижает внутренние потери и даёт возможность перейти к применению соотношения (3) [5, 6]. В этом случае можно значительно упростить процесс калибровки, и применять не три калибровочные среды, а две, в качестве одной из которых, можно применить атмосферный воздух. В качестве второй калибровочной жидкости может быть использована дистиллированная вода, плотность которой известна в широком диапазоне температур и давлений, или любая другая жидкость с известной плотностью.

Для подтверждения возможности применения формулы (3) были проведены экспериментальные исследования камертонных ВПП двух типов с пьезоэлектрическим возбуждением и измерением параметров колебаний. ВПП изготавливались из титанового сплава ВТ1-0, стали 12Х18Н10Т и сплава 44НХТЮ.

Методика испытаний основана на сличении результатов измерений плотности жидкостей-компараторов, выполненных при одинаковых условиях испытуемым плотномером и эталонным

лабораторным плотномером (анализатором плотности жидкости). Расчёт плотности жидкости-компаратора проводится по измеренному значению периода частоты резонансных колебаний ВПП. Определение метрологических характеристик испытуемых ВПП выполняется непосредственным сличением результата и показаний плотности лабораторного плотномера ВИП-2МР [7]. Измеряемые жидкости были помещены в одинаковые условия при атмосферном давлении, без движения измеряемой среды и выдерживались до достижения температуры (20,0 ± 0,1) °С. Для исключения влияния вязкости на результат измерений жидкости-компараторы подбирались с вязкостью не более 10,0 сПз. В качестве рабочего диапазона плотности выбран диапазон от 0,5 до 1680 кг/м3, так как в указанный диапазон плотности и вязкости попадают газы (воздух, азот) и широкий спектр жидкостей, в том числе нефтепродукты, спирты и вода.

На рис. 2 представлены взятые по модулю абсолютные погрешности базовых (с пометкой Б.) и экспериментальных (с пометкой Э.) образцов ВПП.

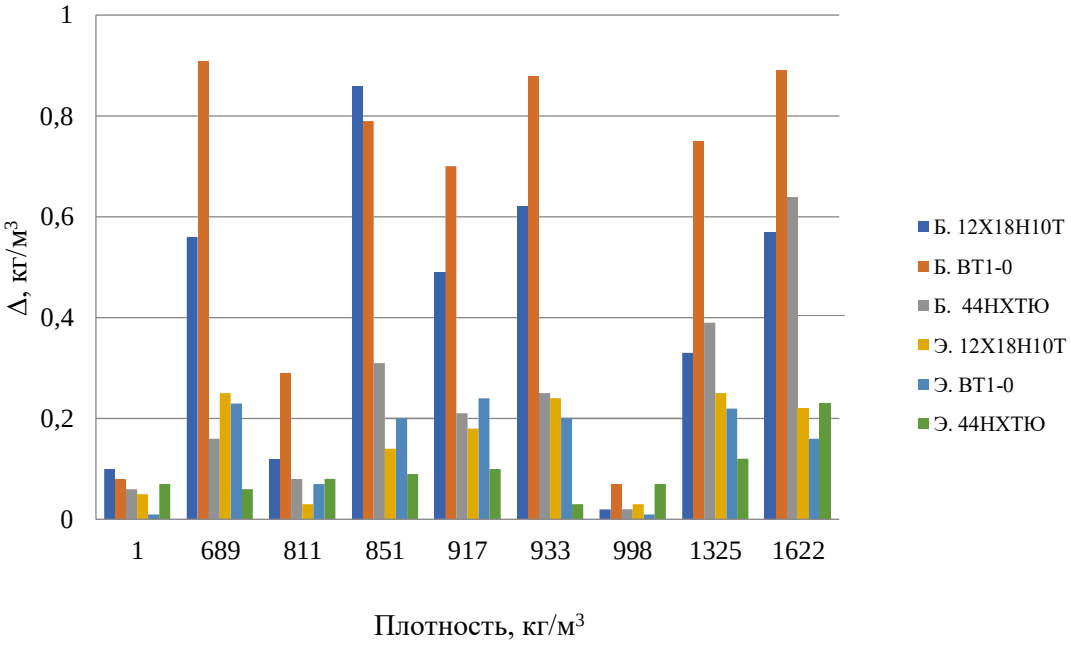


Рис. 2 – Погрешность измерения плотности базовых и экспериментальных образцов ВПП

Проведенные экспериментальные исследования, подтвердили возможность применения полинома второй степени с нулевым

линейным членом для вычисления плотности жидкостей и газов по периоду колебаний ВПП. Наибольшее отклонение значений плотности вычисленной по периоду ВПП от значений, полученных при измерении лабораторным плотномером ρ_э, не превышает ± 1,0 кг/м3.

Список литературы

1. Биркгоф, Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф. – М. : Издательство иностранной литературы, 1963.

2. Риман, И.С. Присоединенные массы тел различной формы/ И.С. Риман, Р.Л. Крепс. – М. : ЦАГИ, 1947.

3. Лопатин, С.С. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы и возможности вибрационных датчиков / С.С. Лопатин, Х. Пфайффер // Автоматизация в промышленности. – 2004. – №12. – С. 24-29.

4. Жуков, Ю.П. Вибрационные плотномеры / П.Ю. Жуков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. Зацерклянный, О.В. Пьезоэлектрические материалы для датчиков вибрации и актюаторов в устройствах измерения плотности жидкостей и газов / О.В. Зацерклянный, А.Е. Панич // Датчики и системы. – 2020. – №4. – С. 48–54.

6. Панич, А.Е. Пьезокерамические актюаторы / А.Е. Панич. – Ростов-на-Дону : 2008. – 159 с.

7. Описание типа средств измерений – Измерители плотности жидкостей вибрационные ВИП-2М и ВИП-2МР – RU.C.31.02.A N 27163-09 2009 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПЬЕЗО-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ориентационные эффекты и модифицированные параметры приема в 2–2-композитах на основе кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков

Д.ф.-м.н., проф. В.Ю. Тополов, к.ф.-м.н., доц. А.В. Криворучко, асп. А.Н. Исаева
Физический факультет, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Слоистые 2–2-композиты на основе кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков $(1 - x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - xPbTiO_3$ (PMN–*x*PT) или $(1 - x)Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - xPbTiO_3$ (PZN–*x*PT) со структурой типа перовскита представляют интерес вследствие важных электромеханических свойств [1] и ориентационных эффектов, связанных с вращением кристаллографических осей кристаллического компонента [2]. Данные эффекты влияют на пьезоэлектрические свойства, коэффициенты электромеханической связи, параметры приема (ПП), факторы анизотропии и другие характеристики композитов. В работе [3] развита концепция модифицированных ПП, которые следует учитывать при воздействии механического напряжения $\sigma = \text{const}$ или деформации $\xi = \text{const}$. Авторы работы [3] впервые проанализировали поведение модифицированных ПП пористых материалов на основе сегнетопьезокерамик. Однако до настоящего времени не исследованы модифицированные ПП 2–2-композитов, в которых проявляются ориентационные эффекты в присутствии кристаллических пьезоэлектрических компонентов. Цель настоящего сообщения – исследование модифицированных ПП 2–2-композита при учете вращения кристаллографических осей в его кристаллическом компоненте.

Исследуемый композит со связностью 2–2 (рис. 1) содержит систему кристаллических и полимерных слоев, которые регуляр-

но распределены вдоль оси OX_1 прямоугольной системы координат ($X_1X_2X_3$). Эти слои непрерывны вдоль осей координат OX_2 и OX_3. Главные кристаллографические оси X, Y и Z в каждом кристаллическом слое параллельны следующим направлениям перовскитовой ячейки [2]: $X \parallel [0\bar{1}1]$, $Y \parallel [100]$ и $Z \parallel [011]$, и кристалл является поляризованным вдоль [011]. Оси X, Y в каждом кристаллическом слое повернуты вокруг OX_3 на заданный угол φ, причем φ = 0 соответствует ориентации $X \parallel OX_1$, $Y \parallel OX_2$ и $Z \parallel OX_3$. При этом ориентация границ раздела кристалла и полимера остается неизменной (x_1 = const, см. рис. 1). Эффективные электромеханические свойства композита (рис. 1)

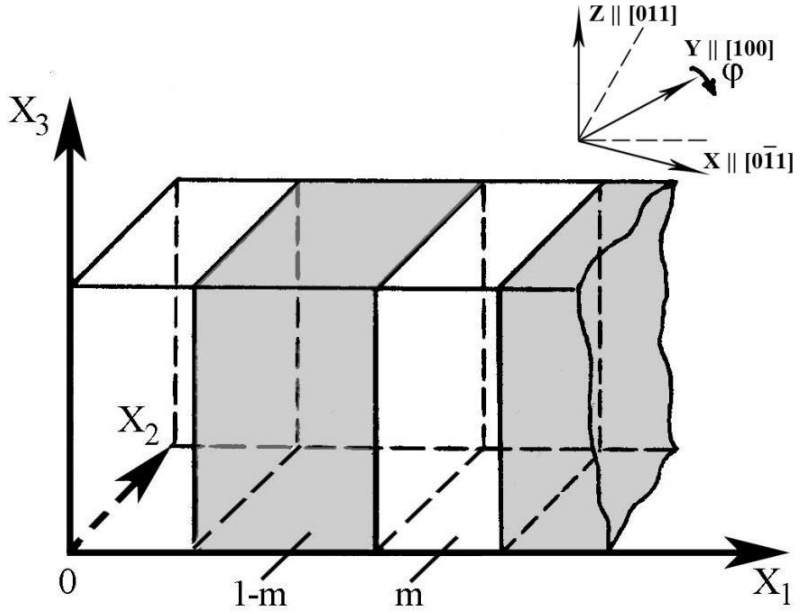


Рис. 1. Схематическое изображение 2–2-композита «кристалл – полимер» с параллельным соединением слоев [2].

($X_1X_2X_3$) – прямоугольная система координат, m и $1 - m$ – объемные концентрации кристаллических и полимерных слоев соответственно, φ – угол вращения главных кристаллографических осей кристалла X и Y вокруг оси $OX_3 \parallel Z$.можно определить в интервале объемных концентраций $0 < m < 1$ по матричному методу [1] с учетом электромеханического взаимодействия слоев и с учетом угла вращения φ. Эффективные свойства данного композита можно представить в виде

$$|| C^*(m, \varphi) || = [|| C^{(1)} ||\cdot|| M ||m + || C^{(2)} ||(1 - m)]\cdot[|| M || m + || I ||(1 - m)]^{-1} \quad (1)$$

В формуле (1) $\| C^{(1)} \|$ и $\| C^{(2)} \|$ являются матрицами электромеханических свойств кристалла и полимера соответственно, матрица $\| M \|$ связана с граничными условиями для компонент электрических и механических полей при x_1 = const (см. рис. 1), $\| I \|$ – единичная матрица. Все матрицы из (1) имеют размерность 9 × 9. Элементы матрицы $\| C^*(m, \varphi) \|$ из (1) и родственные параметры 2–2-композита определены в рамках длинноволнового приближения [1].

При исследовании пьезоактивных композитов вызывает большой интерес немонотонное концентрационное поведение традиционных ПП [1]

$$(Q_{3j}^*)^2 = d_{3j}^* \, g_{3j}^*, \qquad (2)$$

которые используются для оценки отношения «сигнал – шум». В формуле (2) d_{3j}^* – пьезомодули, g_{3j}^* – пьезокоэффициенты композита, j = 1; 2; 3. С ПП $(Q_{3j}^*)^2$ из (2) тесно связаны модифицированные ПП

$$F_{3j}^{*\sigma} = L_{3j}^* (Q_{3j}^*)^2 \qquad (3)$$

(при воздействии на образец однородного напряжения σ = const) и

$$F_{3j}^{*\xi} = F_{3j}^{*\sigma} / (s_{jj}^{*E} s_{jj}^{*D}) \qquad (4)$$

(при воздействии на образец однородной деформации ξ = const).

В формуле (3) $L_{3j}^* = [(k_{3j}^*)^{-1} - ((k_{3j}^*)^{-2} - 1)^{1/2}]^2 / (k_{3j}^*)^2$ – отношение максимальной выходной электрической энергии пьезоэлектрического элемента к максимальной электрической энергии, накопленной в нем [3], k_{3j}^* – коэффициент электромеханической связи, причем k_{31}^* и k_{32}^* берутся по модулю. В формуле (4) s_{jj}^{*D} и s_{jj}^{*D} – упругая податливость соответственно при электрическом поле E = const или электрическом смещении D = const. Для расчетов эффективных свойств (1) и ПП из (2) – (4) использованы экспериментальные электромеханические константы полидоменного кристалла PZN–0.07PT [4], поляризованного вдоль направления [011] перовскитовой ячейки, и пьезопассивного полиуретана [1].

Среди полученных результатов отметим корреляцию между локальными максимумами ПП из формулы (3) (таблица 1) и не-

монотонные ориентационные зависимости ПП из формул (3), (4) (рис. 2). При этом значение объемной концентрации кристалла m = 0.1 близко к значениям m_Q и m_F из таблицы 1. Определенные значения локальных максимумов ПП (см. таблицу 1) соизмеримы с величинами аналогичных ПП 1–3-композита [5] на основе полидоменного кристалла PMN–0.33PT, поляризованного вдоль [001]. В окрестности φ = 50° ПП $F_{3j}^{*\sigma}$ из (3) характеризуются большой анизотропией, т. е. справедливы неравенства

$$F_{33}^{*\sigma} / F_{31}^{*\sigma} >> 1 \text{ и } F_{33}^{*\sigma} / F_{32}^{*\sigma} >> 1,$$

см. рис. 2, а. Из графика на рис. 2, б следует, что ПП $F_{3j}^{*\xi}$ из (4) удовлетворяют условиям большой анизотропии

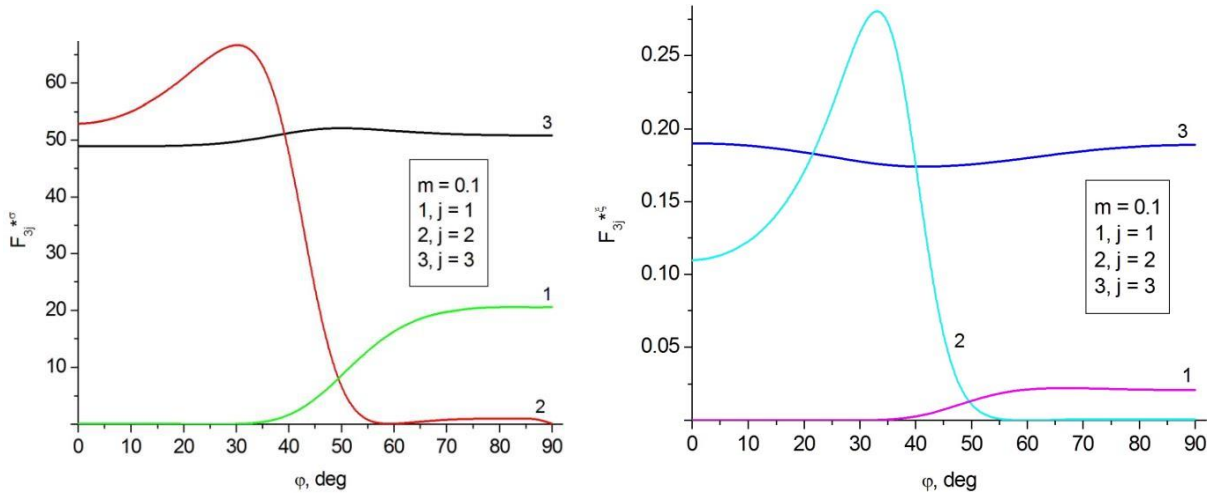
$$F_{33}^{*\xi} / F_{31}^{*\xi} >> 1 \text{ и } F_{33}^{*\xi} / F_{32}^{*\xi} >> 1$$

в широком интервале углов φ при малых изменениях $F_{33}^{*\xi}$. Полученные результаты указывают на то, что исследованный 2–2-композит может применяться в пьезоэлектрических сенсорах, энергосберегающих и других устройствах.

Таблица 1.

Корреляция между локальными $\max[(Q_{33}^{*})^2]$ и $\max F_{33}^{*\sigma}$ 2–2-композита «кристалл PZN–0.07PT – полиуретан» при φ = const

φ, град	Локальный $\max[(Q_{33}^{*})^2]$, 10^{-12} Па$^{-1}$	Объемная концентрация m_Q, соответствующая локальному $\max[(Q_{33}^{*})^2]$	Локальный $\max F_{33}^{*\sigma}$, 10^{-12} Па$^{-1}$	Объемная концентрация m_F, соответствующая локальному $\max F_{33}^{*\sigma}$
0	137	0.081	49.1	0.113
15	137	0.084	49.2	0.117
30	139	0.090	50.3	0.126
45	144	0.091	52.5	0.124
60	143	0.088	52.1	0.122
75	142	0.085	51.3	0.117
90	141	0.084	51.1	0.115



а б

Рис. 2. Примеры ориентационных зависимостей, модифицированных ПП F3j*σ (а, в 10-12 Па-1) и F3j*ξ (б, в 1010 Па) 2–2-композита «кристалл PZN–0.07PT – полиуретан» при объемной концентрации кристалла m = 0.1

Авторы признательны д.т.н. Паринову И.А. (Южный федеральный университет, Россия), проф. д-ру Бауэну К.Р. (Университет Бата, Соединенное Королевство) и проф. д-ру Бизенье П. (Университет Рима Тор Вергата, Италия) за интерес к тематике исследований современных пьезоактивных композитов и за полезные дискуссии по данной тематике.

Исследование проведено при финансовой поддержке в рамках Внутреннего гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

Список литературы

1. Topolov V.Yu., Bowen C.R., Bisegna P. Piezo-active composites. Microgeometry – sensitivity relations. – Cham: Springer International Publ., 2018.– 179 p.

2. Krivoruchko A.V., Topolov V.Yu. // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2007.– Vol. 40, N 22.– P. 7113–7120.

3. Roscow J.I., Pearce H., Khanbareh H. et al. // Eur. Phys. J. Special Topics.– 2019.– Vol. 228, N 7,– P. 1537–1554.

4. Zhang R., Jiang B., Jiang W., Cao W. // Appl. Phys. Lett.– 2006.– Vol. 89, N 24.– P.242908–3 p.

5. Тополов В.Ю., Исаева А.Н. // ЖТФ.– 2021.– Т. 91, N 6.– С. 970–980.

Процесс холодного спекания керамики $BaTiO_3$

М.В. Корнюшин, А.В. Смирнов, Ю.Д. Ивакин.
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова» г. Москва, Россия

Введение

В работе [1] была показана возможность получения керамики при температурах ниже 200°C при комбинации гидротермальной обработки и изостатического прессования. Модификация гидротермального способа уплотнения в водной среде, в котором транспорт массы определяется градиентами давления и концентрации, получила в зарубежной литературе название «процесс холодного спекания» (Cold Sintering Process, CSP) [2]. Температура спекания может быть снижена путем приложения внешнего давления или добавления компонента, который образует жидкую фазу за долго до достижения температуры спекания. При холодном спекании эти два фактора действуя в сочетании, приводят к резкому снижению температуры спекания [2]. Главными преимуществами процесса холодного спекания являются энергоэффективность и расширение номенклатуры получаемых керамических материалов. Понижение температуры спекания ниже 400ºC позволяет уплотнять материалы, разлагающиеся при повышенных температурах. Применение холодного спекания для получения плотной керамики из BT без последующей термической обработки продемонстрировано в недавних работах [3,4]. В работе [3] показано, что использование воды в качестве жидкой фазы не приводит к уплотнению порошка BT, и для получения керамики была использована добавка в виде порошка Ba(OH)2·8H2O, который переходит в жидкое состояние при температуре 80°C и действие как транспортная фаза для процесса холодного спекания. Полученные образцы керамики BT имели относительную плотность свыше 95% и диэлектрическую проницаемость свыше 1000 при частоте 1 МГц. О величине пьезомодулей в статье не сооб-

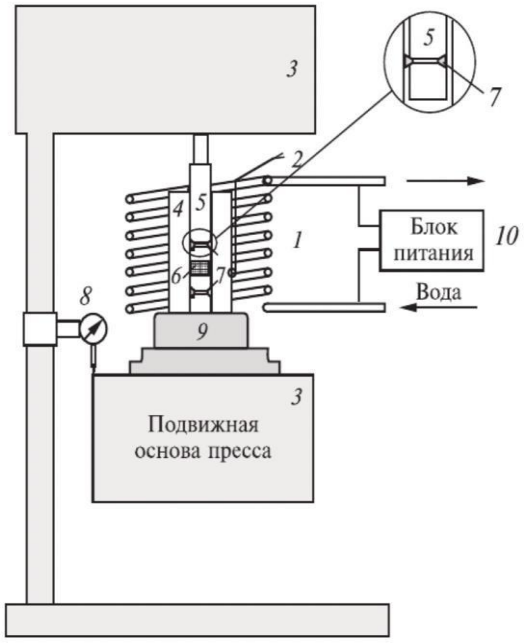
щено. Однако, образцы с очень высокой диэлектрической проницаемостью были получены при длительной выдержке в 15 часов при температуре 225°С и давлении прессования 350 Мпа. В работе [4] керамика ВТ с высокими диэлектрическими свойствами (диэлектрическая проницаемость до 1800 при частоте 1 МГц, tan δ = 0,04) была получена холодным спеканием с добавлением к порошку ВТ смеси порошков KOH и NaOH при выдержке 12 часов при температуре 300°С и давлении прессования 520 МПа.

Целью настоящей работы являлась экспериментальная проверка возможностей уменьшения температуры и времени выдержки, а также давление прессования, необходимых для получения керамики ВТ методом холодного спекания.

Материалы и методы

В работе использован однофазный порошок ВТ, полученный гидротермальным синтезом в среде докритического водного флюида. Средний размер частиц порошка составил 0,4 мкм. В качестве активирующих процесс холодного спекания добавок были использованы: дистиллированная вода, KOH и NaOH квалификации ЧДА.

Процесс холодного спекания проводили в стальной пресс-форме с индукционным нагревом (рис. 1). Пресс-форма содержала четыре пуансона (диаметром 17 мм), между которыми в середине находился порошок, а между крайними пуансонами располагались кольцевые уплотнители из тефлона. В пресс-форму засыпалось 2 грамма порошка ВТ и добавлялось 0,4 мл воды или водного раствора активатора с тщательным перемешиванием (20% от массы порошка ВТ). На пресс-форме закреплялся горячий спай термопары в углублении около образца. Усадку порошка в пресс-форме контролировали с помощью измерения осевого смещения нижней платформы гидравлического пресса индикатором перемещений часового типа с ценой деления 10 мкм, закреплённым на неподвижной раме.



1 – спираль индукционного нагревателя;
2 – термопара; 3 – пресс гидравлический;
4 – матрица пресс-формы; 5 – набор пуансонов;
6 – порошок ВТ; 7 – подставка;
8 – индикатор перемещений часового типа;
9 – блок питания.

Рис.1 – Схема установки холодного спекания.

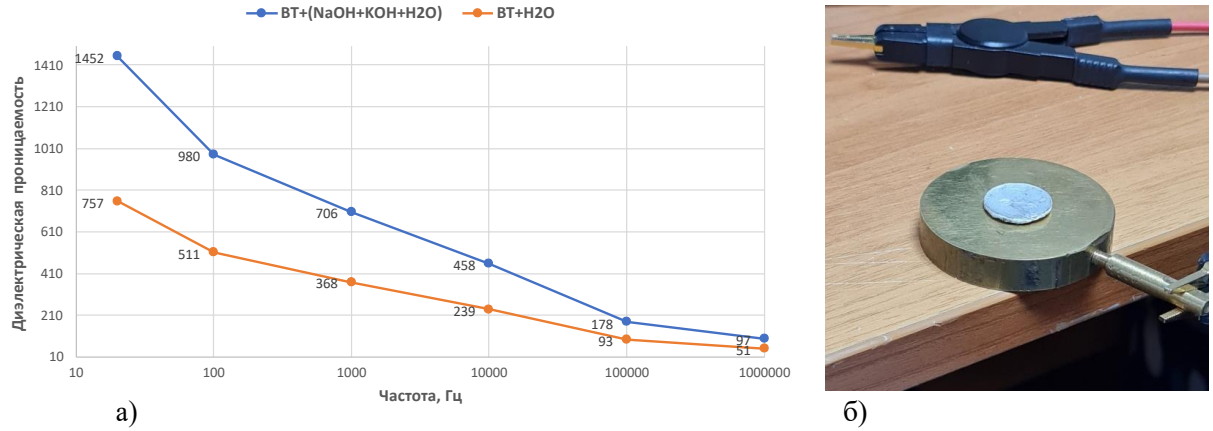
Режимы процесса холодного спекания: температура выдержки 250°С, время выдержки от 1 до 3 часов, давление прессования от 350 до 500 МПа, нагрев до 250°С от 20 минут до 1 часа. Плотность образцов определяли геометрическим методом. Диэлектрическую проницаемость определяли с помощью LCR-метра Agilent 4284A, для покрытия торцов образцов применялся проводящий клей «Контактол».

Результаты

Наилучшие результаты по плотности образцов были получены при использовании в качестве добавки к порошку ВТ 10% по массе смеси порошков KOH и NaOH в пропорции 1:1 и 20% по массе дистиллированной воды. При нагреве до 250°С за 20 минут и выдержке при этой температуре 1 час, и давлении прессования 350 МПа был получен образец относительной плотностью 76%. При использовании в качестве добавки дистиллированной воды при идентичных режимах удалось достичь максимальной относительной плотности 62%. При увеличении времени выдержки до 3-х часов не наблюдалось повышение относительной плотности образцов.

Как при использовании смеси KOH и NaOH с дистиллированной водой, так и только дистиллированной воды при использовании

тефлоновых уплотнительных колец консолидации порошка не происходило. Без уплотнения вода испарялась из пресс-формы, и усадка достигала 0,2 – 0,4 мм. Механическая плотность полученных таким образом образцов позволяла произвести измерение их диэлектрических свойств (рис. 2).



а) б)

Рис.2 – Диэлектрическая проницаемость образцов (а);
образец BT+(NaOH+KOH+H2O) с нанесенным проводящим слоем для измерения диэлектрической проницаемости (б).

Величины диэлектрической проницаемости образцов с наибольшей относительной плотностью, полученных с применением различных добавок (рис. 2, а), при частотах свыше 100 Гц слишком низкие, однако они показывают перспективность подхода по комбинирования воды с гидроксидами в твердом состоянии.

Выводы

В работе продемонстрированы первые результаты экспериментальной оценки применимости нового подхода к снижению температуры, времени выдержки и давления прессования в процессе холодного спекания керамики BT. Комбинация двух типов активирующих добавок – дистиллированной воды и твердых гидроксидов позволяет достигать уплотнения порошка BT в процессе холодного спекания при времени выдержки 1 час, давлении прессования менее 500 МПа и температуре менее 300°C. Было показано, что герметизация пресс-формы тефлоновыми кольцами препятствует консолидации. При этом, при увеличении времени выдержки до 3-х часов плотность образцов не увеличивалась. Данный факт может свидетельствовать о том, что процесс холод-

ного спекания происходит в процессе нагрева до температуры выдержки и завершается в первые минуты выдержки.

Для увеличения плотности образцов ВТ и их диэлектрической проницаемости, достаточных для поляризации и измерения пьезомодулей, запланированы дальнейшие экспериментальные исследования режимов холодного спекания, количества воды, состава и пропорции твердых гидроксидов.

Работа проводилась с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Объединенный учебно-научный центр коллективного пользования» МИРЭА – Российского технологического университета.

Список литературы

1. Yamasaki N. et al. A hydrothermal hot-pressing method: apparatus and application //Hydrothermal Reactions for Materials Science and Engineering. – Springer, Dordrecht, 1989. – P. 423-424.

2. Maria J. P. et al. Cold sintering: current status and prospects //Journal of Materials Research. – 2017. – V. 32. – №. 17. – P. 3205-3218.

3. Sada T. et al. High permittivity BaTiO3 and BaTiO3-polymer nanocomposites enabled by cold sintering with a new transient chemistry: Ba (OH) 2· 8H2O //Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – №. 1. – P. 409-417.

4. Tsuji K. et al. Single step densification of high permittivity BaTiO3 ceramics at 300 ºC //Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – V. 40. – №. 4. – P. 1280-1284.

Влияние сульфата свинца на электрофизические параметры пьезокерамики ЦТС-19

А.В. Казакова, М.И. Толстунов, А.А. Нестеров
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Керамика на основе фаз системы цирконата-титаната свинца (ЦТС) широко используется как базовый пьезоматериал в современной электронике, благодаря высоким значениям их диэлектрических и пьезоэлектрических параметров. Одним из таких материалов является ЦТС-19 [1].

Синтез порошков сегнетофаз, формирующих материал ЦТС-19, как и многих других свинецсодержащих фаз, осложнен испарением оксида свинца, что приводит к нарушению состава исходной шихты и, в последующем, к снижению электрофизических параметров (ЭФП) изготавливаемой пьезокерамики [2-3]. В связи с этим, целью данной работы является совершенствование технологии спекания прессзаготовок, изготовленных из порошков фаз материала ЦТС-19, за счет введения в исходную шихту специальных добавок. Нами, в качестве такой добавки был выбран сульфат свинца, что обусловлено его меньшей летучестью, а также температурой разложения, близкой к температуре формирования керамического каркаса материала ЦТС-19. В данном случае сульфат свинца выступает в качестве компонента, способного удерживать оксид свинца в составе шихты, а также, при температуре спекания, выступать источником ионов свинца.

Синтез целевого продукта проводился традиционным методом твердофазных реакций из промышленной шихты состава ЦТС-19 (НКТБ «Пьезоприбор»), к которой добавляли рассчитанное количество сульфата свинца $PbSO_4$ (марки «ч.д.а.») в диапазоне 0,5–5 масс.%. Помол прекурсоров осуществляли в планетарной мельнице в среде изобутилового спирта в течение 30 минут. На следующем этапе к полученной шихте добавляли 3 %-ный раствор поливинилового спирта, и затем их порошков формовали пресс-заготовки, спекание которых проводили в течение 2 часов при температуре 1230 ^{o}C (скорость нагрева 100 ^{o}C/ч).

По данным электронной микроскопии SEM (электронный микроскоп JSM-6390LA) средний размер частиц керамики, шихта которой содержала 0,5 масс.% и 2 масс.% $PbSO_4$ составляет 2мкм (рис.1-2.), а в присутствии 5 масс.% $PbSO_4$ – 2,6 мкм (рис.3.).

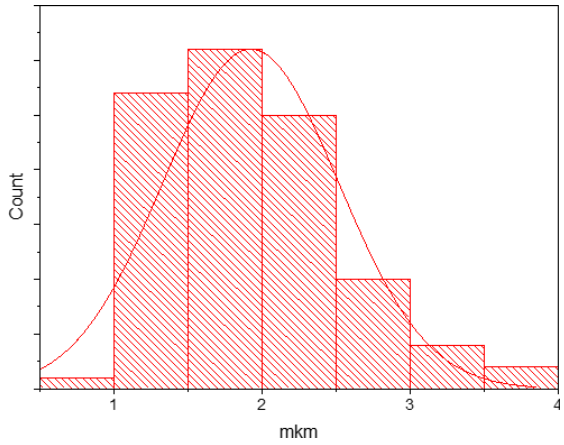


Рис. 1. Гистограммы распределения размеров частиц для ЦТС-19, легированного 0,5 масс.% $PbSO_4$

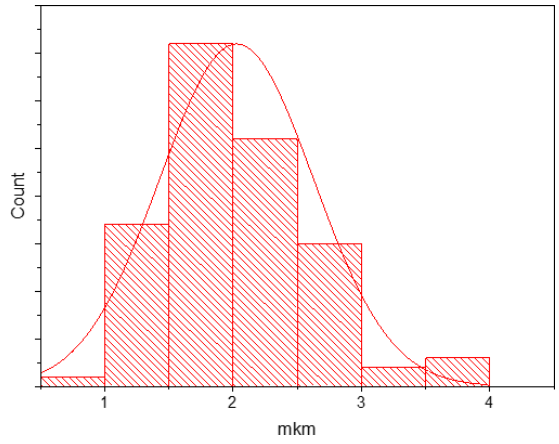


Рис. 2. Гистограммы распределения размеров частиц для ЦТС-19, легированного 2 масс.% PbSO4

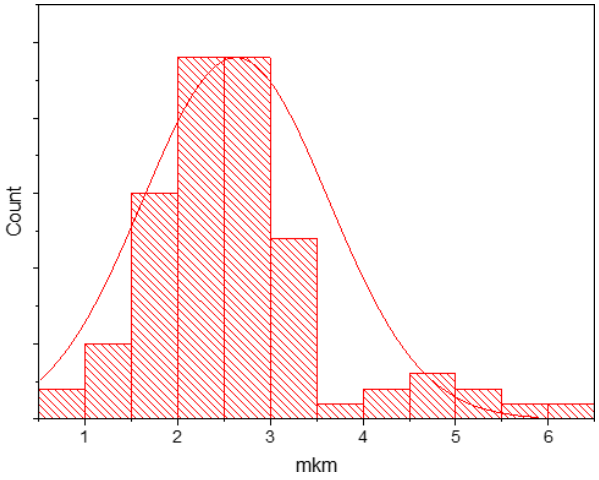


Рис. 3. Гистограммы распределения размеров частиц для ЦТС-19, легированного 5 масс.% PbSO4

Таблица 1.

ЭФП для образцов на основе ЦТС-19,
легированных сульфатом свинца.

Параметр	0 масс.% $PbSO_4$	0,5 масс.% $PbSO_4$	2 масс.% $PbSO_4$	5 масс.% $PbSO_4$
Плотность, $г/см^3$	7,50	7,67	7,67	7,70
tgα, %	2,50	2,48	2,48	2,66
$\varepsilon_{33}^{T} / \varepsilon_0$	1750	1876	1888	1724
d_{31}, пКл/Н	-192	-231	-228	-225
d_{33}, пКл/Н	400	484	480	478
d_v, пКл/Н	15	22	24	28

Плотность полученных образцов определяли расчетным методом. Согласно полученным данным (таблица 1), увеличение количества $PbSO_4$ приводит к увеличению плотности получаемой керамики. Значения продольного пьезомодуля d_{33} определяли квазистатическим методом с помощью установки d_{33}meter (APC International, Ltd, США). По сравнению с материалом ЦТС-19, пьезокерамика, изготовленная с добавлением сульфата свинца, в количестве 0,5 – 2 масс.% обладает более высокими значениями этого пьезомодуля и диэлектрической проницаемости. Дальнейший рост массовой доли $PbSO_4$ в системе (до 5 масс.%) несколько снижает значения d_{33}, а значения $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ уменьшаются до уровня исходного материала.

Таким образом, введение в шихту материала ЦТС-19 сульфата свинца способствует улучшению ЭФП этого пьезоматериала.

Список литературы

1. Зацерклянный О. В., Панич А. Е. Пьезоэлектрические материалы для вибрационных преобразователей плотности вязких жидкостей //Физические основы приборостроения. – 2020. – Т. 9. – №. 3. – С. 46-51.

2. Нестеров А.А., Современные проблемы материаловедения керамических пьезоэлектрических материалов / А.А. Нестеров, А.А. Панич. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – С. 226.

3. Яффе В. Пьезоэлектрическая керамика / В. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. – М.: Мир, 1974. – С. 288.

Влияние режимов стабилизации на электрофизические свойства пьезокерамики из материала ПКП-12

М.В. Драганчук, А.В. Нагаенко, А.С. Турлюн
Южный федеральный университет, Институт высоких технологий и пьезотехники, Россия, г. Ростов-на-Дону

Пьезоэлектрические материалы на сегодняшний день находят множество применений в различных областях науки и техники [1]. На практике широкое распространение получили пьезокерамические материалы на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца ввиду возможности целенаправленного варьирования их параметров в широком интервале [2]. В последние годы все большее внимание уделяется высокоэффективным пьезокерамическим материалам, которые обладают стабильными параметрами как во временном, так и в температурном интервале. Одним из таких перспективных материалов является ПКП-12.

Проблема стабильности параметров пьезоматериалов занимает особое место при разработке и эксплуатации устройств на их основе. Многие пьезоэлектрические материалы подвергаются процессам деградации и старения, связанным с изменением их электрофизических свойств [3]. Наиболее распространенными факторами, вызывающими деградацию пьезоэлектрических свойств, являются высокая температура, напряжение и сильное электрическое поле. Поскольку одним из простых и эффективных способов искусственного старения пьезокерамики является воздействие повышенной температуры [5], в данной статье исследованы различные температурные режимы стабилизации (старения) электрофизических параметров пьезоматериала ПКП-12.

После изготовления и поляризации контрольные образцы были разделены на две группы. Первая группа образцов предназначена для естественного (временного) старения. Образцы второй группы подвергались температурному воздействию (искусственное или температурное старение).

Данные об основных электрофизических параметрах всех образцов, измеренные на 5 день после поляризации, представле-

ны в таблице 1. Для измерения электрофизических параметров пьезокерамики использовалась аппаратура для контроля параметров пьезоэлементов «Цензурка-МА2.1».

Таблица 1.

Исходные значения электрофизических параметров образцов после поляризации

№ п/п	C_0, пФ	tgδ, %	f_r, кГц	f_a, кГц	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	d_{31}, пКл/Н	V_1^E, м/с	K
Группа 1 (для временной стабилизации)								
1	2 871,2	2,19	202,380	245,658	4 233	338	2 759	0,567
2	2 894,2	2,18	202,513	244,428	4 267	334	2 761	0,560
3	3 012,4	2,18	203,198	243,214	4 441	331	2 770	0,550
Средние значения	**2 925,9**	**2,18**	**202,697**	**244,434**	**4 313**	**334**	**2 764**	**0,559**
Группа 2 (для температурной стабилизации)								
1	2 960,7	2,15	204,331	244,413	4 347	324	2 792	0,549
2	2 987,7	2,16	204,286	244,729	4 387	327	2 791	0,551
3	2 955,5	2,22	203,872	243,806	4 339	325	2 785	0,548
4	2 990,7	2,14	203,724	243,946	4 391	328	2 783	0,550
5	2 977,8	2,21	204,353	244,488	4 372	325	2 792	0,549
6	2 948,0	2,19	204,198	244,191	4 328	324	2 790	0,548
7	2 973,8	2,14	203,925	243,860	4 366	325	2 786	0,548
Средние значения	**2 970,6**	**2,17**	**204,098**	**244,205**	**4 361**	**326**	**2 788**	**0,549**

В качестве исходных значений для анализа были использованы средние значения относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, скорости звука V_1^E и пьезомодуля d_{31} для каждой из групп пьезоэлементов.

Первая группа образцов подвергалась естественному старению в нормальных условиях в течение 187 дней. Образцы второй группы подвергались периодическому нагреву и выдержки при температуре 50°С (время выдержки варьировалось от нескольких часов до нескольких суток).

Для наглядности происходящих изменений электрофизических параметров были построены графики их зависимости от времени, прошедшего с момента поляризации для временного

старения и времени нахождения пьезокерамических образцов под воздействием высоких температур для температурной стабилизации (рис. 1-3).

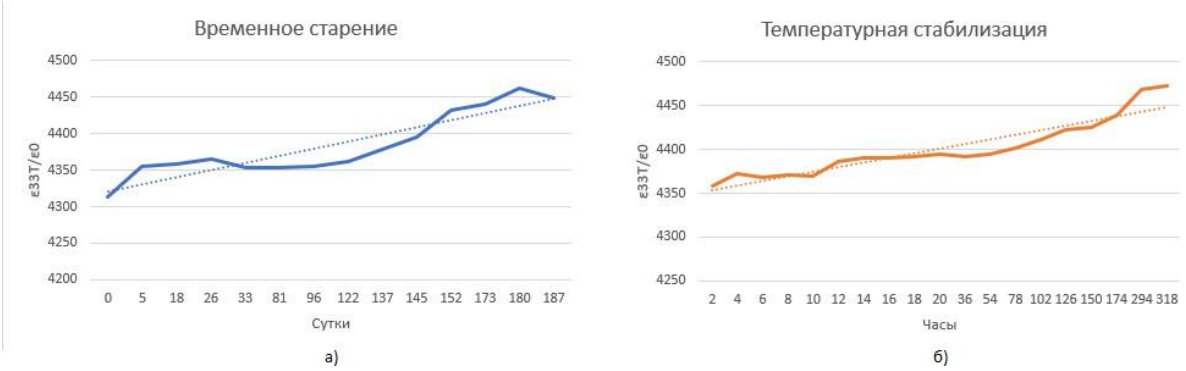


Рис. 1 – Изменение относительной диэлектрической проницаемости после поляризации при: а) временном старении, б) температурной стабилизации.

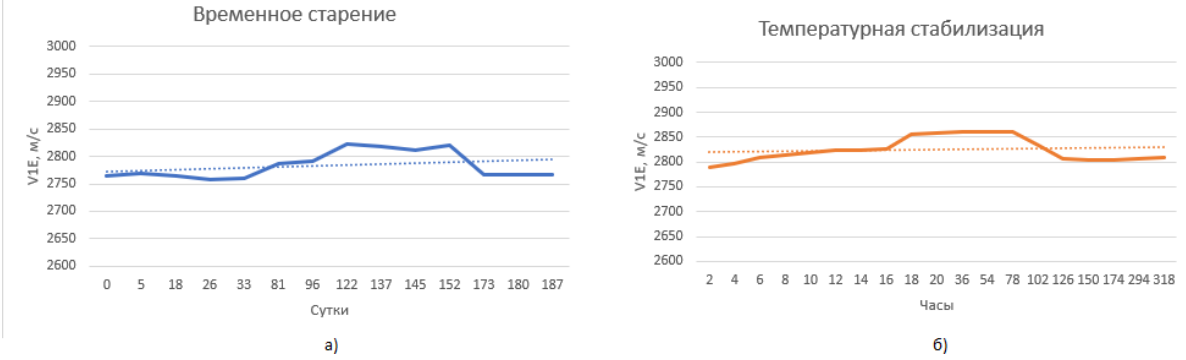


Рис. 2 – Изменение скорости звука после поляризации при: а) временном старении, б) температурной стабилизации.

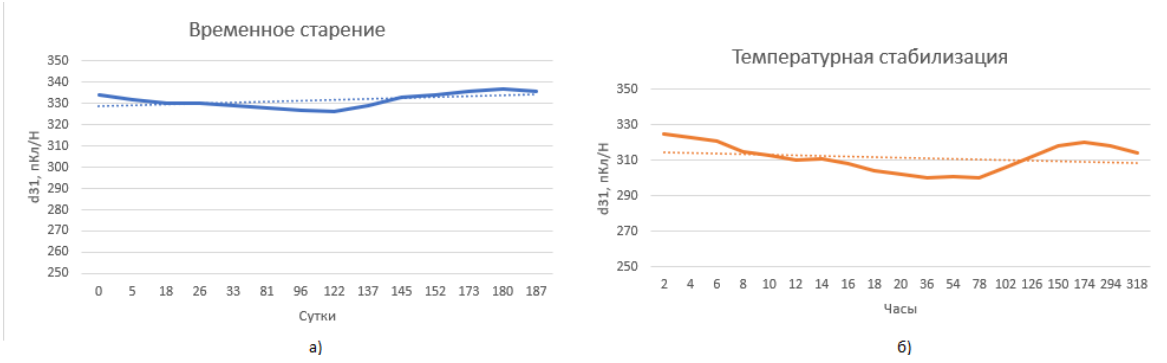


Рис. 3 – Изменение пьезомодуля после поляризации при:
а) временном старении, б) температурной стабилизации.

Как следует из данных на рис. 1 (а), на протяжении 187 суток происходит увеличение относительной диэлектрической проницаемости пьезокерамики, находящейся в нормальных условиях. Увеличение этого параметра также наблюдается и при темпе-

ратурной стабилизации (рис. 1, б), однако в этом случае временной мерой выступают часы.

На рис. 2 также наблюдается рост скорости звука, но с меньшей интенсивностью, чем у относительной диэлектрической проницаемости.

Пьезомодуль в свою очередь имеет разброс в небольшом интервале значений как для временного старения (рис. 3, а), так и для температурной стабилизации (рис. 3, б). Также на графиках (рис. 3) наблюдается тенденция уменьшения на начальных этапах измерения пьезомодуля, а затем его увеличения приблизительно до первоначальных значений.

Полученные в результате эксперимента данные позволяют сделать вывод о том, что при естественном старении ухудшение электрофизических параметров происходит с достаточно небольшой скоростью, иначе говоря, в течение шести месяцев наблюдения пьезокерамика из материала ПКП-12 остается стабильной в некотором диапазоне значений, однако после нагревания скорость старения резко возрастает, о чем свидетельствуют примерно одинаковые величины электрофизических параметров пьезокерамических образцов, соответствующие 122 дням после поляризации для временной стабилизации и 2 часам выдержки при повышенной температуре для температурной стабилизации, как это следует из данных, приведенных на рис. 4. Данный факт можно связать с облегчением обратных поворотов части доменов в исходное (частичная деполяризация) [4]. В результате процесс стабилизации значительно сокращается, и параметры пьезокерамики становятся стабильными во времени, что позволяет сократить технологический процесс производства.

Временное старение	сутки	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	V_1^E, м/с	d_{31}, пКл/Н	tgδ, %
	122	4 249	2 822	317	2,11
Температурная стабилизация	часы	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	V_1^E, м/с	d_{31}, пКл/Н	tgδ, %
	2	4 358	2 789	325	2,18

Рис. 4 – Сравнение полученных результатов исследования при временной и температурной стабилизации

Несмотря на явную тенденцию ухудшения электрофизических параметров пьезокерамики из материала ПКП-12, результаты температурной стабилизации значительно превышают результаты естественного старения, т.е. времени проведения эксперимента было недостаточно для того, чтобы естественным старением достигнуть уровня температурной стабилизации. Поэтому выявленные закономерности требуют дополнительной тщательной экспериментальной проверки, включающей в себя гораздо больший временной промежуток и более обширный материал по рассматриваемому вопросу.

Список использованных источников

1. Глозман И.А. Пьезокерамические материалы в электронной технике. – Москва-Ленинград: Энергия, 1965.

2. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. – М.: Мир, 1974.

3. Писаренко Г.Г. Прочность пьезокерамики. – Киев: Наукова думка, 1987.

4. Смоленский Г.А. Новые сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. – Успехи физических наук, т.LXII, вып. 1, 1957.

5. Gotmare Sunil W. Termal degradation and aging of high temperature piezoelectric ceramics / Sunil W. Gotmare – University of Kentucky Master's Theses, 2008.

Пьезокерамические материалы для ультразвуковых методов неразрушающего контроля

В.В. Коловоротний, А.В. Нагаенко, Н.А. Гирагосова
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) часто используют при ультразвуковом неразрушающем контроле, где они применяются как излучатели, так и приемники ультразвуковых импульсов, которые обрабатывает ультразвуковой дефектоскопом. В зависимости от функций, выполняемых ПЭП ультразвукового сигнала различают: совмещенные, в которых пьезоэлемент работает как в режиме приема так излучения и раздельно-совмещенные в которых в одном преобразователе располагаются два и более пьезоэлемента, один при этом работает исключительно в режиме излучения, а другой в режиме приема. Выбор типа преобразователя, определяется параметрами контролируемого объекта, таких как материал, толщина, форма, ориентация дефектов и т.д. Известно, что параметры, характеризующие работу ПЭП в режиме излучения и приема (акустическая мощность, добротность, механическое сопротивление, чувствительность и т.д.) определяют исключительно свойства активного материала и геометрическими размерами чувствительного пьезоэлемента. Таким образом управляя параметрами пьезокерамического материала, можно влиять на эффективность работы ПЭП, используемых при ультразвуковом неразрушающем контроле.[1-3]

Материал ЦТС-83 изготавливался двумя методами, в рамках метода 1, порошки прекурсоров смешивались и измельчались в барабанной мельнице (скорость 75 об/мин), а во втором методе подвергались помолу в планетарной мельнице. Высокоэнергетический помол смеси прекурсоров осуществлялся в планетарной мельнице Planetary Mill pulverisette 5 с барабаном и шарами, изготовленными из, стабилизированной иттрием, керамики диоксида циркония при частоте вращения барабана 350 об/мин.

Для синтеза пьезофаз, лежащих в основе материала ЦТС-83, Обжиг заготовок проводился при температуре 800ºС.

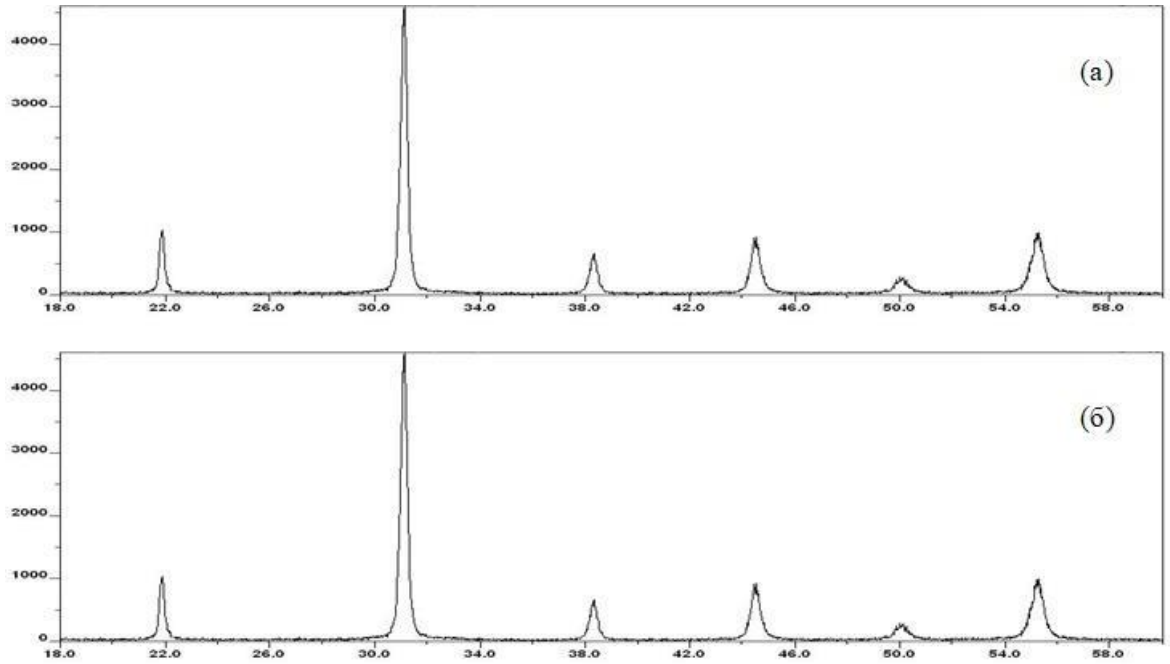


Рис. 1 – Дифрактограммы синтезированного пьезокерамического материала полученного а) методом 1 и б) методом 2

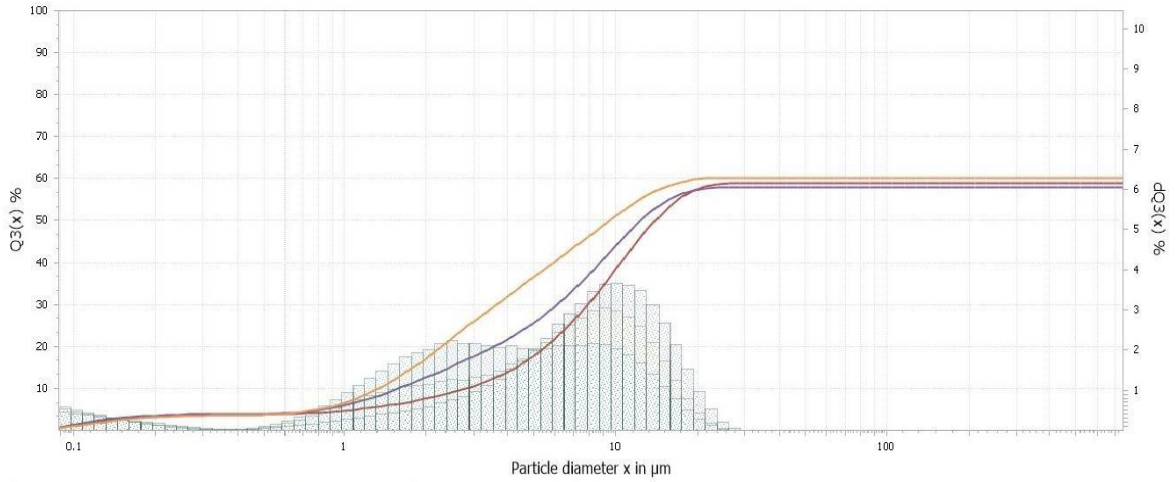
Из представленных на рис. 1 данных видно, что синтез целевых продуктов в обоих случаях завершен поскольку на дифрактограммах отсутствуют следы исходных компонентов и промежуточных фаз.

Для изучения характера агломерации полученных порошков проведены измерения на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 compact с использованием блока диспергирования в жидкости.

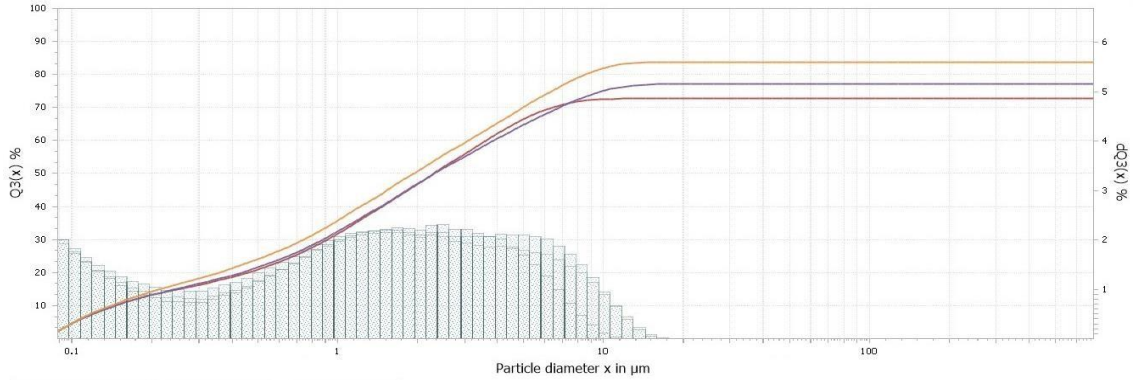
Характерные для порошков интегральные функции распределения и плотности распределения частиц по размеру (в виде гистограммы) представлены на рис. 2.

Наибольшей концентрацией крупных агломератов обладает порошок, приготовленный в барабанной мельнице (рис. 2а). По-видимому, ответственными за их формирование являются низкоплавкие эвтектики на основе PbO, образующиеся при синтезе. Для порошка прошедших механическую активацию, наблюдается всего один максимум, относящийся к агломератам (рис. 2б).

Характеристики исходных порошков оказывают определяющее влияние на режимы спекания получаемой керамики. Большая концентрация крупных агломератов приводит к снижению плотности заготовки и, тем самым, уменьшению плотности керамики.



(а)



(б)

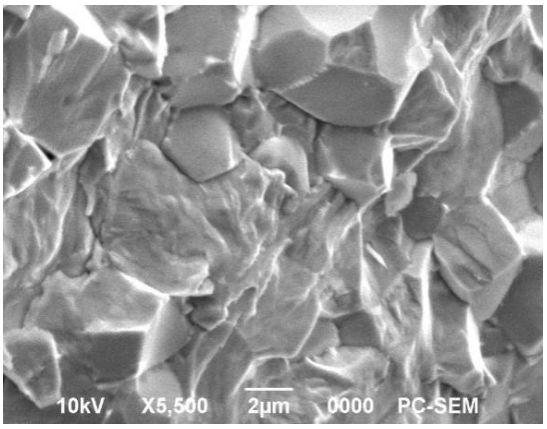
Рис. 2 – Интегральные функции распределения и плотности распределения частиц по размеру материалов, полученных а) методом 1 и б) методом 2

Спекание керамики ЦТС-83 проводили в атмосфере паров PbO при выдержке на максимальной температуре 2 ч, после чего была исследована микроструктура полученных образцов.

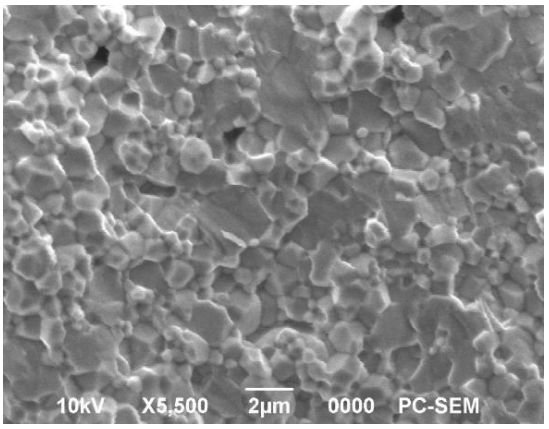
Микроструктура спеченных образцов представлен на рис. 3.

Наименьшей концентрацией дефектов характеризуются порошки, прошедшие помол в барабанной мельнице. Скорость роста зёрен в этих системах минимальна в связи с чем процесс вторичной рекристаллизации (по температурному интервалу) перекрывает процесс первичной рекристаллизации (рис. 3а).

Активация порошков в планетарной мельнице увеличивает концентрацию неравновесных дефектов. В связи с этим значительно возрастает скорость первичной рекристаллизации, что снижает скорости процессов вторичной рекристаллизации образцов данных типов.



а)



б)

Рис. 3 – Микроструктура спеченной керамики, полученной по а) метод 1; б) метод 2

После спекания из заготовок изготавливались контрольные образцы в виде диска размером 10х1мм на которых устанавливались электрофизические параметры.

В таблице 1 представлены зависимости основных электрофизических параметров керамики ЦТС-83, полученной разными способами.

Таблица 1.

Зависимости ЭФП от способов помола

Способ помола	$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	tgδ, %	d_{31}, пКл/Н	V_1^E, м/с
Барабанная мельница	1503	1,54	195	3022
Планетарная мельница	1829	1,52	220	2920

К одной из основных причин, определяющих свойства пьезоэлектрической керамики, по-видимому, следует отнести однородность элементного состава, с которой связаны внутренние механические напряжения внутри зерна и характер доменной структуры. Таким образом, для достижения максимальных функциональных параметров пьезокерамических материалов, приготовленных с применением механической активации, необходим тщательный анализ степени совершенства кристаллитов (зерен), составляющих керамику, и исследование особенностей их доменной структуры.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– ЭФП пьезокерамических материалов существенно зависят от технологии получения образцов;

– оптимальной совокупностью ЭФП и МП обладает керамика, полученная с применением механической активации порошков материалов;

– пьезокерамические элементы на основе материала ЦТС-83 отличаются устойчивостью к электрическим воздействиям и характеризуются высокими значениями поляризации.

Список литературы

1. Авакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Авакумов. – Новосибирск.: Наука, 1979. – 223 с.

2. Болдырев В.В. Механическая активация при реакциях твердых тел. Свойства и применение дисперсных порошков. /В. В. Болдырев. – Киев. «Наукова думка», 1986. –254 с.

3. Нагаенко А.В. Технологические приемы управления электрофизическими параметрами пьезокерамических и композиционных материалов со структурой типа перовскита для пьезопреобразователей: диссертация кандидата технических наук. Новочеркасск, 2016.- 177 с.

Технологические аспекты оптимизации изготовления многослойных актюаторов с низковольтным управляющим напряжением

М.А. Мараховский, В.А. Мараховский, О.Е. Брыль, Р.А. Байдаров, Л.А. Дыкина
Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Введение

В настоящее время актуальным направлением микромеханики является создание актюаторов прецизионного перемещения на основе пьезокерамических преобразователей. Такие актюаторы представляют собой конструкцию из многослойного пьезоэлектрического преобразователя и обладают целым рядом преимуществ: низковольтным управляющим напряжением (около 100 В), значительным создаваемым усилием (до 100 кгс), быстродействием (10 мкс), долговечности (10^{11} циклов), высоким коэффициента электромеханического преобразования (k_{33} = 0,7) [1–3].

Основная часть

Большой практический интерес представляют пьезоэлектрические материалы, с пониженными температурами спекания, применяемые при изготовлении многослойных актюаторов с низковольтным управляющим напряжением. Процесс изготовления многослойных актюаторов основан на пакетной сборке тонких слоёв плёнки из пьезоэлектрического материала, между которыми наносится формирующая электрод паста. После этого собранный пакет обжигается при температуре спекания керамики, образуя высокопрочный монолитный актюаторный блок. Основной проблемой изготовления таких актюаторов является необходимость согласования температур спекания керамических слоёв с температурой вжигания межслойных токопроводящих электродов. Однако, большинство пьезокерамических материалов характеризуются температурами спекания свыше 1200°С и требуют применения высокотемпературных паст на основе Pt – Pd для формирования электродов. Сокращение температур спекания

пьезоматериала до 1100°С и ниже, позволяет использовать менее дорогие формирующие электрод пасты на основе Ag – Pd, что существенно сказывается на себестоимости продукции. Но, чаще всего, пьезокерамические материалы с пониженными температурами спекания, характеризуются относительно невысокими значениями коэффициента электромеханического преобразования [4].

Актуальной задачей является получение высокоэффективных пьезоэлектрических материалов с пониженными температурами спекания. Реализовать указанные параметры можно при помощи полифазных составов пьезоматериалов, принадлежащих к гетерогенной морфотропной области, характеризующейся повышенной внутренней энергией, вызванной физико-химическим взаимодействием нескольких фаз [5, 6].

Ранее авторами работы был разработан многокомпонентный сегнетомягкий пьезоэлектрический материал $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ - $Pb(Ni_{1/2}W_{1/2})O_3$ - $Pb(Cd_{1/2}W_{1/2})O_3$ – $Pb(Bi_{2/3}W_{1/3})$ O_3 – $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ – $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, с температурой спекания ниже 1000°С [7, 8]. Свойства указанного сегнетомягкого пьезоэлектрического материала, полученные на контрольных керамических элементах различными способами спекания, представлены в таблице 1. Помимо традиционного спекания в камерной печи (АТМ), контрольные керамические элементы спекались методом горячего прессования (ГП), что способствовало повышению основных параметров на 2 – 10%.

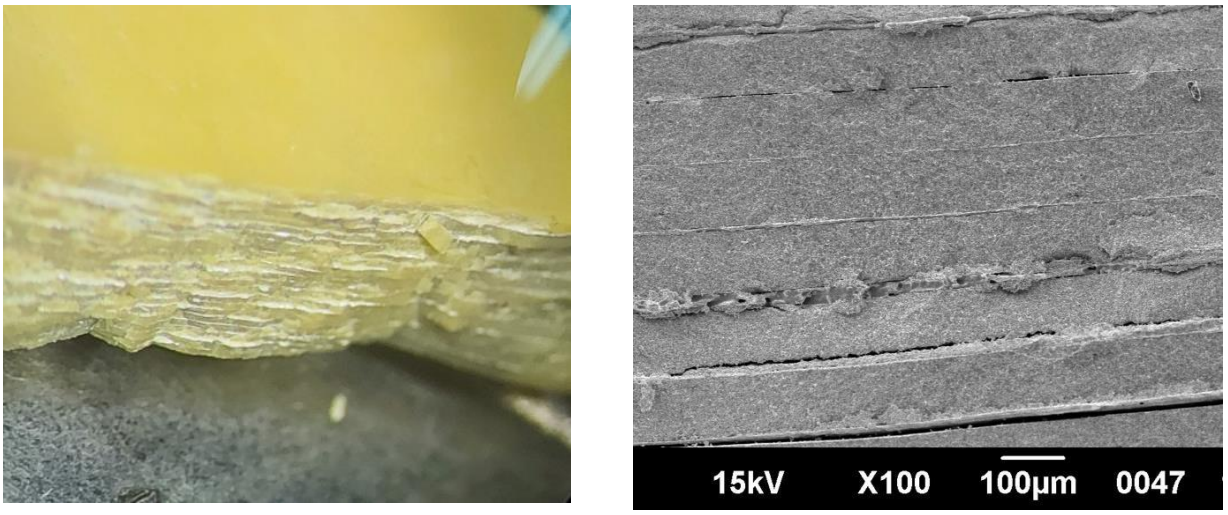
Таблица 1.

Свойства разработанного сегнетомягкого пьезоэлектрического материала

Методы спекания	**Электрофизические параметры**						
	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	tgδ, %	d_{31}, пКл/Н	d_{33}, пКл/Н	Q_m	V_1^E, м/с	$\rho_{ср}$, г/см^3
АТМ	3100	2,1	240	690	60	2800	7,6
ГП	3460	2,0	260	700	62	2750	7,7

С целью апробации на пригодность из пьезоэлектрического материала были изготовлены пакетные многослойные актюаторы

(рис. 1А). Актюаторы содержали от 20 – до 40 тонких слоев пьезокерамической плёнки, между которыми наносилась формирующая электрод паста. Процесс спекания многослойных актюаторов проводился на установке горячего прессования при температуре 980°С, что позволило использовать формирующую электроды пасту на основе Ag без добавок Pt и Pd, тем самым сокращая себестоимость будущих изделий.



А Б

Рис. 1 – Структура многослойного актюатора

На снимке микроструктуры полученного актюатора отчётливо продемонстрировано несовершенство граничащих слоёв керамика-электрод-керамика (рис. 1Б). Это объясняется несовершенством технологических режимов изготовления, требующих проработки и коррекции. Однако, изготовленные многослойные актюаторы, несмотря на имеющиеся недостатки, оказались работоспособными. Максимальное перемещение многослойного актюатора при управляющем напряжении 100 В составило 1,5 мкм.

Выводы

В результате исследования установлено, что полученный многокомпонентный сегнетомягкий пьезокерамический материал, благодаря сочетанию высокой эффективности электромеханического преобразования и низким температурам спекания (до 1000°С), отлично подходит для изготовления многослойных актюаторов. Экспериментально изготовленные из указанного пье-

зокерамического материала многослойные актюаторы продемонстрировали высокие эксплуатационные показатели, однако технология их изготовления требует доработки. Изготовление многослойных актюаторов их указанного пьезокерамического материала методом горячего прессования способствует оптимизации основных параметров и существенному снижению себестоимости изделий.

Список литературы

1. Uchino K., Takahashi S. Multilayer ceramic actuators (1996) Current Opinion in Solid State and Materials Science., 1 (5), pp. 698-705.
2. Wang Y. Biomimetic moving mechanism with multilayer piezoelectric materials (2018) ACTUATOR 2018 - 16th International Conference., pp. 412-415.
3. Wang Q., Li F. A low-working-field (2 kV/mm), large-strain (>0.5%) piezoelectric multilayer actuator based on periodically orthogonal poled PZT ceramics (2018) Sensors and Actuators, A: Physical.,272, pp. 212-216.
4. Gromada M., Biglar M., Trzepiecinski T., Stachowicz F. Application of BaTIO3 perovskite material for piezoelectric multilayer actuators (2018) Lecture Notes in Electrical Engineering., 428, pp. 29-35.
1. Третьяков Ю. Д. Твердофазные реакции / Ю. Д. Третьяков. - М.: Химия, 1978. - 360 с.
2. Кингери У.Д. Введение в керамику / У.Д. Кингери. - М.: Изд. лит. по строительству, 1967. - 500с.
3. Мараховский М.А. Разработка способов повышения эффективности пьезокерамических материалов для устройств электронной техники. – Новочеркасск, автореферат диссертации., 2014. – 22 с.
4. Мараховский М.А., Мараховский В.А., Мирющенко Э.А., Панич Е.А. Исследование возможности создания новых полифазных пьезоматериалов для гидроакустических преобразователей. Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. 2018., С. 616-619.

Влияние технологических приемов на электрофизические параметры пьезокерамического материала ПКП -33

П.А. Харченко, А.В. Нагаенко, А.В. Нагаенко
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

В настоящее время пьезокерамика на основе титаната цирконата свинца широко используется в качестве исполнительных механизмов датчиков в интеллектуальных структурах и информационно-измерительных системах. В связи с чем, считается актуальным изучение влияния технологических приемов на электрофизические параметры пьезокерамического материала ПКП-33.

На начальном этапе был проведен синтез материала ПКП-33 методом твердофазных реакций. Исходным сырьем для получения требуемого материала являлись: Оксид свинца (2) PbO (чда), Оксид циркония (4) ZrO2 (чда), Оксид титана (4) TiO2 (осч 7-3), Оксид ниобия (5) Nb2O5 (чда), Оксид цинка (4) ZnO2 (чда), Оксид марганца (4) Mn02 (ч). После расчета шихты материала ПКП-33 было осуществлено её смешивание в планетарной мельнице. Полученный на выходе порошок был помещен в никелевый капсуль, после чего осуществлялся синтез материала. Последним шагом на данном этапе был помол в планетарной мельнице, после чего для установления фазовой картины и оценки полноты прохождения синтеза был проведен рентгенофазовый анализ полученного материала.

На следующем этапе из синтезированного материала ПКП-33 выполнялось оформление полуфабрикатов методом прессования с помощью гидравлического пресса. Из порошка материала были созданы заготовки в виде диска 10 мм в диаметре и 2 мм высотой.

Спекание заготовок было проведено двумя способами. В первом случае использовался классический метод, включающий в себя, последовательное прессование и спекание. Во втором случае использовался метод горячего прессования. После спекания обоими методами у полученных образцов исследовалась микроструктура.

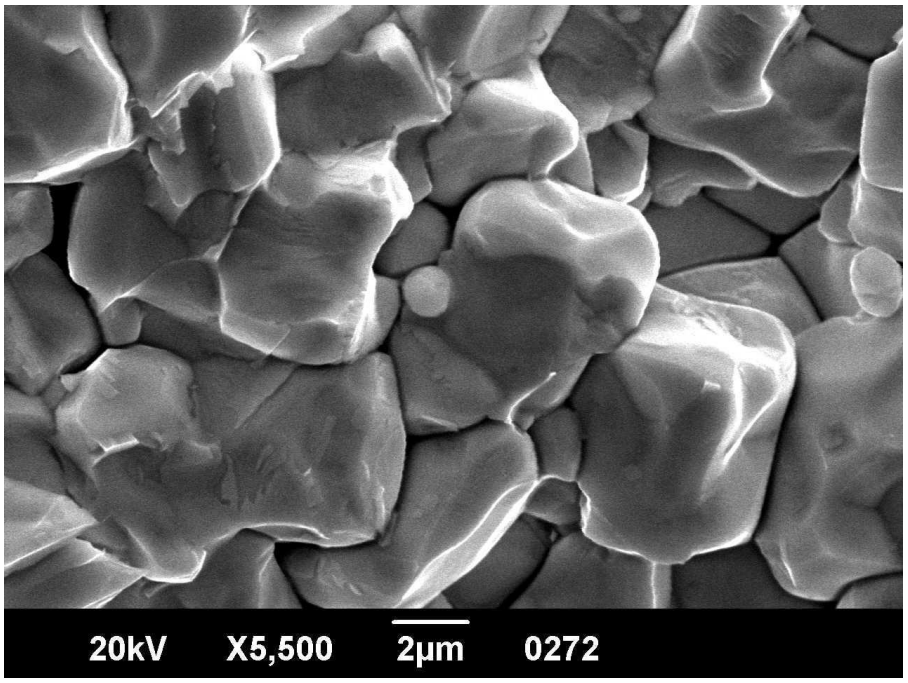


Рис. 1 – Микроструктура керамики ПКП-33, полученной первым способом

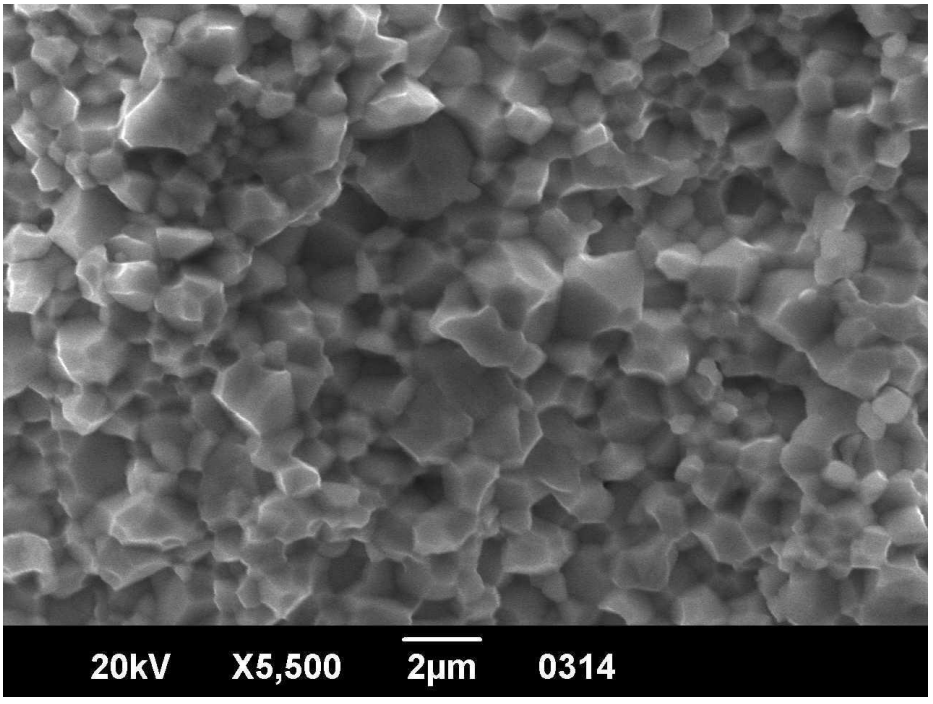


Рис. 2 – Микроструктура керамики ПКП-33, полученной вторым способом

Анализ образцов с помощью атомно-силовой микроскопии показал, что керамика, сделанная методом горячего прессования, имеет мелкозернистую структуру, что обусловлено подавлением процессов вторичной рекристаллизацией.

Механическая обработка полученных элементов до заданных размеров (Ø10х1мм) была проведена методом шлифования

на плоскошлифовальном станке, после чего на образцы был нанесен электрод методом вжигания серебросодержащей пасты.

Специфические свойства сегнетоэлектриков проявляются лишь в определенном диапазоне температур. В процессе нагревания выше некоторой температуры происходит распад доменной структуры, и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. Переход сегнетоэлектрика в параэлектрическое состояние сопровождается резким уменьшением tgδ, поскольку исчезают потери на гистерезис. Температура такого фазового перехода получила название сегнетоэлектрической точки Кюри. В точке Кюри спонтанная поляризованность исчезает, а диэлектрическая проницаемость достигает своего максимального значения. Температура Кюри пьезокерамического материала ПКП-33 составляет Тк ≈ 315°С.

С целью оценки пьезоактивности и уточнения поляризационных полей пьезокерамического материала, изготовленного методом горячего прессования и классическим методом спекания пьезокерамики, на установке «ПЕТЛЯ» были исследованы петли их диэлектрического гистерезиса. Образцы, изготовленные методом горячего прессования, обладают более высокими значениями поляризации, проявляя при этом большую «сегнетожесткость».

После поляризации образцов, полученных обоими методами, были проведены исследования электрофизических параметров пьезокерамических элементов. В ходе испытаний были выявлены средние электрофизические показатели, для двух технологий изготовления.

Исследуемый параметр	КМС	МГП
Относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	1453	994
Поперечный пьезомодуль, пКл/Н	178	179
Скорость звука, м/с	2732	3736
Механическая добротность	1021	1038

Рис. 3 – Результаты исследования

Как итог, пьезокерамический материал, изготовленный методом горячего прессования (МГП), обладает более высокими электрофизическими параметрами, чем пьезокерамический материал, изготовленный классическим методом спекания (КМС). В связи с чем, можно считать, спекание керамики с помощью метода горячего прессования наиболее оптимальным, когда важны высокие ЭФП пьезокерамического материала.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы было показано, что:

– электрофизические свойства материала существенно зависят от технологии получения и температуры спекания образцов;

– варьированием характеристик процесса спекания позволяет в широких пределах изменять значения их ЭФП;

– увеличение размеров зерна керамических образцов способствует снижению ЭФП;

– наилучшей совокупностью ЭФП и МП обладает керамика, приготовленная методом горячего прессования

Список литературы

1. Wersing, W. In Piezoelectric Materials in Devices / Setter, N.; (Eds.) ISBN 2-9700346-0-3; Ceramic Laboratory, EPFL Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 2002, 29-66.

2. R.S. Indeck, M.W. Muller, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology / 2002, 255-271.

3. Saito Y, Takao H, Tani T, Nonoyama T, Takatori K, Homma T, et al. / Lead-free piezoceramics. Nature, 2004, 84 – 87.

4. Jaffe, B; Cook, WR; Jaffe, H. Piezoelectric ceramics / ISBN 0-12-379550-8, Academic Press: New York, NY, 1971, 136-152.

5. Вул Б. М. Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проводимостью, «Электричество» / №3, 12, 1946.

6. Вул Б. М., «Сегнетоэлектричество» / Изд-во АН СССР, 1956.

Исследование свойств пьезокерамики системы ЦТС, используемой при производстве пьезоэлектрических генераторов

Е. Е. Куликов, А.В. Нагаенко, Н.А. Гирагосова
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

В последние годы получило развитие новое направление пьезоэлектрического приборостроения, связанное с созданием пьезоэлектрических преобразователей для генерации электрической энергии за счет использования механической энергии.

В связи с тем, что комплексные исследования параметров пьезокерамических материалов, используемых при производстве пьезогенераторов в литературе практически не освещены, а представленные сведения носят разрозненный характер, то актуальным представляется детальное изучение характеристик различных материалов с целью выбора их оптимальных значений при применении в пьезогенераторах.

Основные технологические операции процесса получения пьезокерамических образцов представлены на рис. 1.

Рис.1. Базовый технологический процесс изготовления пьезокерамики [1]

Все процессы, сказываются на свойствах изделий. Следует также отметить, что использование материала с определенными

свойствами еще не означает, что любые изделия из него будут обладать теми же свойствами, поэтому технология должна уточняться применительно к каждому виду изделия, в зависимости от его размера и формы.

Для изготовления макета пьезогенератора, схема которого приведена на рис. 2, были изготовлены пьезоэлементы в виде шайбы с размерами 14,5х4х1мм. Форма пьезоэлемента обусловлен необходимостью закрепления пакета пьезоэлементов в упругом подвесе, обеспечивающем его предварительное нагружение.

Для коммутации в пакет из исследуемых материалов были изготовлены пьезоэлементы в виде шайбы. Далее сборка пьезоэлектрических преобразователей в пакет осуществлялась путем склеивания с помощью токопроводящего клея на основе эпоксидной смолы с металлическим наполнителем.

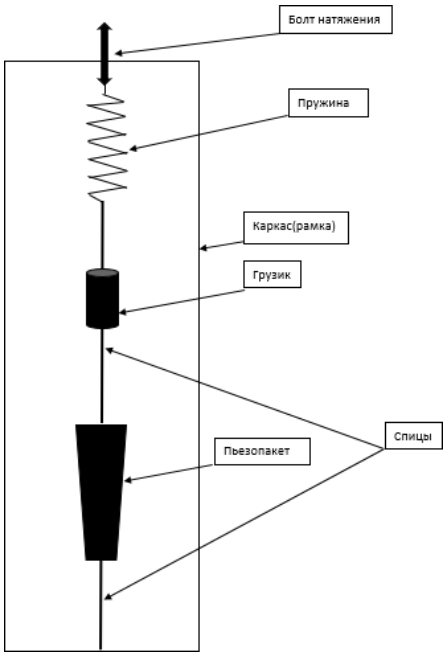


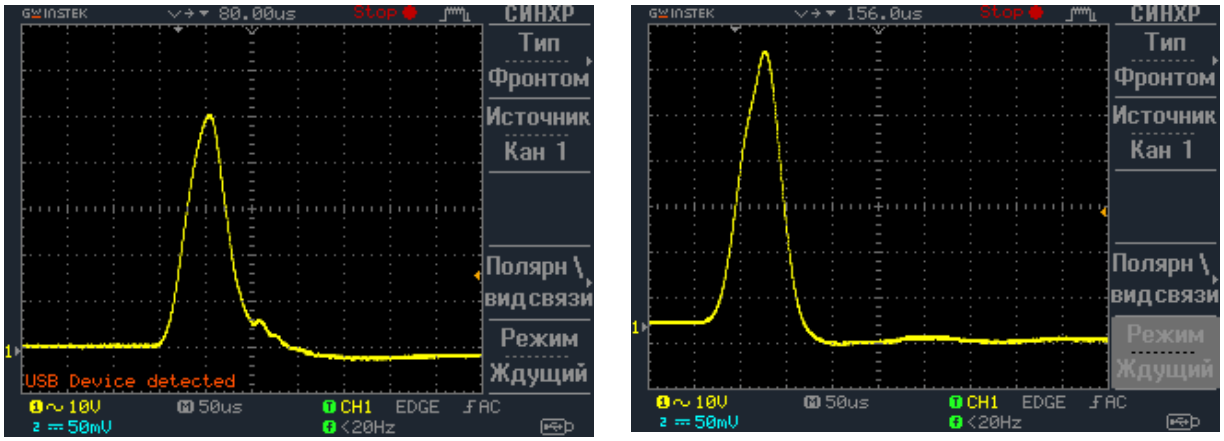
Рис.2. – Принципиальная схема макета пьезогенератора.

После нанесения токопроводящего клея на поверхность двух соседних пьезоэлементов между ними располагалась металлическая (латунная) пластика, которая служит токовыводом для удобства их коммутирования в пакете. Для обеспечения жесткого акустического и механического контакта, а также центровки элементов во время склеивания они стягивались при помощи центрального болта, проходящим через отверстия в шайбах [2].

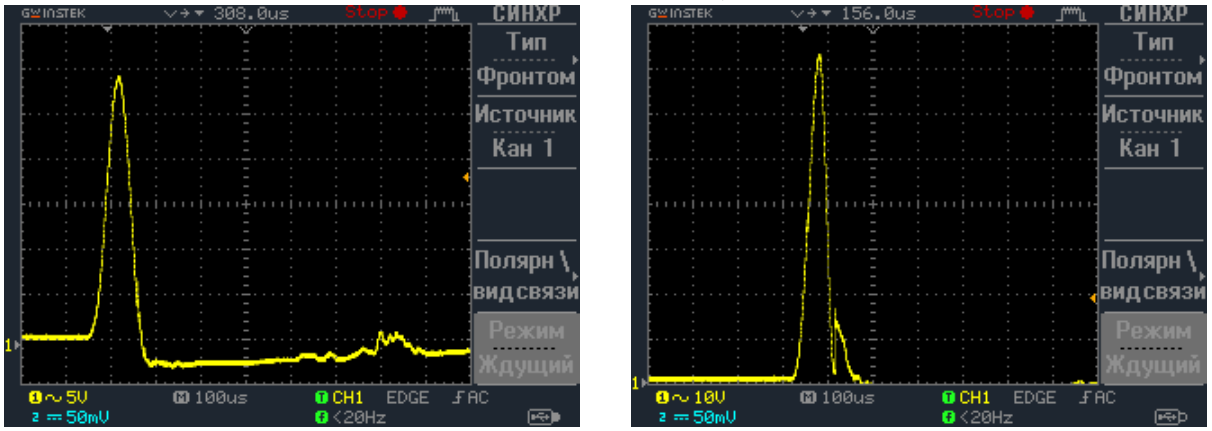
Принцип работы заключается в том, что на пьезоэлемент прикладывается переменное механическое напряжение, которое в результате пьезоэффекта генерирует на электродах заряд определенной величины [3].

Для проведения эксперимента между пружиной и корпусом пьезогенератора располагалась инерционная масса, выполненная в виде металлического кольца с различным весом. Инерционная масса ударным воздействием с определенной силой генерирует в пьезокерамическом пакете напряжение

Инерционная масса ударным воздействием с силой 0,85 и 1,44 Н генерирует в пьезокерамическом пакете напряжение, которое было определено по средством подключения к макету осциллографа GDS-71042 рис. 3.



Сила воздействия 0,85 Н



Сила воздействия 1,44 Н

Рис.3. – Генерируемое выходное напряжение пьезопакетом из материала ЦТСЦНН-1 слева и ЦТС-Р справа *Одна клетка ~ 10В.

Из представленных на рис. 3. данных видно, что выходное напряжение, генерируемое пакетом зависит от прикладываемого

усилия и для пьзокерамики на основе материала ЦТСЦНН-1 составляет $U_{вых}$=50 В при 0,85 Н и $U_{вых}$=60 В при 1,44 Н, а из материала ЦТС-Р $U_{вых}$=64 и 73 В соответственно.

Полученный результат согласуется с данными, полученными при исследовании поляризационных характеристик пьезоэлементов, где материал ЦТС-Р показал более высокие значения величины остаточной поляризации по сравнению с материалом ЦТСЦНН-1. При этом следует отметить, что оба материала могут быть использованы при производстве пьезокерамических генераторов.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие ***выводы***: изменение величины внешней механической нагрузки, приводит к изменению выходной характеристики пьезогенератора; исследуемые пьезокерамические материалы ЦТСЦНН-1 и ЦТС-Р могут быть использованы для производства пьезокерамических генераторов.

Список литературы.

1. Нестеров А.А. Технологии синтеза порошков сегнетоэлектрических фаз: учебное пособие / А.А. Нестеров, А.Е. Панич. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 226 с.

2. Панич А.Е. Физика и технология пьезокерамических материалов: учебное пособие / А.Е. Панич, Т.Г. Левина. - Ростов н/Д, 2002. – 45с.

Нагаенко А.В. Методы повышения эффективности пьезоэлектрической керамики / А.В. Нагаенко // Сборник трудов Четвертого Международного молодежного симпозиума «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов» - Туапсе 2015.

Элементная база твердотельных пьезокерамических гироскопов

М.А. Гончаров, А.В. Нагаенко
Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

В данной работе проведён анализ возможности использования пьезокерамических изделий из сегнетожёстких составов ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35 в качестве элементной базы для современных типов конструкций твердотельных пьезокерамических гироскопов. Проведено исследование влияния температурного воздействия на электрофизические параметры пьезокерамических изделий из материалов ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35. Выявлены границы изменения параметров изделий при воздействии повышенных и пониженных температур.

Введение

В связи с последними наблюдениями в области пьезоэлектрического приборостроения становится очевидным тот факт, что устройства, основанные на микроэлектронной модели, проходят фазу резкого усложнения, обусловленную необходимостью содержания в себе целого комплекса технологичных решений, куда входят методы записи, хранения и обработки информации. Это дало толчок к усилению внимания к многофункциональным материалам с сегнетоэлектрическими, сегнетоэластическими, ферромагнитными и иными свойствами.

Среди материалов, обладающих данными свойствами, наиболее перспективными являются многоэлементные композиции, которые обладают большим разнообразием электрофизических параметров (ЭФП), что в итоге делает пьезокерамические материалы наиболее практически значимыми ввиду возможности эффективного управления их характеристиками с помощью разнообразных внешних воздействий. Такую возможность можно осуществить из-за наличия сегнетоэлектрических фазовых переходов (ФП), которые приводят к возникновению структуры доменов,

процесс становления которой происходит на различных этапах создания пьезокерамики.[1-3] Современными требованиями при разработке инерциальных чувствительных элементов для датчиков угловой скорости является: малая масса и габариты, низкие себестоимость и энергопотребление и достаточно высокая надёжность. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют пьезоэлектрические гироскопы.

Пьезоэлектрические материалы в конструкциях резонаторов одновременно служат как для возбуждения колебаний за счет обратного пьезоэффекта, так и для снятия информации за счет прямого пьезоэффекта. При этом упрощается конструкция гироскопа, снижается масса и габариты. Кроме того, пьезокерамика имеет высокий коэффициент преобразования как в режиме прямого, так и обратного пьезоэффекта.

Недостаток таких гироскопов – нестабильность параметров при изменении температуры, связанная с температурной нестабильностью пьезокерамики. Справиться с данным недостатком можно, используя новые, более стабильные материалы. Таким образом, с целью повышения эффективности создания новой современной элементной базы для твердотельных пьезокерамических гироскопов совершенствуются и разрабатываются технологии получения более стабильных пьезоматериалов и элементов на их основе.

В связи с вышесказанным, ***актуальными*** представляются исследования, которые направлены на выявление зависимости ЭФП пьезокерамических материалов многокомпонентных твёрдых растворов от температурного воздействии, а также оценка стабильности их параметров для использования в твердотельных пьезокерамических гироскопах, что и стало основной ***целью*** настоящей работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие ***задачи***:

1. выбрать пьезоматериалы характеризующиеся высокими значениями коэффициента электромеханической связи (K_{ef}), механической добротностью, повышенной температурной стабильно-

стью, а также средней или высокой относительной диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$) и низкими значения тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ);

2. провести комплексные исследования ЭФП пьезокерамических образцов, полученных из разных материалов, при температурном воздействии;

3. выбрать на основе полученных данных оптимальный материал для изготовления элементной базы, с целью практического применения в твердотельных пьезокерамических гироскопах и другой электронной технике.

Модельные объекты и методики их исследования

Для решения задач, выполняемых в рамках представляемой работы, в качестве модельных объектов использовались пьезокерамические материалы ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35.

Методы проведения испытаний температурного воздействия

Оценка необратимых изменений параметров пьезокерамических элементов осуществлялась по следующей методике:

1. образцы помещаются в термокамеру, в которой устанавливают повышенную температуру среды, соответствующую плюс (180 ± 2) ^{0}C и выдерживают в течение 30 минут;

2. по истечении 30 минут образцы извлекаются из термокамеры и выдерживают в нормальных климатических условиях в течение суток;

3. по истечению суток оцениваются параметры пьезоэлементов;

4. оценка уходов после воздействия повышенной температуры проводится по формуле:

$$\Delta P = \frac{P' - P(T)}{P'} \times 100\ \%$$

где P' – значение параметра (C_0, $tg\delta$), измеренное до воздействия температуры;

P(T) – значение параметра (C_0, $tg\delta$), измеренное после воздействия температуры.

Испытаниям на воздействие пониженной температурой проводили аналогично на пьезоэлементах, предварительно подвергшихся воздействию повышенной температуры.

Образцы помещали в термокамеру и выдерживали в ней при температуре минус (60 ± 2)^{0}С в течение 30 минут. О истечении заданного времени извлекают из термокамеры и выдерживают в нормальных климатических условиях в течение суток. Через сутки, оценивали параметры пьезоэлементов C_0 и $tg\delta$ в нормальных условиях.

Оценку уходов после воздействия пониженной температуры проводили по формуле (4), где в качестве исходных при расчетах приняты значения, полученные в ходе первичного измерения ЭФП полученных изделий при комнатной температуре.

Оценка обратимых изменений параметров пьезокерамических элементов осуществлялась по следующей методике:

1. образцы помещаются в термокамеру, в которой устанавливают температуру среды, соответствующую минус 30 ^{0}С и выдерживают в течение 15 минут;

2. по истечении 15 минут проводят измерения параметров внутри термокамеры;

3. в термокамере поднимают температуру среды на 10^{0}С выше;

4. пункты 1–3 повторяют, пока температура в термокамере не достигнет 50^{0}С, за тем проводится последнее измерение и образцы вынимаются из термокамеры.

5. оценка уходов после воздействия повышенной температуры проводится по формуле 4.

Измерения ЭФП пьезокерамических материалов

Оценка величин ЭФП изготовленных материалов проводилась в соответствии с ОСТ 110444-87. Величину статической электрической емкости C_0 поляризованных образцов и тангенс угла их диэлектрических потерь (tgδ) определяли мостовым методом, а значения относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$), пьезомодуля - d_{31}, механической добротности ($Q_м$), скорости звука (V^E_1) динамическими методами при комнатной

температуре на установке «ЦЕНЗУРКА-М» производства НКТБ «Пьезоприбор».

Динамический метод определения ЭФП и МП пьезоэлементов требует первичных измерений в трех областях разных частот: области низких частот (100 Гц или 1 кГц), области частот механического резонанса, области частот электромеханического резонанса (антирезонанса), по которым проводится расчет.

При динамическом методе измерения следующие значения ряда ЭФП рассчитывались по формулам:

$$\frac{\varepsilon_{33}^{T}}{\varepsilon_0} = \frac{0{,}1129 C_0 h}{S_э}$$

где $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ - относительная диэлектрическая проницаемость

h - расстояние между электродами, м

$S_э$ - площадь поверхности электрода, м^2

C_0 - статическая электрическая емкость, пФ

$$d_{31} = \frac{A10^{-6}}{\sqrt{\rho f_r D}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^{T}}{\varepsilon_0} \frac{\delta_r}{1 + B\delta_r}}$$

где d_{31} - пьезомодуль

ρ - плотность ПКМ, кг/м^3

$\varepsilon_{33}{}^{T}/\varepsilon_0$- относительная диэлектрическая проницаемость

f_r - частота резонанса первого (основного) обертона, Гц

δ_r - относительный резонансный промежуток ($f_r = \frac{f_a - f_r}{f_r}$)

f_a - частота антирезонанса первого (основного) обертона, Гц

D - диаметр пьезоэлемента, м

A=1,91 (для диска 20х1 мм)

B=1,45 (для диска 20х1 мм)

$$\upsilon_1^{E} = \frac{2Df_r}{F}$$

Где υ_1^{E} - скорость звука

f_r - частота резонанса первого (основного) обертона, Гц

D - диаметр пьезоэлемента, м

F - справочный коэффициент, определяемый по ОСТ 11044-87

$$Q_m = \frac{1 + 1{,}5\delta_r}{4\pi f_r C_0 R_r \delta_r}$$

Где Q_m - механическая добротность

$$R_r = R_н \left(\frac{U_{вх}}{U_{вых}} - 1\right)$$

Где R_r - сопротивление КПЭ на резонансной частоте первого (основного) обертона, определенное с погрешностью не более ±10Ом

$R_н$ - сопротивление нагрузки при измерении f_r, Ом

$U_{вх}$ - напряжение на входе устройства, мВ

$U_{вых}$ - напряжение на выходе устройства, мВ

δ_r - относительный резонансный промежуток ($f_r = \frac{f_a - f_r}{f_r}$)

f_r - частота резонанса первого (основного) обертона, Гц

f_a - частота антирезонанса первого (основного) обертона, Гц

C_0 - статическая электрическая емкость, пФ

$$k_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - \sigma^2}{2(1+\sigma)}\left(1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}\right)}$$

Где k_p - планарный коэффициент электромеханической связи

σ - коэффициент Пуассона

η – наименьший положительный корень частотного уравнения

f_r – частота резонанса первого (основного) обертона, Гц

f_a – частота антирезонанса первого (основного) обертона, Гц.

Измерение значения пьезомодуля d_{33} осуществлялось квазистатическим методом на установке «Piezo d_{33} Test System» (США). При квазистатическом методе измерения d_{33} пьезоэлемент (ПЭ) подвергается действию переменной механической силы с частотой намного ниже его собственных резонансных частот. Одновременно на пьезоэлемент действует одноосная статическая нагрузка. Прибор измерят заряд на электродах элемента, подвергающегося дозированному механическому воздействию.

Теоретическая модель волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором, работающего в режиме датчика угловой скорости

В качестве основы для разработки элементной базы была взята модель волнового твердотельного гироскопа (ВТГ)[4]. Конструкция ВТГ приведена на рис. 1, а. Резонатор 1 с пьезоэлементами 3, наклеенными на донышко, образуют чувствительный элемент, который с помощью узла крепления 2 смонтирован на корпусе 5, закрывается кожухом 6. Герметичность внутренней полости достигается шовной сваркой по периметру стыка между корпусом и кожухом, а также применением гермовыводов 4, обеспечивающих связь пьезоэлементов с блоками электроники. Пьезоэлементы выполняют функции датчиков перемещений и силы (прямой и обратный пьезоэффект).

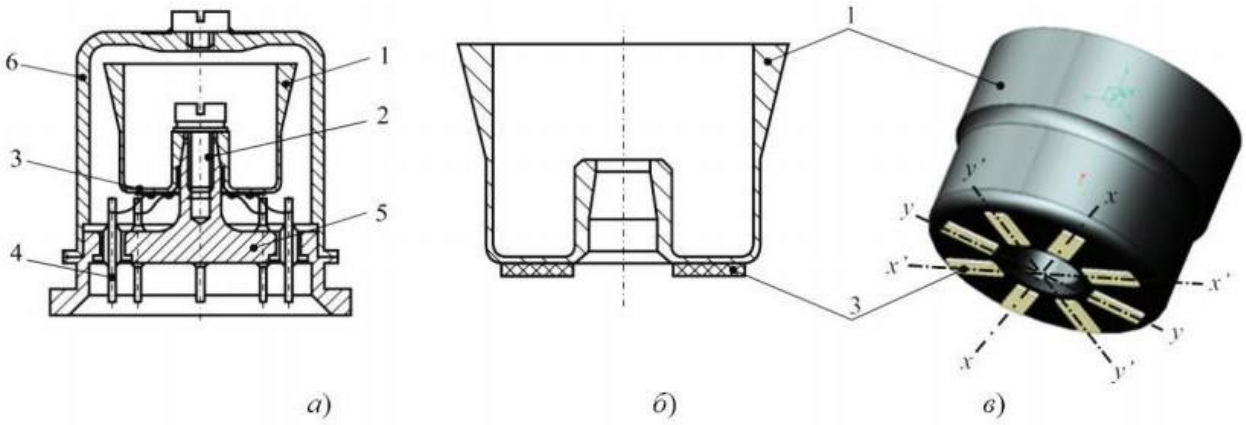


Рис. 1 – ВТГ с металлическим резонатором: а – ВТГ в сборе (фронтальный разрез); б – резонатор ВТГ (фронтальный разрез);
в – резонатор ВТГ (объемная модель).
1 – резонатор; 2 – узел крепления; 3 – пьезоэлемент; 4 – гермовывод;
5 – основание (корпус); 6 – крышка (кожух)

Разработка и исследование элементной базы

Особенностью изделий, использованных для проведения данной исследовательской работы, стали малые габаритные размеры: 6 мм х 1,8 мм х 0,2 мм. Такие значения размеров пьезокерамических элементов (ПКЭ) обусловлены требованиями модели: они позволяют управлять элементами низкими напряжениями, а также легче крепятся к металлической поверхности и имеют

малый вес. Итоговый размер пьезокерамических элементов изображен на рис. 2.

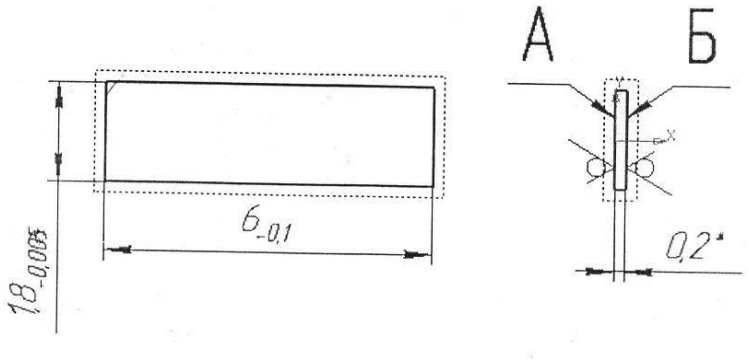


Рис. 2 – Габаритные размеры пьезоэлементов

Важными параметрами пьезоматериалов и конечных изделий из них для твердотельных пьезоэлектрических гироскопов являются: ёмкость С, продольный пьезомодуль d_{33}, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, коэффициент электромеханической связи k_{eff}.

В связи с этим была сформулирована технологическая задача, направленная на установление границ варьирования электрофизических параметров изделий из материалов ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35 при температурном воздействии, а также выбор материала для последующего применения в качестве элементной базы твердотельных гироскопов.

Электрофизические параметры полученных пьезокерамических элементов динамическими методами при комнатной температуре определялись на установке «ЦЕНЗУРКА-М». Средние значения ЭФП полученных образцов представленны в таблице 1.

Таблица 1.

ЭФП полученных пьезоактивных материалов

Пьезоактивный материал	$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	d31, пКл/Н	tg %	V1E м/с	Q	$k^{2ef}Q\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0 \cdot 10^3$
ПКП-31	1343	138	0,49	3047	1311	382
ПКП-33	918	80	0,56	2938	859	183
ПКП-35	1388	127	0,45	3156	596	167

Исследование необратимых изменений характеристик пьезоэлементов при температурном воздействии

Оценку необратимых температурных изменений (наблюдаемых после прекращения воздействия и периода релаксации) параметров пьезоматериалов осуществлялась согласно методике, описанной в главе 2.5 данной работы. Пьезоэлементы, использующиеся в датчиках крена на основе твердотельного волнового гироскопа, в соответствии с исходными данными теоритической модели гироскопа должны быть работоспособны после воздействия повышенной (плюс 180°С) и пониженной (мину 60°С) температур и изменение значений C_0 и tgδ после температурного воздействия не должны превышать 15%. Температурные диапазоны необратимых изменений параметров основываются на требованиях, предъявляемых к этапу изготовления и конструкции ВТГ. При больших значениях температурных изменений процесс калибровки и настройки сильно затруднятся или вовсе становится невозможным без внесения изменений в исходную конструкцию. С этой целью было оценено влияние повышенной и пониженной температур на свойства пьезоэлементов из материалов ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35.

Результаты необратимых изменений электрофизических параметров (C_0 и tgδ) элементов представлены на рис. 3, 4, 5 и 6.

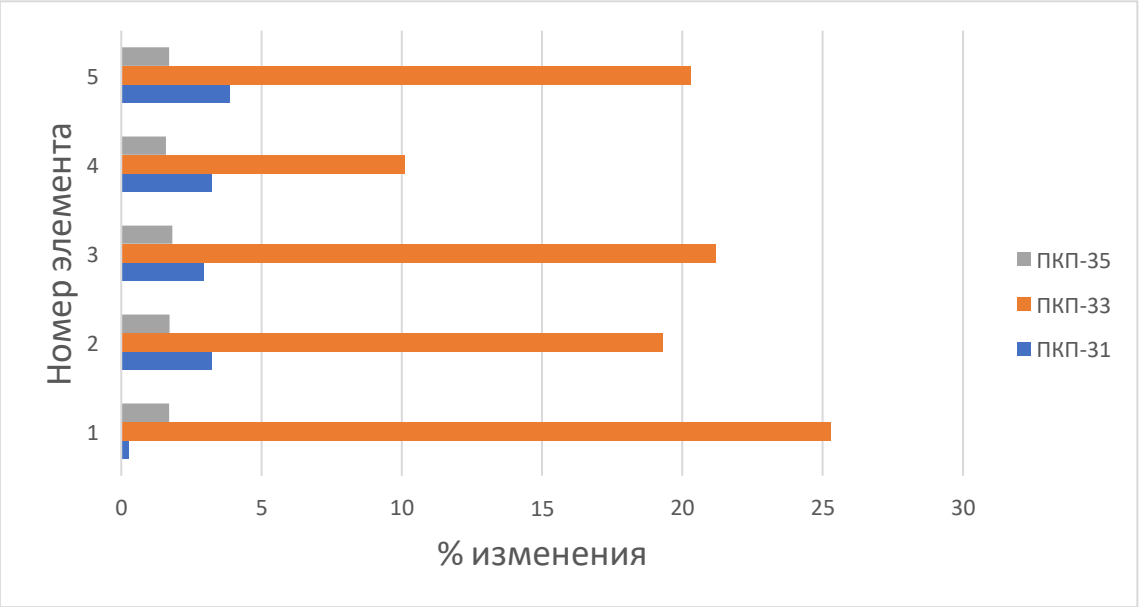


Рис. 3 – Сравнение необратимых изменений ёмкости ПКЭ от воздействия повышенной температуры

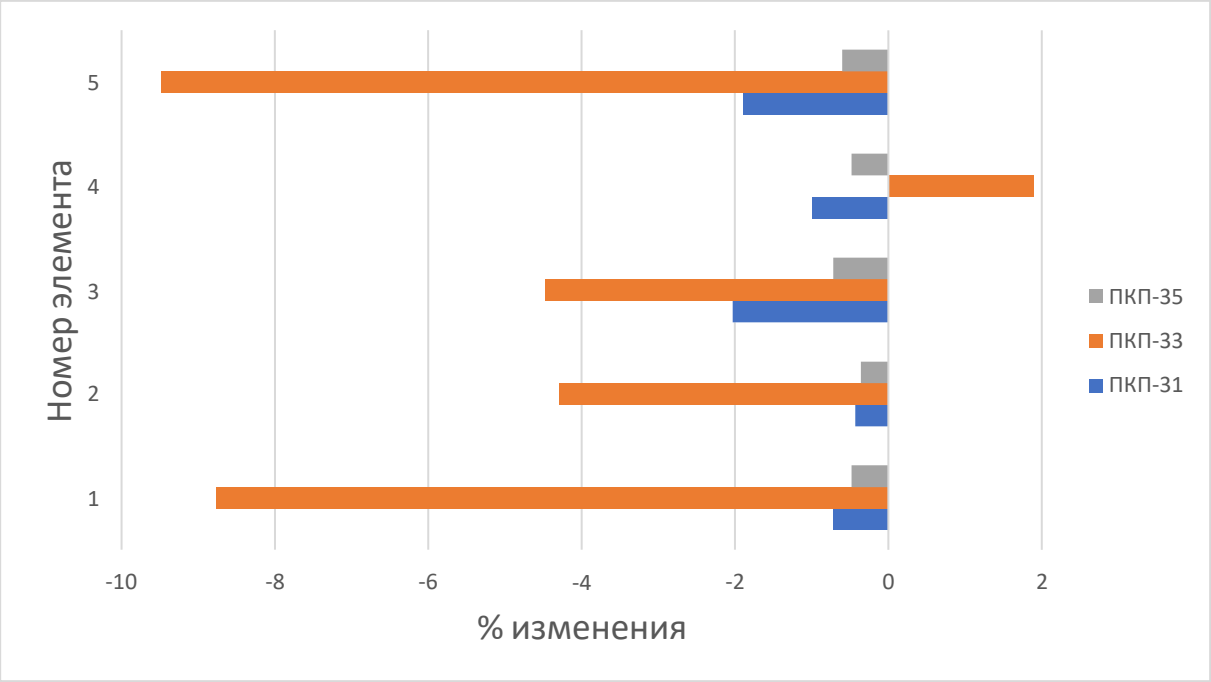


Рис. 4 – Сравнение необратимых изменений ёмкости ПКЭ от воздействия пониженной температуры

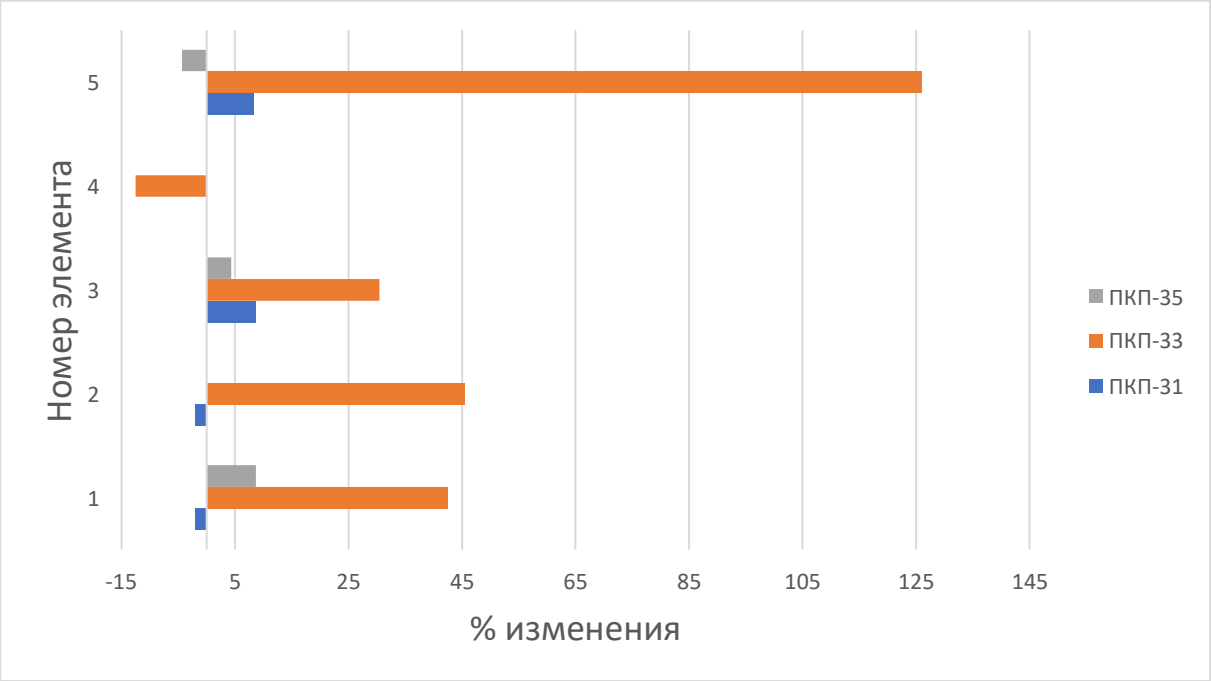


Рис. 5 – Сравнение необратимых изменений тангенса угла диэлектрических потерь ПКЭ от воздействия повышенной температуры

Указанные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Пьезоэлементы из материалов ПКП-31 и ПКП-35 соответствуют предъявляемым требованиям к температурным изменениям C_0 и $tg\delta$ и не превышают 15%;

2. Для пьезоэлементов из материала ПКП-33 изменение электрофизических параметров после температурного воздействия в рамках описанной методики исследования превышают предельно допустимые значения (более 15%), однако после 5 суток выдержки в нормальных климатических условиях параметры пьезоэлементов (C_0 и $tg\delta$) близки к исходным, т. е. пьезоматериал обладает более длительным временем релаксации;

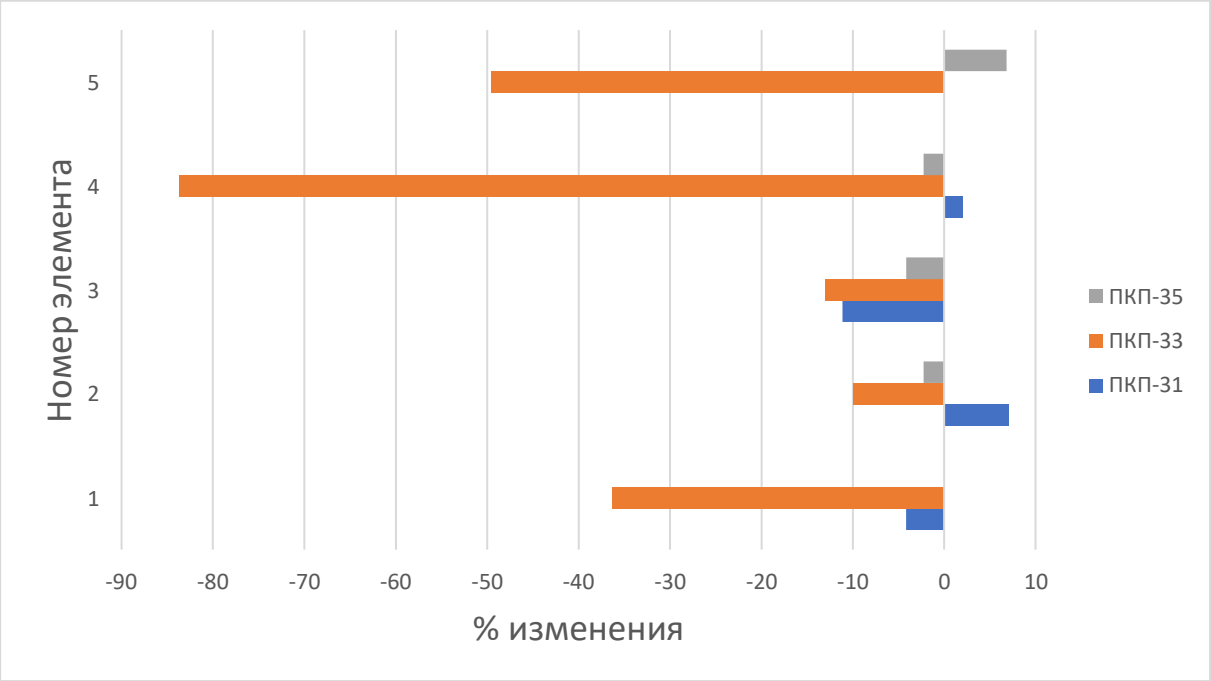


Рис. 6 – Сравнение необратимых изменений тангенса угла диэлектрических потерь ПКЭ от воздействия пониженной температуры

Исследование обратимых изменений характеристик пьезоэлементов при температурном воздействии

Оценку обратимых температурных изменений (наблюдаемых непосредственно в момент воздействия, а после прекращения воздействия и периода релаксации восстанавливаются до исходных значений) параметров пьезоматериалов осуществлялась согласно методикам. Для установления обратимых изменений ПКЭ помещались в камеру, где температура изменялась от -30°С до +50°С. Каждые 10°С происходило измерение электрофизических параметров. Точность работы твердотельных пьезоэлектрических гироскопов прямо пропорционально зависит от стабильности параметров пьезокерамических элементов, входящих в их кон-

струкцию. В свою очередь стабильность параметров пьезокерамических изделий определяется обратимыми изменениями при непосредственном воздействии повышенной и пониженной температур. С этой целью было оценено влияние повышенной и пониженной температур на обратимые изменения свойств пьезоэлементов из материалов ПКП-31, ПКП-33 и ПКП-35. Результаты обратимых изменений электрофизических параметров (C0, k, D_{31} и tgδ) элементов представлены на рис. 7 и 8.

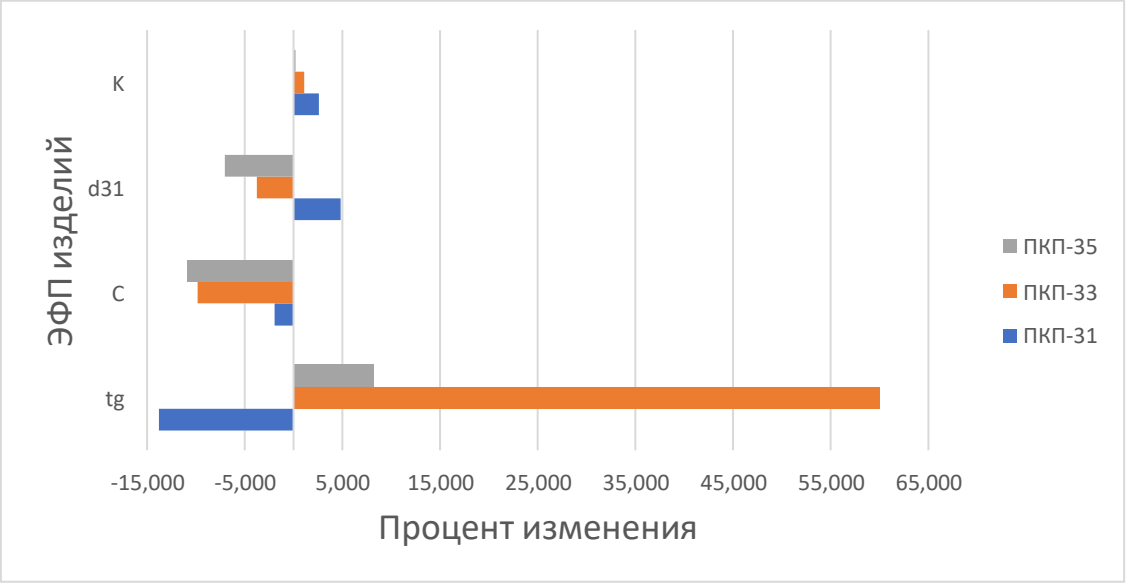


Рис. 7 – Изменения ЭФП элементов при минус 30°С в процентах для изделий из материалов ПКП-31, ПКП-33, ПКП-35 относительно показателей, полученных при 20°С

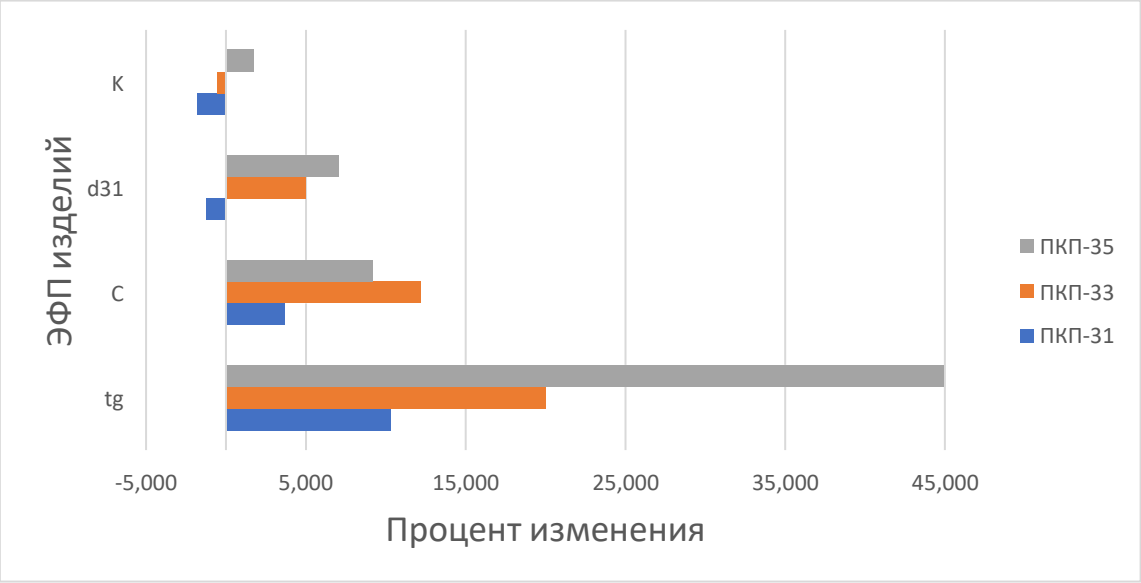


Рис. 8 – Изменения ЭФП элементов при 50°С в процентах для изделий из материалов ПКП-31, ПКП-33, ПКП-35 относительно показателей, полученных при 20°С

Указанные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Пьезоэлементы из материала ПКП-33 обладают большими значениями обратимых изменений *tgδ* при отрицательных температурах;

2. Пьезоэлементы из материала ПКП-35 обладают большими значениями обратимых изменений *tgδ* при повышенных температурах;

3. Пьезоэлементы из материала ПКП-31 обладают наименьшими значениями обратимых изменений *tgδ* и *C* во всём измеренном диапазоне;

Большие значения обратимых изменений изделий из материалов ПКП-33 и ПКП-35 могут негативно сказаться на этапе калибровки твердотельных пьезокерамических гироскопов, а также на итоговой точности приборов. Изделия из материала ПКП-31 обладают не только более стабильными обратимыми изменениями, но и более высокими показателями КПД ($k^2_{ij}Q$) и удельной мощности ($k^2_{ij}Q\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$) (таблица 1), что делает их наиболее предпочтительным выбором в качестве элементной базы для твердотельных пьезокерамических гироскопов.

Список литературы

1. Прилипко Ю.С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии / Ю.С. Прилипко // Донецк: Норд-Пресс, 2007.-492 с.

2. Megaw H. D. Crystal Structures: a working approach. Philadelphia, Saunders. 1973. 533 p.

3. Желудев И.С. Основы сегнетоэлектричества. – М: Атомиздат, 1973. – 472 с.0

4. Raspopov, V.Ya., Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V., Likhosherst, V.V. (Tula State University, Russia), Shepilov, S.I. (Michurinsk Plant «Progress», JSC, Michurinsk, Russia) Tuning and Calibration of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Metal Resonator to Operate in Angular Rate Sensor Mode, Giroskopiya i Navigatsiya, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31–41.

Исследование процесса шликерного литья тонкопленочных элементов системы ЦТС

Е.А Панич., Р.А Байдаров, Л.А Дыкина, В.А Бардин
Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Одним из перспективных направлений развития пьезоэлектрического приборостроения является создание устройств на базе многослойных тонкопленочных пьезоблоков, которые необходимы для работы шаговых пьезодвигателей в прецизионных устройствах позиционирования, в том числе для компенсации линейных и угловых смещений оптических зеркал в условиях эксплуатации. Согласно имеющимся данным, широкое распространение получили пьезокерамические кольца [1], пластины [2], а также многослойные сборки или стеки, состоящие из множества пьезопластин [3-6].

Получение таких многослойных структур стало возможным благодаря разработке технологии получения сегнетопьезоэлектрических пленок определенной толщины методом шликерного литья. В отличие от вальцевания и выдавливания этот метод получил широкое развитие в производственной сфере. Суть метода заключается в приготовлении шликера и дальнейшего его разлива на лавсановую ленту (подложку). Для этого пьезокерамический материал смешивают с добавлением растворителей, пластификатора и органического связующего.

Основной целью исследования являлось:

– отработка шликера и технологии получения тонкопленочных пьезоэлементов;

– выбор и апробирование технологической схемы изготовления многослойных пьезоблоков.

В нашем эксперименте, подготовленный шликер выливался на непрерывно движущуюся ленту литьевой установки при скорости движения лавсановой подложки 0,4 м/мин и зазором между фильерой и лавсановой подложкой от 300 до 500 мкм.

Внешний вид литьевой установки представлен на Рис. 1

Рис. 1 – Литьевая установка KEKO CAM-L252

На толщину конечной пленки, помимо задаваемой высоты фильеры, оказывает значительное влияние вязкость шликера.

Исходя из этого, было решено исследовать зависимость толщины пленки от:

– вязкости шликера;

– зазора между фильерой и лавсановой подложкой.

Зависимость толщины пленки (h) от вязкости шликера (η), при зазоре между фильерой и лавсановой подложкой 400 мкм, температуре окружающей среды 25 ^{0}C, представлена на рис. 2.

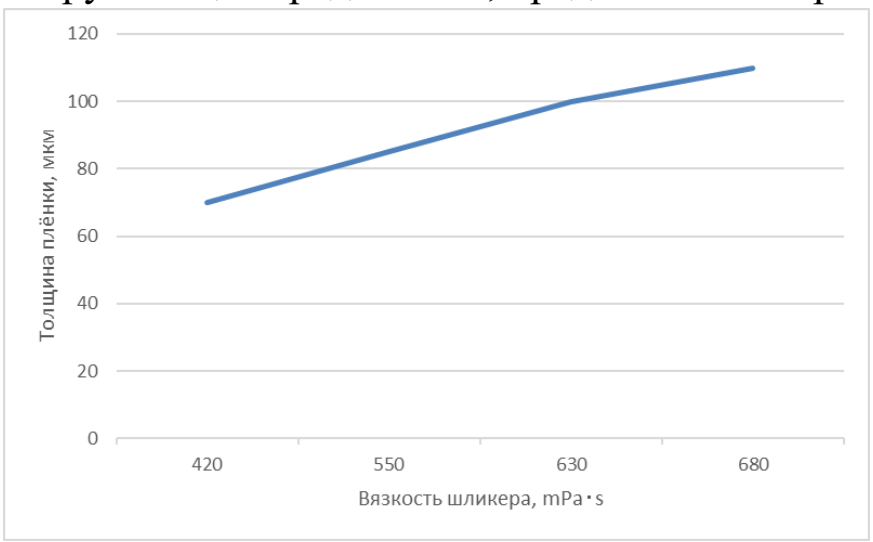


Рис. 2 – Зависимость толщины пленки от вязкости шликера

При апробировании шликера различной вязкости установлено, что при значениях, превышающих 700 mPa·s, полученная масса представляла собой густую смесь с большим количеством

пузырьковых включений, а при вязкости менее 300 mPa·s, шликер был достаточно жидкий и проливался за границы фильеры. Таким образом, определены и рекомендованы пограничные значения вязкости шликера – 420 – 680 mPa·s.

Экспериментальные работы по определению влияния задаваемой высоты фильеры на толщину пленки проводились при выбранной вязкости шликера 630 mPa·s (t=25 ^{0}C). Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

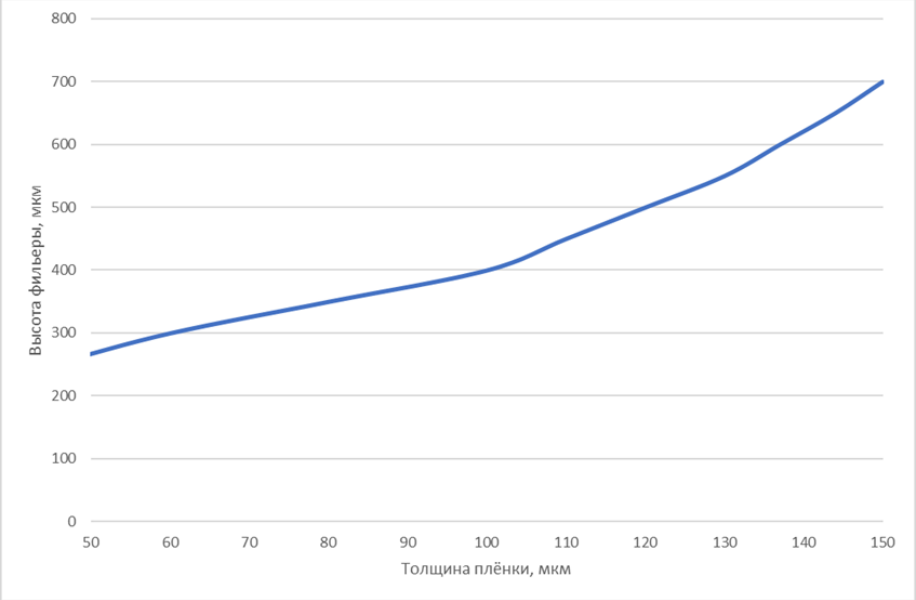


Рис. 3 – Зависимость толщины пленки от задаваемой высоты фильеры

Как видно из рис. 3, регулировать толщину пленки высотой фильеры возможно только до определенных значений, после достижения которых, при увеличении зазора между фильерой и лавсановой подложкой толщина конечной пленки, если и изменяется, то совсем незначительно.

В результате эксперимента, получены реальные зависимости исследуемого состава шликера от условия литья, выработаны основные технологические приемы управления толщиной конечной пленки.

Данная технология позволяет получать сегнетопьезоэлектрические пленки толщиной от 50 до 150 мкм.

Следующей задачей являлось получить из пленки заготовки пьезокерамических элементов.

Высушенную пленку с толщиной 100 мкм резали на фрагменты и спекали при температуре 1200 ^{0}C с выдержкой 2 часа, плотность спеченных заготовок составляла 7,3 г/см^3, что соответствует заявленной плотности пьезокерамического материала и подтверждает корректную рецептуру и технологию шликера.

Микрофотографии спеченных образцов, с различным увеличением (1000х, 3000х, 5500х) представлены на рисунке 4.

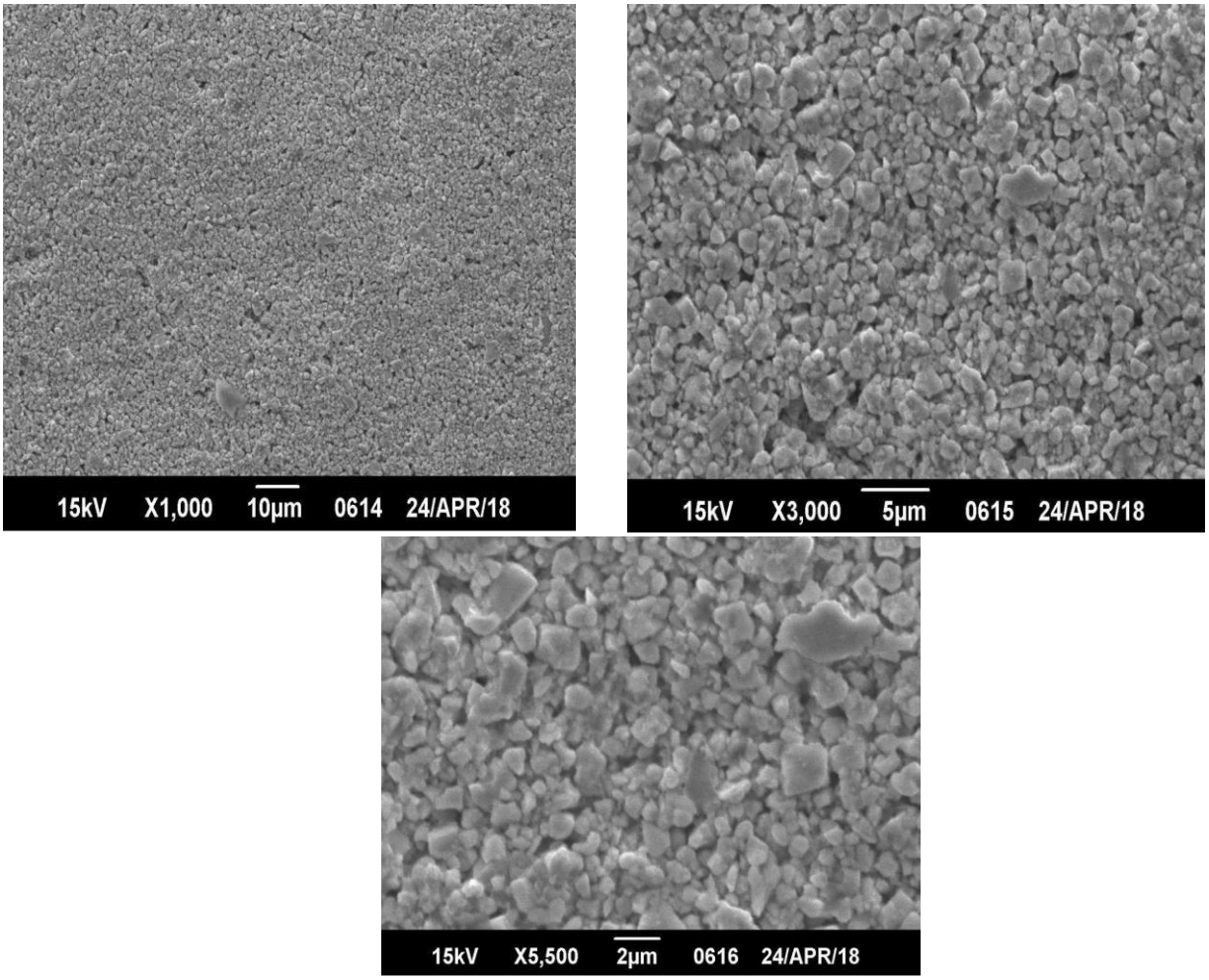


Рис. 4 – Микроструктура спеченных тонкопленочных заготовок пьезокерамических элементов, полученных методом шликерного литья

Из микроструктуры видно, что спеченные тонкопленочные образцы обладают зеренной структурой с практически однородным распределением зерен по размеру и плотными межзеренными границами, на которых практически отсутствуют поры.

Одним из основных направлений использования тонкопленочных пьезоэлементов, является создание на их основе многослойных пакетов пьезоблоков (пьезоактюаторов).

Пакетные пьезоактюаторы конструируются на основе одного из двух принципов: дискретное пакетирование и совместное спекание. Для изготовления дискретного пакетного пьезоактюатора пьезокерамические элементы изготавливаются отдельно (формуются, спекаются, наносятся электроды), после чего элементы собираются в пакет. Пакетные пьезоактюаторы, изготовленные дискретным способом, позволяют использовать при изготовлении различную форму пьезокерамических элементов, а также обеспечивают более широкий выбор пьезокерамических материалов. При управлении пакетными пьезоактюаторами, собранными по дискретной технологии, требуются напряжения в пределах 500 – 1000 Вольт. Для создания актюаторов, управляемых более низким напряжением, каждый пьезокерамический слой должен иметь толщину менее 1мм. Для достижения таких размеров вся керамикоэлектродная структура должна конструироваться и обжигаться целиком (технология совместного спекания) [7].

С этой целью была исследована технологическая возможность изготовления многослойных пьезоблоков методом совместного спекания с применением оборудования марки «KEKO» equipment (Словения). Общая технологическая схема представлена на рис. 5,6.

Рис. 5 – Технологическая схема изготовления многослойных пьезоблоков на оборудовании «KEKO»

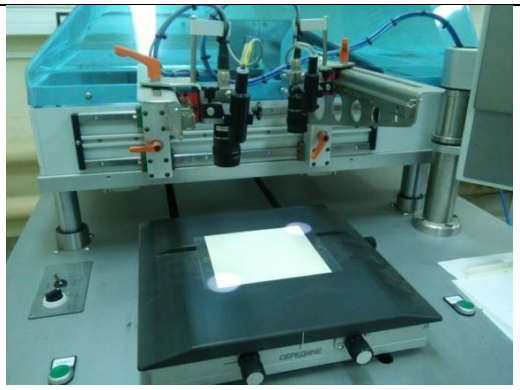
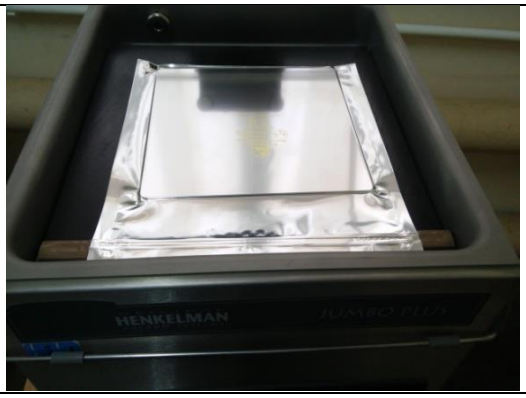
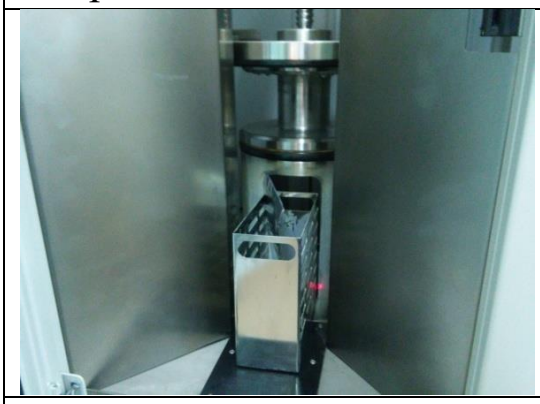
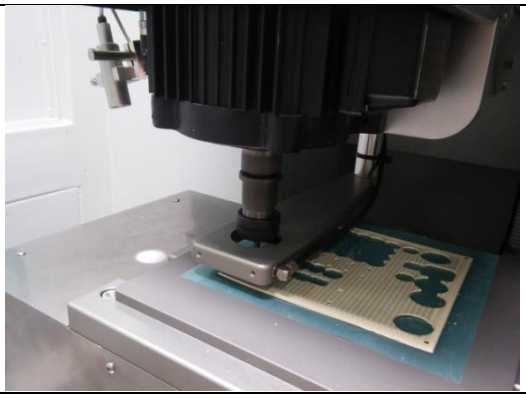
<table>
<tr><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">Литьё плёнки</td></tr>
<tr><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Нарезка заготовок</td><td>Нанесение электродов</td></tr>
<tr><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Сборка пакета</td><td>Вакуумирование пакета</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Изостатическое прессование</td><td>Фрезерование готовых элементов</td></tr>
</table>

Рис. 6 – Технологических узлы линейки оборудования «KEKO»

Таким образом, были получены заготовки пьезоблоков в виде цилиндров различного диаметра, состоящие из 30 пьезоактивных тонкопленочных слоев, толщиной каждого – 100 мкм. В качестве пьезокерамического наполнителя использовали пьезоматериал ПКП-12, а межслойных электродов – пасту на основе платинового порошка производства НКТБ «Пьезоприбор».

Готовые заготовки пьезоблоков спекали при температуре 1200 °С и механически обрабатывали до заданных размеров, после чего на образующие поверхности наносили коммутационные электроды и поляризовали заготовку.

Внешний вид образцов представлен на рисунке 7.

Рис. 7 – Внешний вид многослойного пьезоблока (пьезоактюатора)

На полученных поляризованных образцах пьезоактюатора, совместно с АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко», определены электрофизические и механические характеристики – перемещение L, ёмкость С, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ и блокирующая сила F. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты исследований образцов пьезоактюаторов

№ образца	Геометрические размеры, мм	С, нФ	tgδ, %	Перемещение, L, 100 В, мкм	Блокирующая сила F, Н
1	Ø6,98×1,91	340	2,0	2,0	-
2	Ø7,0×1,90	390	2,3	3,0	-
3	Ø7,5×2,51	385	3,0	2,0	-
4	Ø16×3,6	1050	2,8	3,5	300
5	Ø16×3,6	1100	2,5	2,2	300

Согласно данным, представленным авторами [7], рассчитанное перемещение при управляющем напряжении 100 В, для ана-

логичного пьезоактюатора на основе ПКП-12, составляет 2,28 мкм. Исходя из результатов, указанных в таблице 3, полученные экспериментальные значениям коррелируют и подтверждают расчетные.

Выводы:

1. Выбран и отработан оптимальный состав и вязкость шликера.
2. Определены основные технологические приемы управления толщиной конечной пленки.
3. Отработана технология шликерного литья пьезокерамических пленок толщиной от 50 до 150 мкм.
4. Предложена технологическая схема, выбрано и апробировано оборудование для получения многослойных пьезоблоков различной конструкции, которые могут быть успешно использованы в электромеханических преобразователях, способных осуществлять перемещения с нанометровой точностью.

Список литературы

1. Byung-Woo Kang and Jaehwan Kim Design, Fabrication, and Evaluation of Stepper Motors Based on the Piezoelectric Torsional Actuator //IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 18, No. 6, December 2013
2. Soonho Park, Siyuan He Standing wave brass-PZT square tubular ultrasonic motor // Ultrasonics 52 (2012) p.880–889
3. Siyang Song, Shubao Shao, Minglong Xu, Yan Shao, Zheng Tian, Bo Feng Piezoelectric inchworm rotary actuator with high driving torque and self-locking ability // Sensors and Actuators A 282 (2018) 174–182
4. Hamed Sanikhani, Javad Akbari Design and analysis of an elliptical-shaped linear ultrasonic motor // Sensors and Actuators A 278 (2018) 67–77
5. Roel Merry, René van de Molengraft, Maarten Steinbuch Modeling of a walking piezo actuator // Sensors and Actuators A 162 (2010) 51–60
6. Xin Dong, Yuancai Yang, Chong Zhang, Xiaobiao Shan A Novel Self-Sensing Stacking Piezoelectric Actuator Based on Structural Integration // 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering
7. Панич А.А., Дыкина Л.А., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В., Байдаров Р.А., Панич Е.А. // Высокоэффективный пьезоэлектрический актюатор для устройств микро- и нанопозиционирования

Диэлектрические свойства в многоэлементных керамиках на основе ниобата натрия-калия

Е.В. Глазунова, Л.А. Шилкина, И.А. Вербенко, Е.И Ситало, А.Н. Величко, А.С. Черевков, И.А. Лигостаев, Н.И. Серопян, Л.А. Резниченко

Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Введение

Материалы на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) занимают первое место среди используемых в промышленности пьезокерамик благодаря своим высоким пьезохарактеристикам и широкому кругу свойств необходимых для разных областей применения [1]. Однако они обладают рядом недостатков, таких как, несоответствие экологическим стандартам (содержание свинца выше 50%) [2], относительно высокая химическая активность, хрупкость. Исходя из вышесказанного требуется создание новых бессвинцовых сегнетопьезоэлектрических материалов с высокими пьезосвойствами. Одной из наиболее привлекательных бессвинцовых систем является (1-x) $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$–x$LiSbO_3$. Параметры материалов на основе твердых растворов (ТР) указанной системы могут достигать значений: d_{33} > 150 пКл / Н, K_p = 46%, T_C = 630 К [3]. Однако получение бессвинцовых керамик тоже имеет ряд технологических трудностей, таких ка высокая летучесть щелочных компонентов, гидролиз, взаимодействие с оснасткой при термообработке. Исходя из этого, требуется оптимизация технологии получения таких материалов. Одним их приемов, позволяющих снизить температуры синтеза и спекания керамик, оптимизировать их микроструктуру и улучшить свойства является механоактивация (МА).

Целью данной работы стало установление влияния механоактивации на диэлектрические и пьезоэлектрические свойства системы (1-x)$K_{0.46}Na_{0.54}Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_3$ - x $LiSbO_3$.

Объекты и методы

Объектами исследования стали ТР системы (1-x)$K_{0.46}Na_{0.54}$ $Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_3$ - x $LiSbO_3$, где x = 0.06, модифицированные 1.5 масс.% (Fe_2O_3 + Bi_2O_3) и $CuNb_2O_6$.

ТР были получены двухстадийным твердофазным синтезом при T_1=1000 °С– 6ч., T_2=1100 °С – 6ч., с последующим спеканием по обычной керамической технологии $T_{сп.}$=1195 °С –1205 °С в течение 2ч.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН 3.0 (CoK_α – излучение, фокусировка по Брэггу – Брентано). МА осуществляли в планетарной мельнице АГО-2 в спиртовой среде с использованием помольных шаров из ZrO_2 в течение 5-20 мин. Исследование микроструктуры сколов образцов осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM–6390L. Измерение диэлектрических характеристик ТР проводили с использованием Диэлектрического спектрометра Novocontrol в интервале Т=(100 ÷ 600) °С, на частотах 1Гц-100кГц. Глубину частотной дисперсии оценивали по формуле:

$$\Delta\varepsilon'_m = \left(\frac{s^F_{mf1} - s^F_{mf2}}{s^F_{mf1}}\right) * 100\% \ ,$$

где ε'_{mf1} – максимум диэлектрической проницаемости на самой низкой частоте,

ε'_{mf2} – максимум диэлектрической проницаемости на самой высокой частоте.

Экспериментальные результаты

Рентгенофазовый анализ ТР изучаемой системы показал, что полученные ТР имеют структуру типа перовскита с тетрагонально искаженной элементарной ячейкой.

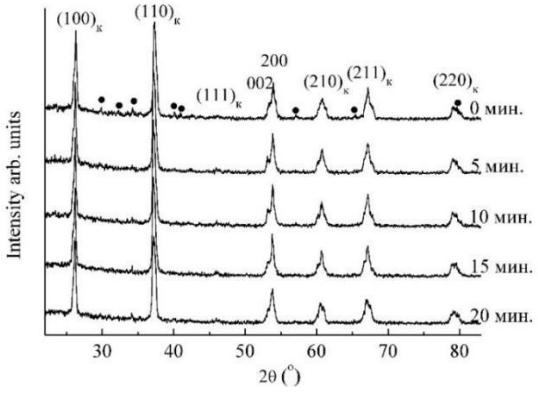


Рис. 1 - Рентгенограммы ТР $K_{0.4324}Na_{0.5076}Li_{0.06}Nb_{0.864}Ta_{0.\ 0.\ 094}Sb_{\ 0.06}O_3$, модифицированные 1.5 масс.% (Fe_2O_3 + Bi_2O_3) и $CuNb_2O_6$ после спекания (кружком помечены линии фазы $Li_2K_3Ta_5O_{15}$)

Все образцы содержат примесную фазу $Li_2K_3Ta_5O_{15}$ (интенсивность линии ≤ 8%, рис. 1). ТР механоактивированный в течение 10 мин. содержит наименьшее количество примесной фазы (интенсивность наиболее сильной линии 3%). Максимум плотности достигается при МА в течение 15 мин.

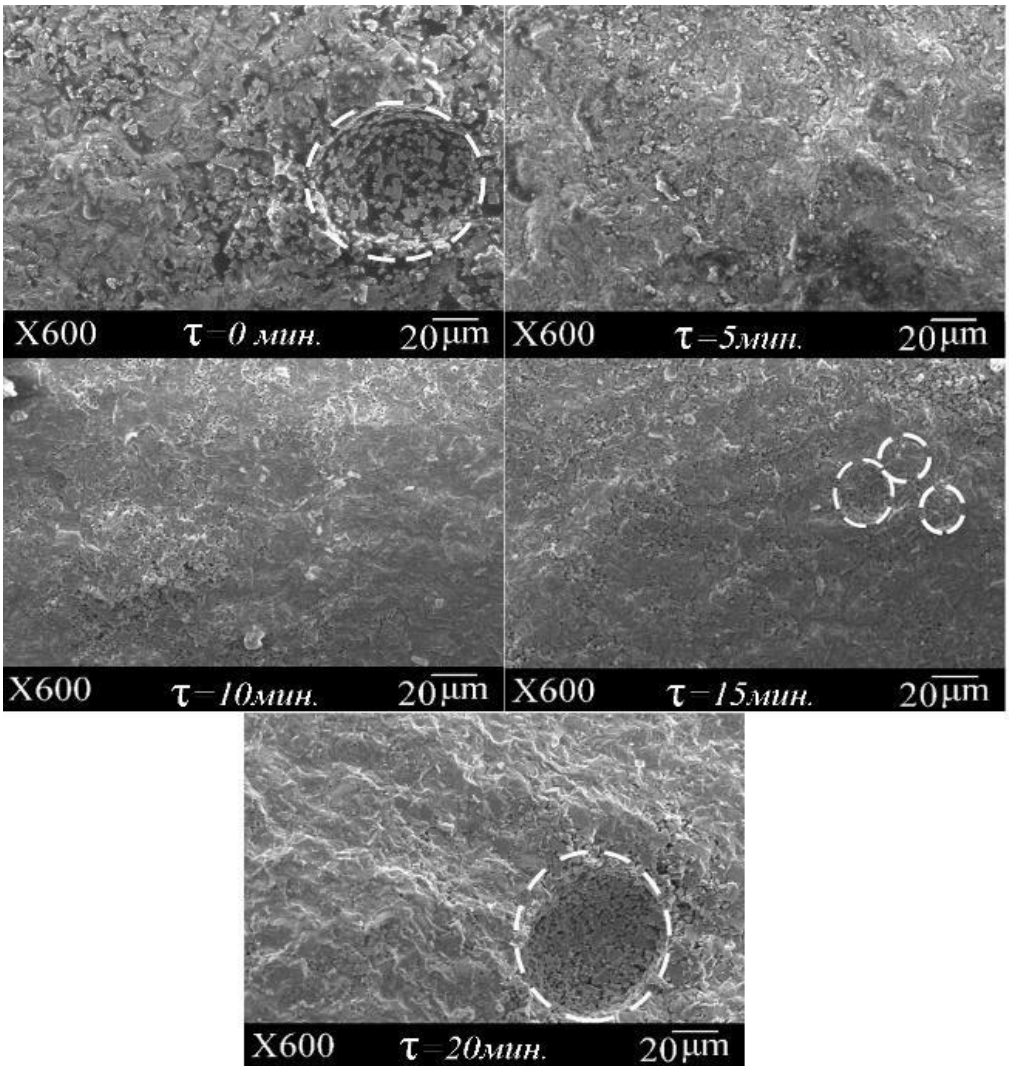


Рис. 2 - Фрагменты микроструктур ТР полученных без МА и механоативированных для ТР K0.4324Na0.5076Li0.06Nb0.864Ta0. 0. 094Sb 0.06O3, с 1.5 масс. % (Fe2O3 + Bi2O3) и CuNb2O6.

На рис. 2 представлены микрофотографии зеренного строения керамик немеханоактивированной и механоактивированной. Во всех случаях для микроструктуры характерно формирование кристаллитов в виде параллелепипедов. Обычно [4], такое наблюдается при участии в рекристаллизационном спекании жидкой фазы (ЖФ). Её источниками могут выступать как непро-

реагировавшие исходные реагенты, так и специально введенные добавки ($(Fe_2O_3 + Bi_2O_3)$ и $CuNb_2O_6$).

В образцах механоактивированных в течение 15 мин. формируется мелкозернистый зеренный ландшафт с многочисленными ансамблями плотноупакованных кристаллитов.

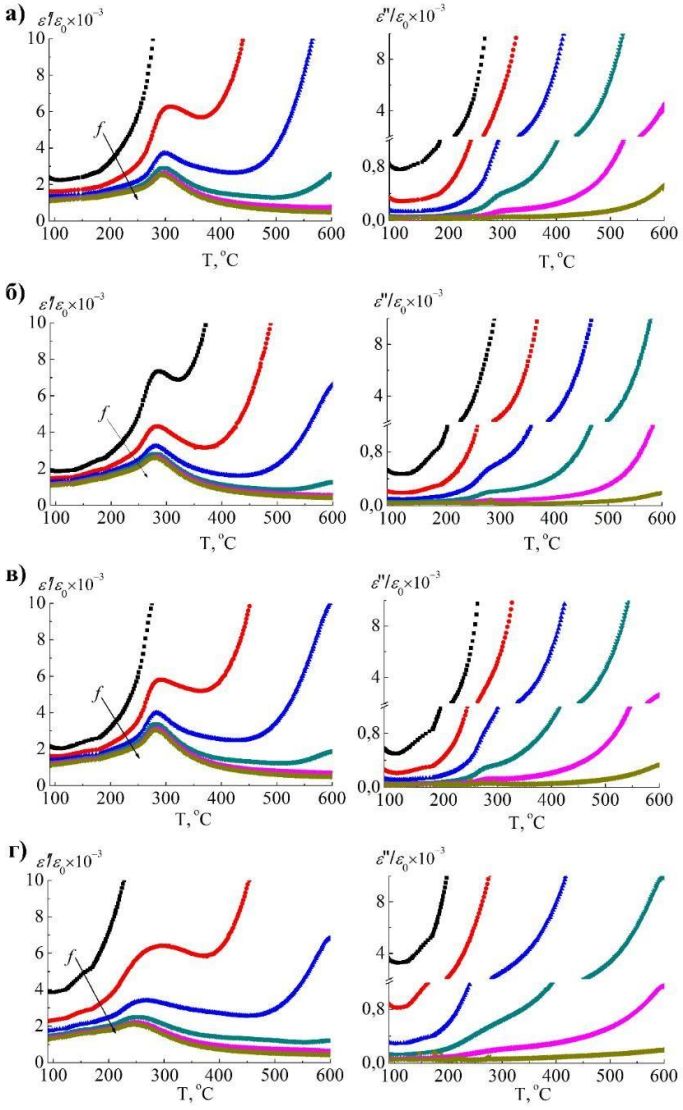


Рис. 3 Зависимости действительной ε′/ ε0 и мнимой ε″/ ε0 частей диэлектрической проницаемости ε′/ ε0 и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от температуры для ТР, полученных при разных временах МА 5мин.(а), 10мин. (б), 15 мин. (в), 20мин. (г) на частотах 1Гц-100кГц

Анализ зависимости диэлектрической проницаемости показал, что применение МА позволяет повысить её значения независимо от времени МА, при сохранении прежнего уровня диэлектрических потерь. При этом с увеличением времени МА максимум диэлектрической проницаемости размывается, а температура перехода снижается, частотная дисперсия растет.

На рис.4 представлена зависимость глубины частотной дисперсии для всех объектов от температуры. Из графика видно, что при увеличении времени МА глубина дисперсии проходит через минимумы при 130-140ºС и при 170-190 ºС (рис.4).

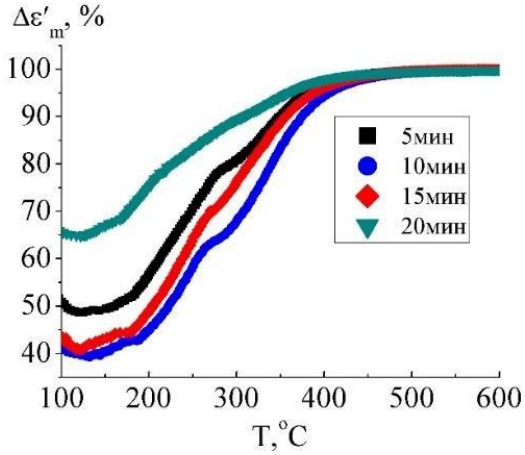


Рис. 4 Зависимость глубины частотной дисперсии от температуры.

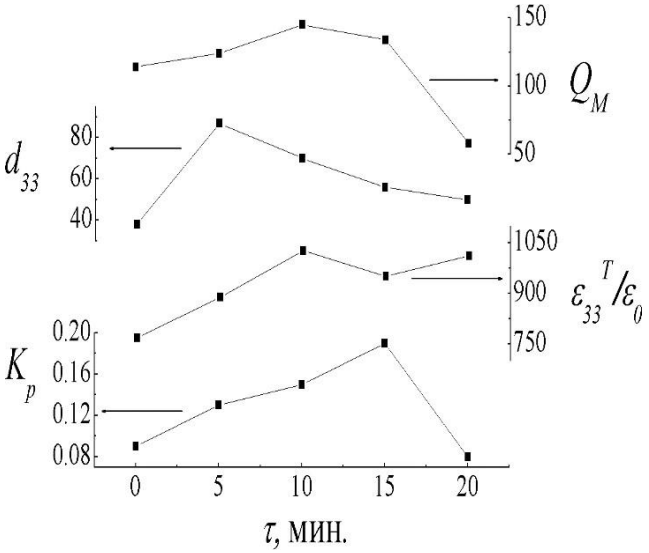


Рис. 5 Зависимости пьезоэлектрических характеристик частотной изучаемых ТР. от времени МА.

Значения глубины дисперсии $\varepsilon/\varepsilon_0$ позволяют говорить, что при низких температурах термочастотное поведение диэлектрических свойств объектов аналогично, ранее наблюдаемому в сегнетоэлектриках-релаксорах [5]. При увеличении температуры выше 300 ºС большой вклад в поведение зависимостей вносит электропроводность объектов.

На рис.4 представлены зависимости пьезоэлектрических характеристик от времени МА. Видно, что пьезомодуль d_{33} после применения МА вырос (имеет максимум для ТР активированного в течении 5 мин. активации) по сравнению с немеханоативированным. Оптимальные соотношения добротности Q_M, коэффициента электромеханической связи K_p и диэлектрической проницаемости поляризованных образцов $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ получены для ТР, активированных в течение 10 и 15 мин. Это может быть связано с параметрами рекристаллизационного спекания в присутствии жидкой фазы (см. рис.2), способствующими, например, созданию промежуточного межзеренного слоя, обеспечивающего снижение

внутреннего трения и следовательно улучшает передачу электромеханического сигнала.

Выводы

Установлено, что применение МА позволяет управлять как составом, получаемых керамик, так и параметрами микроструктуры и макроотликами керамик на основе многокомпонентной системы (K, Na,Li)(Nb,Ta,Sb)O_3. Показано, что МА влияет на количество примесной фазы и средний размер зерна, плотность объектов и пьезоэлектрические свойства, что может быть связано с изменением состава керамик~~и~~, трансформацией структурных параметров ТР и характера их спекания.

Показано, что применение МА приводит к увеличению значений диэлектрической проницаемости, а также к качественному изменению термочастотного поведения диэлектрических свойств ТР.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект №0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ) при использовании оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

Список литературы

1. D. Kajewski, P. Zajdel, A. Soszyński, J. Koperski, I. Lazar, K. Roleder // Ceramics International. 2019. 45(8). 9871-9877.

2. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment // Official Journal of the European Union. L 174. 2011. 54. PP. 88-110.

3. Dunkin Lin, K. W. Kwok, K. H. Lam, and H. L. W. Chan. // J. of Applied physics. 2007. 101. 074111.

4. L.A. Reznichenko, V.A. Alyoshin, A.N. Klevtsov, O.N. Razumovskaya, L.A. Shilkina. Ferroelectrics. 2000. 247. PP.95-105.

5. Исупов В.А. Природа физических явлений в релаксорах // ФТТ. 2003. Т. 45. № 6. С. 1056-1060.

Зависимости электрофизических характеристик твердых растворов системы (1-*x*-*y*) $NaNbO_3$ – *x*$KNbO_3$ – *y*$Cd_{0.5}NbO_3$ от температуры, электроотрицательности и однородного параметра деформации

М.О. Мойса, К.П. Андрюшин, И.Н. Андрюшина, С.И. Дудкина, Л.А. Резниченко
Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ранее нами в [1] представлены результаты исследования твердых растворов (ТР) трехкомпонентной системы (1-*x*-*y*) $NaNbO_3$ – *x*$KNbO_3$ – *y*$Cd_{0.5}NbO_3$ (*x* = 0.05–0.70, y = 0.025–0.30, Δx=Δy= 0.05) с неизоструктурными компонентами ((Na,K)NbO_3 – перовскиты, $CdNb_2O_6$ – колумбит), полученных двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по обычной керамической технологии. На основе рентгенографических данных установлены границы формирования беспримесных ТР, построены фазовые диаграммы изученных разрезов системы с морфотропными областями и полями сосуществования фазовых состояний, вблизи которых макроотклики (диэлектрические, пьезоэлектрические) экстремальны. Выявлена спецефическая морфология зёренных структур ТР, обусловленная присутствием жидкой фазы в процессе их рекристаллизационного спекания. Анализ эволюции диэлектрических спектров позволил выделить области с различным характером проявления сегнетоэлектрических свойств: классические сегнетоэлектрики, ТР с размытыми фазовыми переходами, сегнетоэлектрики-релаксоры.

Настоящая работа является продолжением и развитием предпринятых ранее исследований и посвящена рассмотрению зависимостей электрофизических характеристик (относительной диэлектрической проницаемости поляризованных образцов, $\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}}/\varepsilon_0$, диэлектрических потерь, tgδ, коэффициента электромеханической связи радиальной моды колебаний, K_{p}, пьезомодуля, $|d_{31}|$, пьезочувствительности, $|g_{31}|$, модуля Юнга, Y_{11}^{E}, механической добротности, $Q_{\mathrm{м}}$, скорости звука, V_1^{E}, резонансных частот, $f_{\mathrm{r}1}$, $f_{\mathrm{r}3}$,

спонтанной P_s, остаточной P_r поляризации и напряженности коэрцитивного поля E_c) ТР от температуры (рис. 1, 2), электроотрицательности (ЭО) входящих в состав ТР элементов и однородного параметра деформации δ [2] (рис. 3).

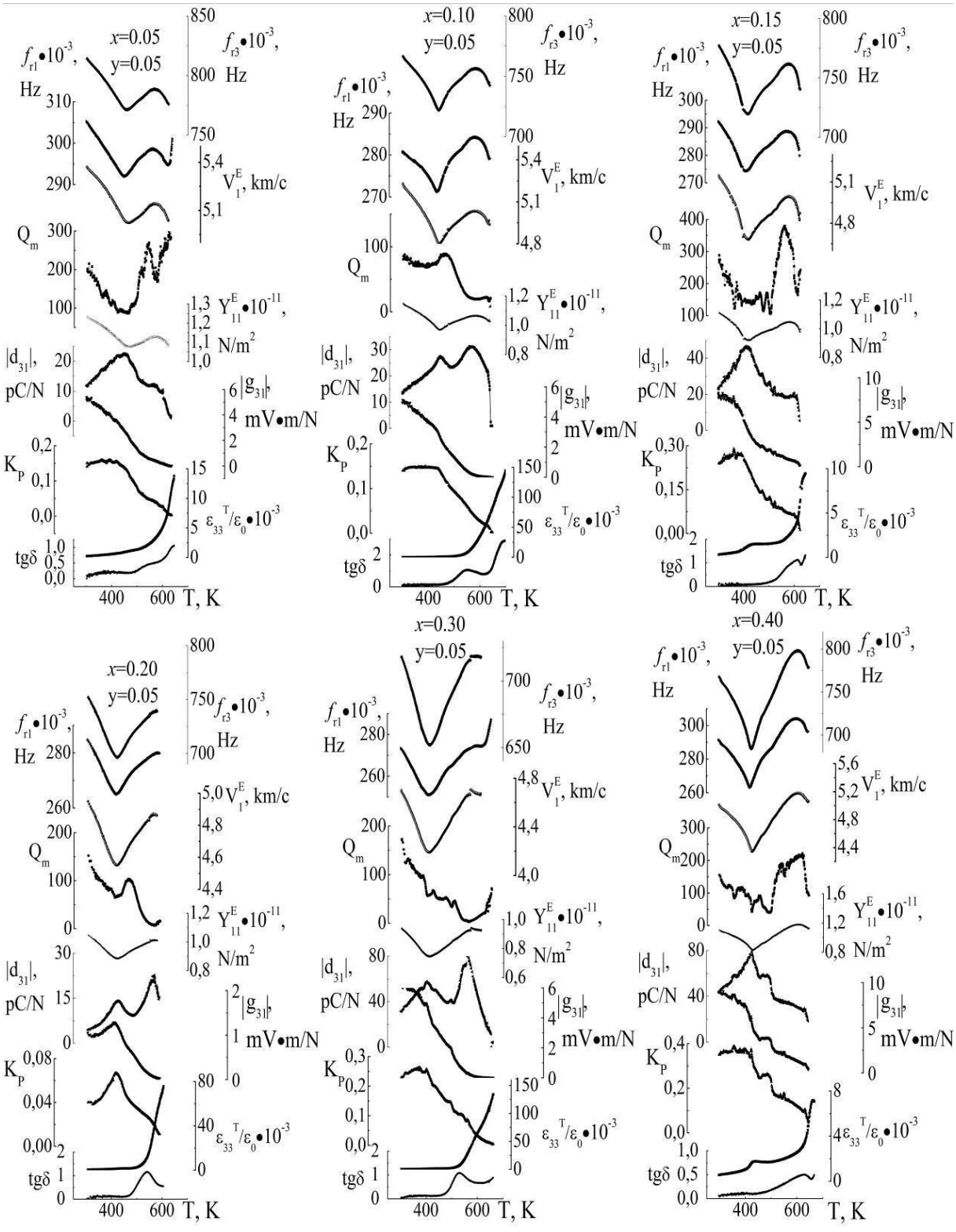


Рис. 1. Температурные зависимости электрофизических параметров от концентрации $KNbO_3$ для ТР (1-x-y) $NaNbO_3$ - x$KNbO_3$ - y$Cd_{0.5}NbO_3$ (разрез I).

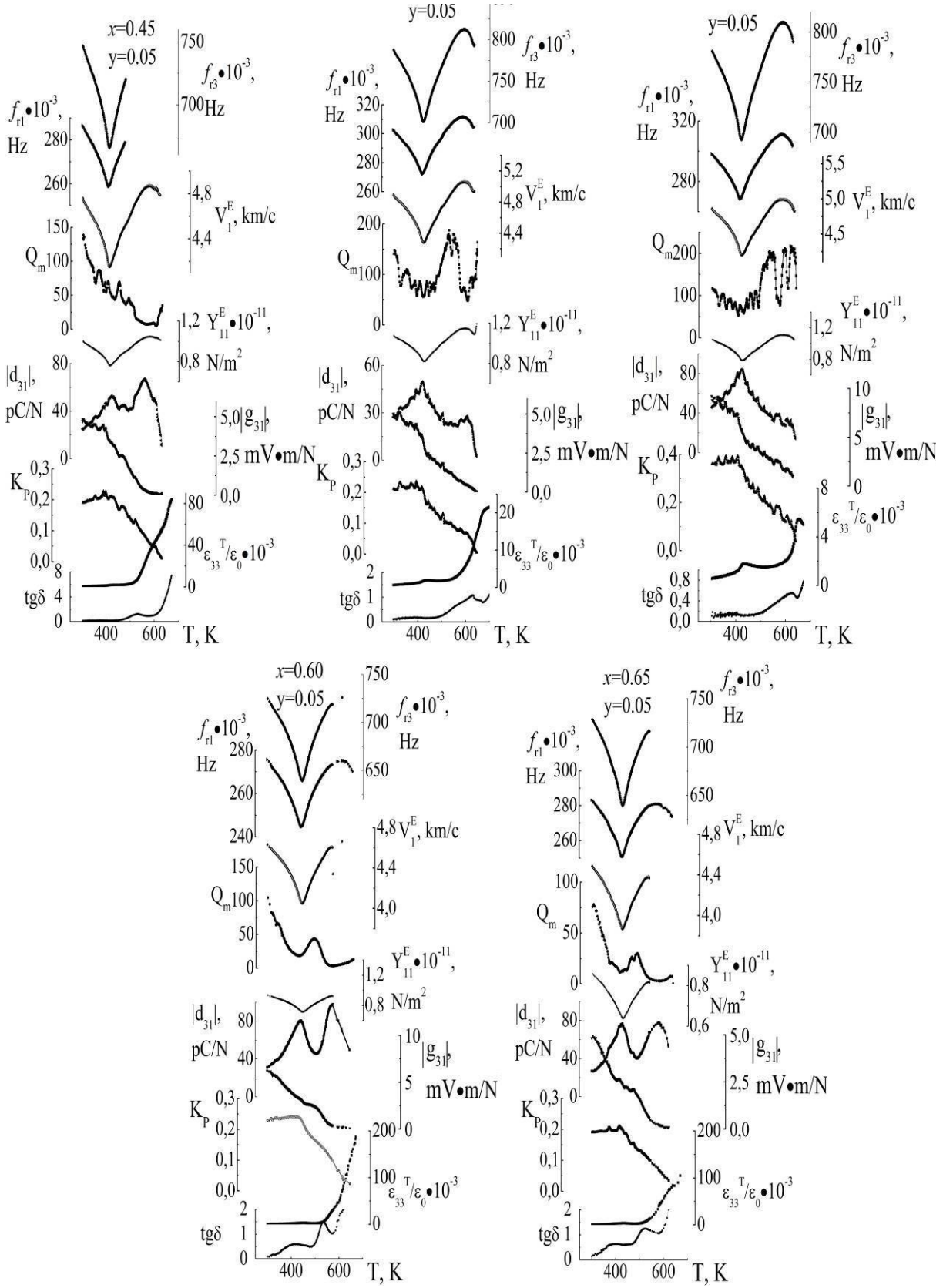


Рис. 1. Продолжение.

Немонотонный характер «поведения» макроотклико в, представленный на рис. 1, коррелирует с трансформациями кристаллической структуры ТР при изменении температуры.

Петли диэлектрического гистерезиса исследовались осциллографическим методом Сойера – Тауэра (f = 50 Гц, T = (300÷431) K), при этом были рассчитаны спонтанная P_s и остаточная P_r поляризации, а также напряженность коэрцитивного поля E_c.

В вышеуказанном ТР формирование насыщенных P–E петель происходит при напряжении U = 1000 В во всем исследованном температурном диапазоне (рис. 2). Повышение температуры приводит к постепенному сжатию петли по оси ординат.

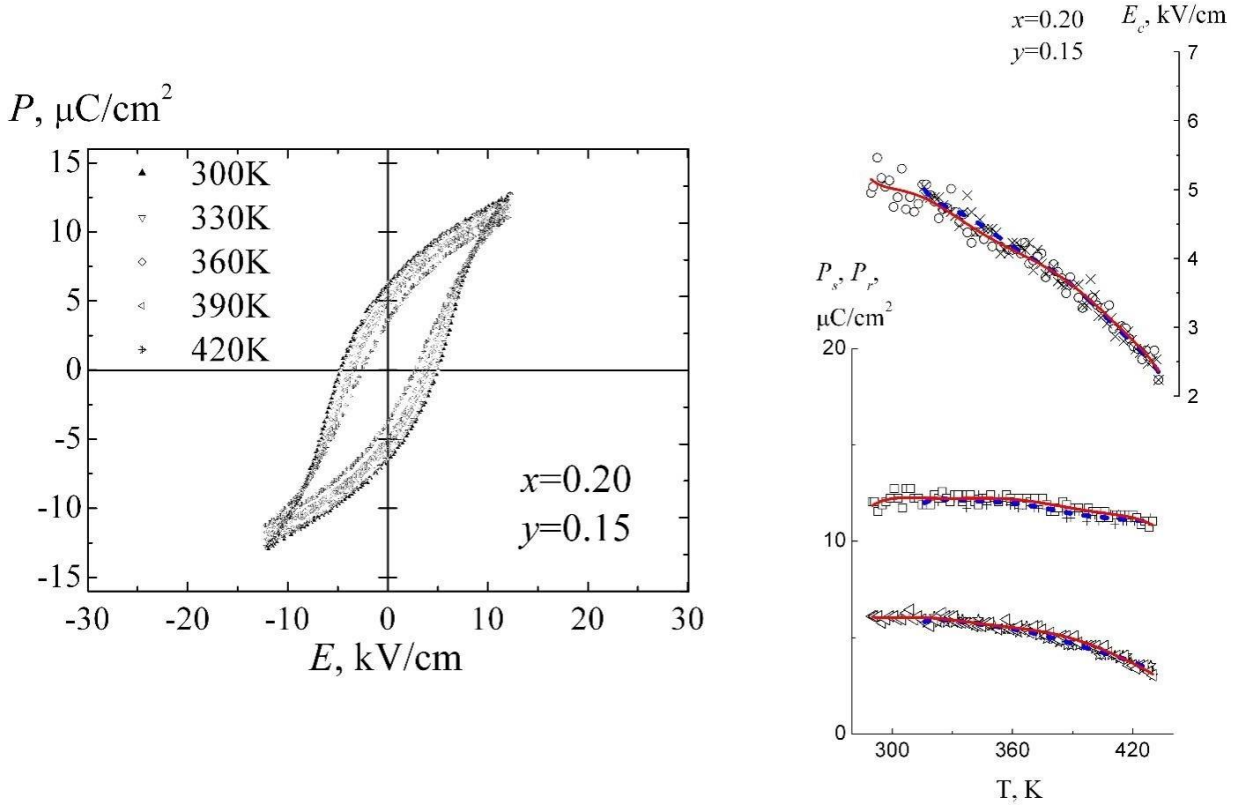


Рис. 2. P-E петли и зависимость (Ps, Рост., Ec)(T) ТР состава (1-x-y) NaNbO3 – xKNbO3– yCd0.5NbO3 (y=0.15, x=0.20) при T=300–420 K.

На основе исследования P-E петель диэлектрического гистерезиса построены зависимости (P_s, P_r, E_c)(T) (рис. 2), аппроксимированные полиномом второй степени. При нагреве и охлаждении в диапазоне температур (300–420) K не наблюдается температурный гистерезис величин P_s, P_r, E_c. В данном диапазоне снижение спонтанной поляризации проходит по закону $T^{\frac{1}{2}}$.

Анализ рис. 3 позволил выделить некий интервал критических значений ЭО, который является разделом между традицион-

ной зависимостью $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0(\delta)$ – обратной [3, 4] и аномальной – прямой.

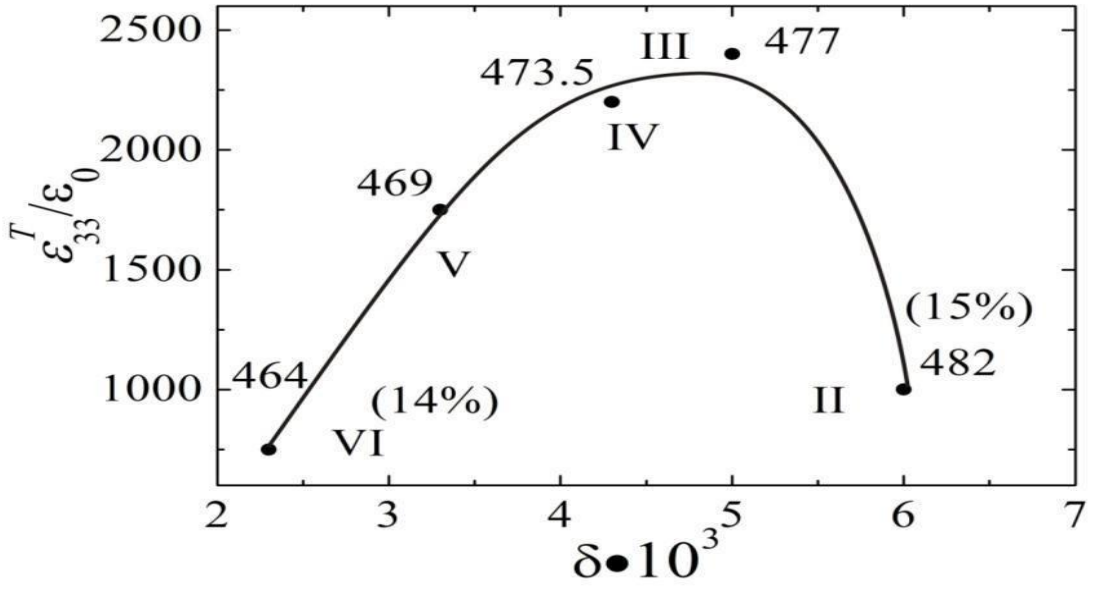


Рис. 3. Зависимость $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0(\delta)$ с указанием в каждой экспериментальной точке значения ЭО.

Так же, как и ранее [5] наблюдаемое может быть объяснено различным вкладом в направленность химических связей энергии ковалентного взаимодействия, анизотропии валентных орбиталей, с одной стороны, и степени возмущения (разрушения) атомных орбиталей полем атомов окружения.

Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке материалов и устройств на основе изученной трехкомпонентной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ)).

Список литературы

1. Konstantin Andryushin, Lidiya Shilkina, Inna Andryushina, Alexandr Nagaenko, Maxim Moysa, Svetlana Dudkina, Larisa Reznichenko. Features of the structure and electrophysical properties of solid solutions of the system (1-x-y) $NaNbO_3$ - x$KNbO_3$ - y$Cd_{0.5}NbO_3$ // Materials. 2021. V. 14. P. 4009 (17 pages). https://doi.org/10.3390/ma14144009

2. Фесенко Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. М.: Атомиздат, 1972. - 248 с.

3. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1983 - 156 с.

4. Данцигер А.Я., Разумовская О.Н., Резниченко Л.А., Сахненко В.П., Клевцов А.Н., Дудкина С.И., Шилкина Л.А., Дергунова Н.В., Рыбянец А.Н. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. Ростов-на-Дону: МП «Книга», 2001, 2002. Т.1, 2 - 800 с.

5. Резниченко Л.А., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н., Дудкина С.И., Шилкина Л.А., Титов С.В., Кузнецова Е.М., Клевцов А.Н. Зависимость свойств модифицированных твердых растворов на основе ниобата натрия от характера химической связи и дефектности кристаллической структуры // Неорган. материалы. 2001. Т. 37. № 10. С. 1254-1258.

Формирование структурных и диэлектрических характеристик в керамике $La_{0,5}Bi_{0,5}Mn_{1-x}Z_xO_3$ (Z=Fe, Co)

Д.В. Волков, Н.А. Болдырев, И.А. Вербенко
Научно-исследовательский институт физики ЮФУ,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

По обычной керамической технологии, синтезированы модифицированные твердые растворы на основе мультиферроика $Bi_{0,5}La_{0,5}MnO_3$. Введение модификаторов проводили стехиометрически в виде Fe_2O_3, CoO в соответствие формуле $Bi_{0,5}La_{0,5}Mn_{1-y}Z_yO_3$, Исследованы процессы фазообразования, структурные характеристики, диэлектрические свойства и микроструктура данных твердых растворов. Обнаружены аномалии на спектрах диэлектрической проницаемости, связанные с ростом электропроводности многослойной структуры. Произведен поиск корреляционных связей между макросвойствами объектов и характерными для них фазопереходными явлениями.

Мультиферроики (материалы с сосуществующими электрическими, магнитными или упругими упорядочениями) в настоящее время являются одними из наиболее интенсивно изучаемых объектов в материаловедении благодаря широкому спектру их возможных применений [1-3]. Манганит висмута ($BiMnO_3$) является представителем данного класса материалов и рассматривается в качестве основы для многих магнитоэлектрических структур. Однако широкое применение $BiMnO_3$ ограничено рядом факторов. Так, например, наблюдаемый в данном материале магнитодиэлектрический эффект (МДЭ) довольно слабый в силу большого различия между температурами сегнетоэлектрического и ферромагнитного переходов (T_N ~ 600–700 К, T_C ~ 100-150 К). Увеличить значение МДЭ позволяет сближение температур переходов путем создания твердых растворов (ТР) на основе манганита висмута. Одним из таких ТР является $La_{0,5}Bi_{0,5}MnO_3$, в котором помимо достаточно высокого МДЭ (~28 %) [4] также наблюдается и колоссальное магнетосопротивление (КМС) [5]. Согласно модели Каталана [9], МДЭ может быть следствием сочетания

магнетосопротивления и Максвелл-Вагнеровской (МВ) поляризации. Предполагается, что границы зерен (прослойки) и/или слои между образцом и электродами могут обладать проводимостями γ_1, существенно отличающимися от проводимостей γ_2 зерен керамики. Зависимость этих проводимостей от магнитного поля и приводит к изменениям ε вследствие МВ-поляризации. Удельная проводимость γ рассчитывается исходя из значений ε' и ε'' по формуле:

$$\gamma = \gamma' + i\,\gamma'' = i\omega\varepsilon_0\varepsilon = \omega\varepsilon_0(\varepsilon'' + i\varepsilon')$$

где $\gamma' = \omega\varepsilon_0\varepsilon''$ и $\gamma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'$ — действительная и мнимая части γ, ε_0 — электрическая постоянная. Такая же формула используется для связи γ_1 и ε_1 прослоек и γ_2 и ε_2 зерен керамического образца.

Кроме того, манганит висмута термодинамически не устойчив при высоких температурах, что делает невозможным получение его традиционным, наиболее дешевым методом – твердофазным синтезом.

Одним из способов, позволяющим как повысить устойчивость материала, так и повлиять на характеристики мультиферроиков, является их модифицирование. В случае с манганитом висмута перспективными модификаторами являются железо (3+) [6,7] и кобальт (2+) [8]. Электронное строение этих катионов характеризуется значительным суммарным магнитным моментом неспаренных электронов, локализованных на внешних 3d-орбиталях, что определяет их значительное влияние на магнитные характеристики ТР $La_{1-x}Bi_xMnO_3$. В связи с этим целью данной работы явилось установление закономерностей формирования структурных и диэлектрических характеристик и связанных с ними эффектов в керамике $La_{1-x}Bi_xMnO_3$, модифицированной стехиометрически железом и кобальтом.

Все объекты исследования получены двухстадийным твердофазным синтезом (T_1=1073 K, t=10ч и T_2=1223 K, t=10ч) с последующим спеканием ($T_{сп}$=1293 K, t=2,5ч) по обычной керамической технологии. Модифицировали ТР стехиометрически оксидами Fe_2O_3, CoO в соответствие формуле $Bi_{0.5}La_{0.5}Mn_{1-x}Z_xO_3$ с шагом x =0.05, 0.1, 0.15. Фазовый состав и полноту синтеза кон-

тролировали рентгеновской дифракцией, ($Co_{K\alpha}$-излучение) с помощью дифрактометра ДРОН-3. На каждой стадии технологического процесса проводилась поэтапная оптимизация условий образования ТР. Рентгеноструктурный анализ показал, что полученные образцы практически беспримесны, однофазны, при комнатной температуре имеют структуру, близкую к кубической. Исследование микроструктуры образцов проводили на электронном сканирующем микроскопе JSM-6390L. Микроструктура исследуемых керамик пористая, а присутствие модификатора привело к заметному изменению среднего диаметра зерен у всех ТР.

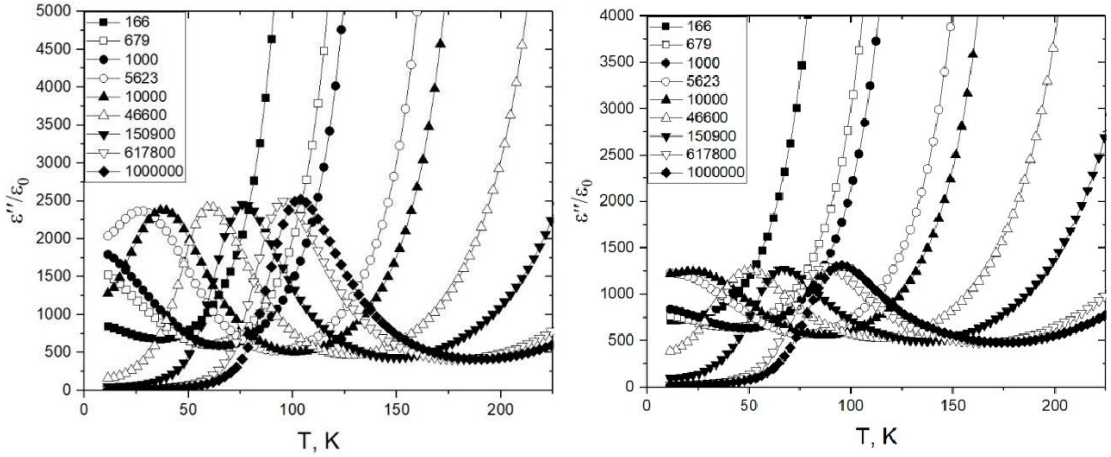


Рис.1. Зависимости ε′′/ε0 от Т керамик Bi0.5La0.5Mn0,95Fe0,05O3 (слева) и Bi0.5La0.5Mn0,95Co0,05O3 (справа) при Т = (11–225) К на частотах f = (166–106) Гц, полученные в режиме охлаждения.

Диэлектрические характеристики образцов измерены в диапазоне температур Т от 11–300 К и широком интервале частот f от 86–1 МГц рис.1. На зависимостях $\varepsilon'/\varepsilon_0$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0$ от Т наблюдается формирование частотно зависимых максимумов, практически исчезающих при низких частотах ниже 1700 Гц, и сдвигающихся в область более высоких частот. Дальнейший рост температуры приводит к резкому возрастанию $\varepsilon'/\varepsilon_0$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0$ и усилению дисперсии, что в случае с $\varepsilon''/\varepsilon_0$ по всей видимости связанно с возрастанием действительной части электропроводности γ' керамики, которая так же имеет частотно зависимый максимум, возникающий при частотах выше 10 кГц, а в случае $\varepsilon'/\varepsilon_0$ с ростом сквозной электропроводности. Наблюдаемые процессы нами связываются с накоплением заряда на границах раздела сред типа: зерно-межзёренная граница, однородная кристаллическая структура –

область кристаллографического сдвига, границы дислокаций вызванных неоднородным распределением разноименных катионов. Все эти неоднородности приводят к возникновен ию межслоевой поляризации типа Максвела-Вагнера, оказывая влияние как непосредственно на диэлектрическое поведение объектов, так и на связь диэлектрической подсистемы и распределения магнитных моментов в керамиках [9].

«Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ)» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Список литературы

1. T. Kimura, S. Kawamoto, I. Yamada, M. Azuma, M. Takano, Y. Tokura, Phys. Rev. B 67 180401 (2003).
2. D.V. Efremov, J.V. den Brink, D.I. Khomskii, Nature Mater. 3 853 (2004).
3. A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin, Physics-Uspekhi 55 557 (2012).
4. C.H. Yang, S.H. Lee, T.Y. Koo, Y.H. Jeong. Phys. Rev. B 75 104 (2007).
5. Y.D. Zhao, Jonghyurk Park, R.-J. Jung, H.-J. Noh, S.-J. Oh. J. Mag. Mag. Mater. 280 404 (2004).
6. Asish K. Kundu, V. K. Jha, Md. Motin Seikh, R. Chatterjee and R. Mahendiran J. Phys.: Condens. Matter 24 255902 (2012).
7. A.K. Kundu, V. Pralong, V. Caignaert, C. N. R. Rao, B. Raveau, J. Mater. Chem. 17 3347 (2007).
8. A.K. Kundu, R. Ranjith, V. Pralong, V. Caignaert and B.J. Raveau, Mater. Chem. 18 4280 (2008).
9. G. Catalan, Applied Physics Letters 88(10), 102902 (2006).

Электродинамические свойства твердых растворов $0.98(xPbTiO_3 - yPbZrO_3 – zPbNb_{2/3}Mg_{1/3}O_3) – 0.02PbGeO_3$ в СВЧ диапазоне

П.А. Астафьев, А.А. Павелко, Ю.М. Нойкин
[1]Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия
[2]Физический факультет ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Введение

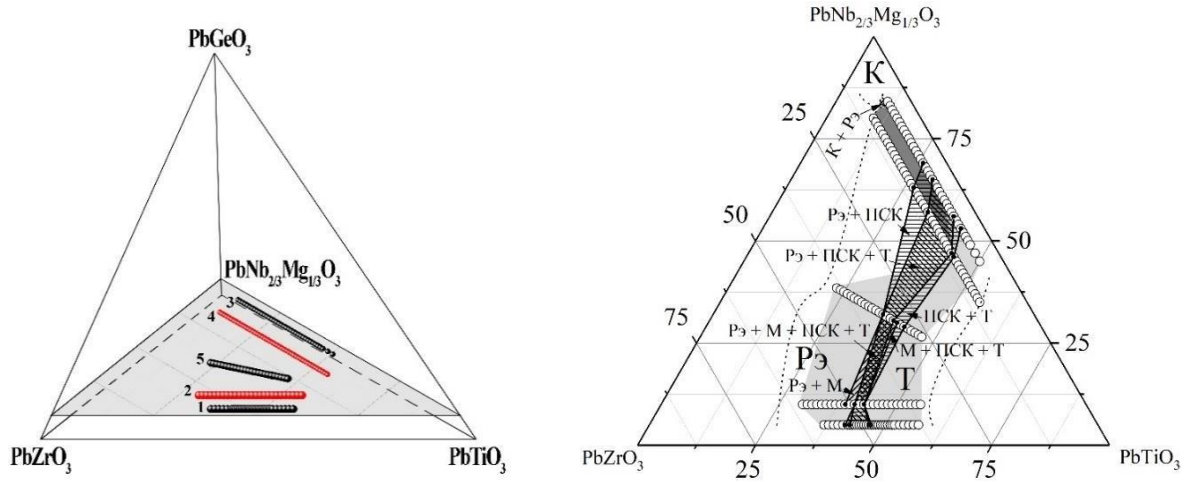
Основными требованиями к современным радиоэлектронным компонентам является миниатюризация и уменьшение стоимости производства. Выполнить в некоторой степени данные требования позволяет использование сегнетоэлектрических материалов в качестве элементов диэлектрических резонаторов, фильтров, фазовращателей, варикапов [1]. Поэтому, актуальной задачей современного материаловедения является исследование параметров сегнетоэлектриков в СВЧ диапазоне. Одним из перспективных материалов для применений в радиоэлектронике является многокомпонентные сегнетоэлектрические среды на базе сегнето ($PbTiO_3$, PT) - антисегнетоэлектриков ($PbZrO_3$, PZ), релаксоров ($PbNb_{2/3}Mg_{1/3}O_3$, PMN). Известная зависимость их макроотликов от состава и кристаллической (фазовой) структуры позволяет осуществлять поиск соответствующих корреляционных связей. Таким образом, целью данной работы было измерение параметров сегнетоэлектрических образцов микрополосковым методом и поиск зависимостей прямых и обратных электромагнитных потерь от состава.

Объекты. Методы получения и исследования образцов

Объектами исследования выступили образцы твердых растворов (ТР) четырехкомпонентной системы $0.98(xPbTiO_3 - yPbZrO_3 – zPbNb_{2/3}Mg_{1/3}O_3) – 0.02PbGeO_3$.

На рис. 1 (а) представлен тетраэдр составов указанной системы, а на рис. 1 (б) – в виде треугольника Гиббса показано исследованное сечение тетраэдра с выделенными 1 – 5 разрезами, соответствующими содержанию PMN (1, 2) и PZ (3, 4) 5 и 15

мол.% соответственно, и равному соотношению концентраций PMN и PZ (5).



а б

Рис. 1 Тетраэдр составов системы PbTiO3-PbZrO3–PbNb2/3Mg1/3O3–PbGeO3 (1 – 5 – разрезы системы) (а) и исследованное сечение системы (треугольник Гиббса) 0.98(xPbTiO3-yPbZrO3– zPbNb2/3Mg1/3O3) – 0.02PbGeO3 с указанием морфотропных границ: К – кубическая фаза, Рэ – ромбоэдрическая, Т – тетрагональная, ПСК – псевдокубическая, М - моноклинная (б).

Способ получения керамики, рентгенографические исследования и измерения электрофизических параметров описаны в работе [2] и в цитируемых там статьях. Образцы подвергались механической обработке, которая заключалась в резке спечённых столбиков (ø 10 мм × h 15 мм) на диски ø 10 мм и высотой (h) 1 мм. В рамках текущей работы были выбраны образцы разреза 3. Образцы не поляризованные.

Исследования проводились с использованием векторного анализатора цепей Р4М-18 "Микран". Калибровка произведена для коаксиальных нагрузок при помощи калибровочного набора 85052D. Количество выборок по частоте – 1001, уровень мощности сигнала – -20 дБ. Измерения производились с помощью микрополосковой измерительной линии (МПЛ). О степени согласования измерительной линии можно судить по графику на рис. 2. В диапазоне 10 МГц – 9 ГГц уровень обратных потерь имеет удовлетворительные ($|S_{11}|$, $|S_{22}| < -20$ дБ) значения, в связи с этим для измерений был выбран диапазон частот 10 МГц – 9 ГГц. Образцы помещались в центр МПЛ. Количество образцов – 31 шт. с равномерным распределением концентрации по *x*.

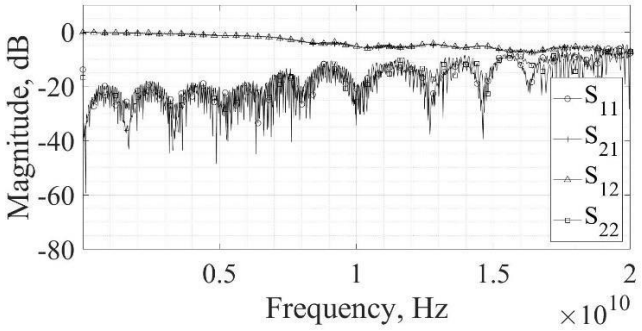


Рис. 2. S-параметры ненагруженной МПЛ в диапазоне частот 10 МГц – 20 ГГц.

Результаты и обсуждение. Результаты измерения S-параметров представлены на рис. 3 и 4.

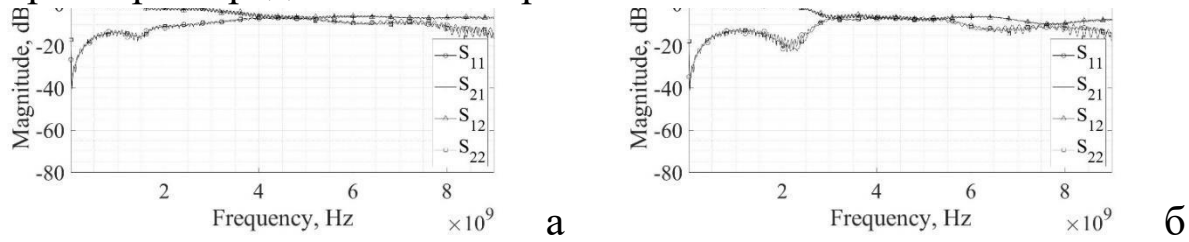


Рис. 3. S-параметры МПЛ с образцами с концентрацией PT:
x = 0,11 (а) и x = 0,5 (б).

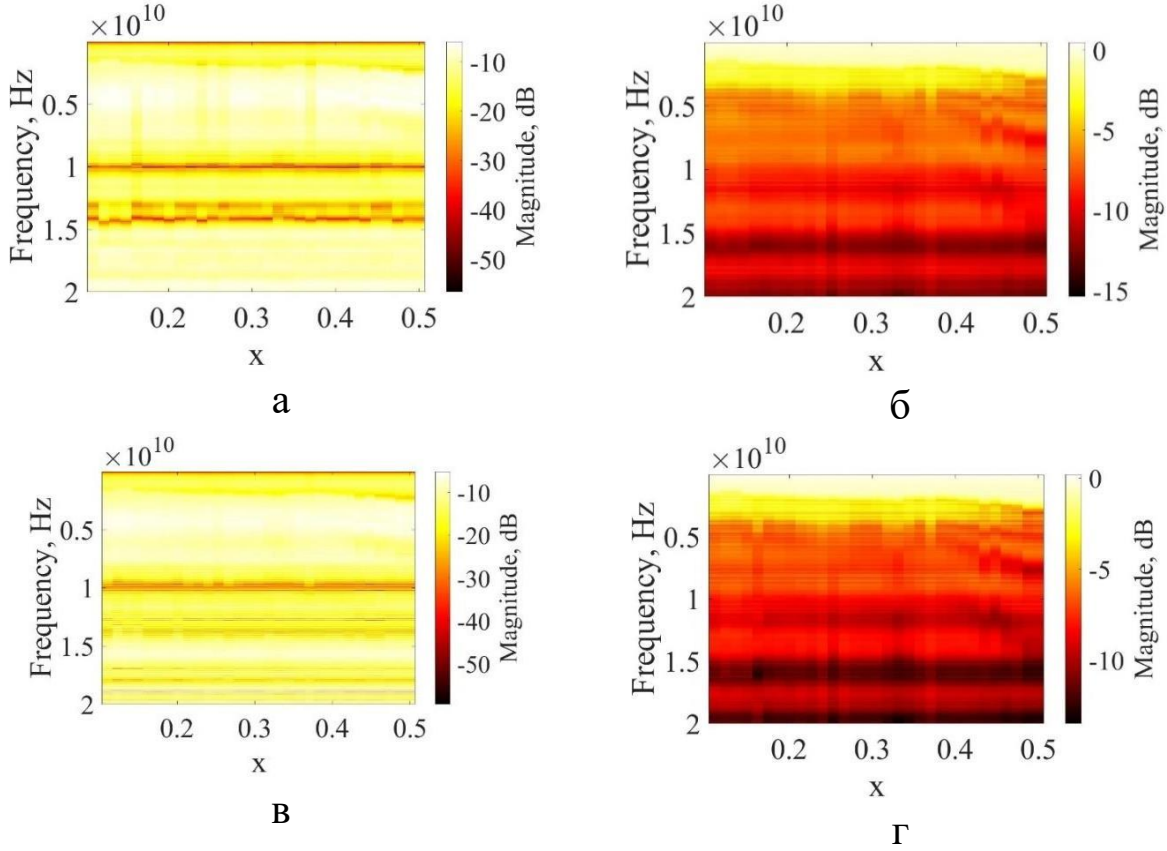
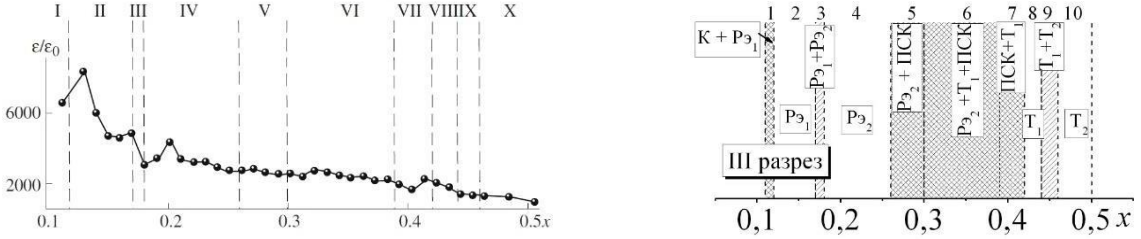


Рис. 4. Зависимости мощности СВЧ отклика от частоты и концентрации PT (S11 – (а), S21 – (б), S22 – (в), S12 – (г)).

Образец из диэлектрика в форме цилиндра представляет собой диэлектрический резонатор (ДР) и должен иметь минимумы, связанные с поглощением энергии (S_{11} и S_{22}) отраженной волны на возбуждение резонанса [3]. Эти минимумы продемонстрированы на рис. 3 (а) и 3 (б) в области частот 1 – 2,5 ГГц. Из рис. 4 видно, что резонансный минимум смещается в зависимости от концентрации *x* в область более высоких частот. Характер смещения минимума закономерно коррелирует с характером изменения относительной диэлектрической проницаемости, измеренной в работе [2] (рис. 5). Так же, в образцах с высокой концентрацией РТ можно обнаружить дополнительные резонансные минимумы в окрестностях 6,5 ГГц и 14 ГГц, судить о природе которых затруднительно в связи с несовершенством МПЛ.



а б

Рис. 5. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от концентрации РТ (а) и фазовая диаграмма (б) выбранного разреза.

Выводы

В исследуемом ТР наблюдается зависимость резонансного отклика от концентрации РТ, но о характере этой зависимости, трудно судить в связи с недостаточной точностью измерений.

Корреляций между фазовым составом и резонансным откликом не обнаружено, что тоже может быть вызвано низкой точностью измерений. Для количественной оценки влияния фазового состава на отражающую и поглощающую способность материала требуется исследование состава другими методами.

Полученные результаты помогут в разработке функциональных материалов с требуемыми характеристиками для применения их в диэлектрических резонаторах, аттенюаторах, фазовращателях и других радиоэлектронных компонентах.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ)).

Список литературы

1. A. Tagantsev, V. Sherman, K. Astafiev, J. Venkatesh and N. Setter, "Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications," *Journal of Electroceramics*, no. 11, p. 5–66, 2003

2. L. A. Reznitchenko, L. A. Shilkina, O. N. Razumovskaya, E. A. Yarovtseva, S. I. Dudkina, I. A. Verbenko, O. A. Demchenko, Y. I. Yurasov, I. N. Andryushina and A. A. Esis, "Phase equilibrium and properties of solid solutions of PbTiO3-PbZrO3-PbNb2/3Mg1/3O3-PbGeO3 system," *Inorg. Mater.*, no. 45, p. 173, 2009.

3. T. K. Ishii, Handbook of microwave technology, vol. 1, Academic press, 1995, p. 735.

Исследование оптических свойств пленок титаната стронция, выращенных на кремниевых подложках

К.М. Жидель, А.В. Павленко
Научно-исследовательский институт физики ЮФУ,
г. Ростов-на-Дону, Россия
Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия

Введение

Развитие микроэлектроники и технологии интегральных схем значительно ускорило интеграцию и миниатюризацию электронных компонентов. Большое внимание уделяется тонким пленкам функциональных материалов с точки зрения их технического применения в устройствах памяти, настраиваемых микроволновых элементах, транзисторах и датчиках [1–4]. Титанат стронция, $SrTiO_3$ (STO) — один из наиболее важных и интересных сложных оксидов со структурой типа перовскита [5]. Не деформированный STO имеет кубическую структуру (с параметром решетки a = 3,905 Å) при комнатной температуре и является немагнитным параэлектрическим зонным диэлектриком с непрямой запрещенной зоной ~3,2 эВ [6]. STO обладает высокой статической диэлектрической проницаемостью при комнатной температуре, что делает его пригодным для использования в высоковольтных конденсаторах и устройствах микроэлектроники [7]. Эпитаксиальная деформация и легирование приводит к реализации широкого диапазона физических свойств и зависимостей в пленках STO. Изучение эпитаксиальных пленок STO, выращенных на подложках Si с рассогласованной решеткой, показало сегнетоэлектрическое поведение при комнатной температуре из-за проявления эффектов деформационной инженерии [8]. В сверхрешетках с участием пленок STO также были обнаружены новые свойства [9]. Монолитная интеграция пленок STO с обычными полупроводниками, такими как кремний и германий, открывает новые возможности в полупроводниковых устройствах [10]. Однако напыление эпитаксиальных пленок STO на Si остается серь-

езной проблемой из-за образования SiO_2 на границе раздела фаз. Окисел кремния образуется уже при комнатной температуре в результате адсорбции кислорода на поверхности кремния. Этот процесс продолжается до толщин окисла порядка 10 нм [11].

В данной работе особое внимание уделялось изучению оптических свойств пленок $SrTiO_3$, выращенных на подложке Si *p*-типа, поскольку в дальнейшем система $SrTiO_3$/Si(001) послужит основой для напыления функционального слоя высокотемпературного мультиферроика, где STO будет выполнять роль буферного слоя с заранее известными параметрами.

Объекты. Методы получения и исследования образцов

Пленки STO были выращены методом ВЧ-катодного распыления мишени состава $SrTiO_3$ в атмосфере кислорода при давлении ~0.5 Тр на подложках Si *p*-типа ориентации (001). Осуществлены предварительные рентгендифракционные исследования, в ходе которых установлено, что полученные пленки являются однофазными и поликристаллическими с текстурой в направлении 001.

Эллипсометрические параметры ψ и Δ измерялись с помощью спектрального комплекса (ЭЛЛИПС-1991) на основе статической измерительной схемы. Измерения проводились в диапазоне длин волн 350−1000 нм с изменением угла падения от 45° до 70° с шагом 5°. При использовании соответствующей оптической модели, описывающей оптическую дисперсию образца и его пространственную структуру (в нашем случае пленки STO, нанесенные на *p*-Si), ЭЛЛИПС-1991 при помощи встроенного программного обеспечения «Спектроскан» позволяет определять показатель преломления n и коэффициент экстинкции k как функцию длины волны и толщины d.

Результаты и обсуждение

Чтобы извлечь n и k из измерений эллипсометрии, мы рассматривали либо однородный, либо неоднородный слой STO. В обоих случаях поверхность описывалась с использованием приближения эффективной среды Бруггемана. Оптические свойства пленок были параметризованы с помощью модели, которая поз-

воляет получить адекватные оптические константы. Подгонка модели и экспериментальных данных выполнялась с использованием стандартного алгоритма Левенберга–Марквардта. Затем было обнаружено, что неоднородная модель STO, в которой и показатель преломления, и коэффициент экстинкции зависят от глубины, значительно улучшила соответствие. Вкратце, эта модель состоит в рассмотрении пленки STO как состоящей из нескольких однородных тонких слоев, в которых изменяются параметры. Степень неоднородности изменяется путем увеличения количества этих подслоев до тех пор, пока качество подгонки не перестанет улучшаться. Большое внимание было уделено минимизации взаимной корреляции параметров.

Итоговая оптическая модель структурно состояла из: слой 1 – смесь 92% STO и 8% пустота (пористость); слой 2 – диоксид кремния SiO_2; слой 3 – подложка *p*-Si. Отметим, что для подгонки данных в программе применялись известные данные для оптических констант кристаллического кремния и оксида кремния.

На рис. 1 представлены спектры функций эллипсометрических параметров ψ и Δ исследованных образцов с результатами подгонки. Видно, что подобранная оптическая модель структуры $SrTiO_3/SiO_2/Si(001)$ позволила добиться хорошего совпадения с экспериментальными данными по спектральным характеристикам ψ и Δ и в дальнейшем определить оптические параметры слоев.

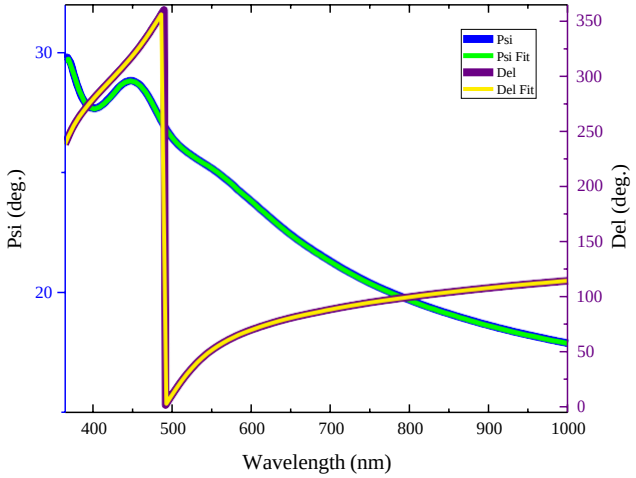


Рис. 1. Экспериментальный и рассчитанный эллипсометрические спектры для структуры STO/SiO2/Si (001) (угол падения 65°).

На рис. 2 представлены показатель преломления и коэффициент экстинкции, полученные из расчетов, как функция длины волны. Для сравнения также показаны данные, опубликованные для объемного перовскита $SrTiO_3$ [12].

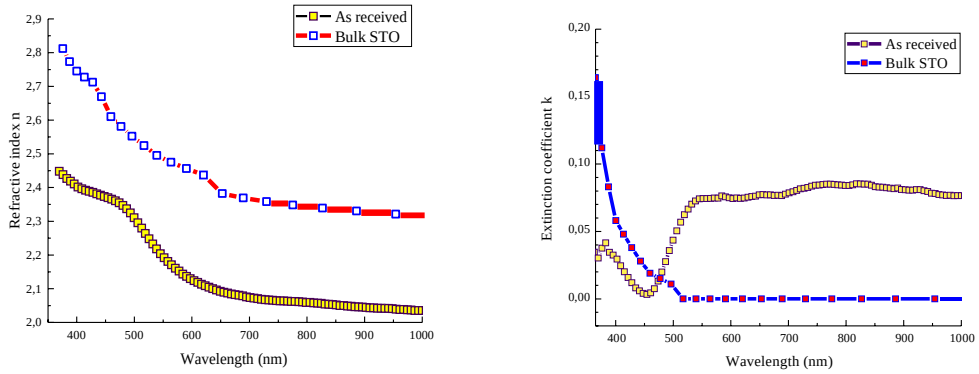


Рис. 2. Показатель преломления n и коэффициент экстинкции k как функция длины волны. Оптические характеристики объемного STO представлены для сравнения.

Как видно, показатель преломления уменьшается с увеличением длины волны. Кроме того, наши значения показателя преломления очень близки к значениям, измеренным в работах [13, 14]. Однако отличаются от таковых для объемного материала. Ухудшение оптических характеристик пленок может быть связано, как указано в [14], с тем, что оптические потери увеличиваются с увеличением количества границ зерен, а наличие взаимодиффузионного слоя между подложкой и STO, в свою очередь, приводит к неоднородности показателя преломления и наличия коэффициента экстинкции в довольно широкой области.

Выводы

Показана возможность эффективного неразрушающего исследования поверхности пленок методами спектральной эллипсометрии. Вычислены и приведены дисперсионные зависимости показателей преломления $n(\lambda)$ и экстинкции $k(\lambda)$.

Благодарности

Использовано оборудование ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ)).

Список литературы

1. Scott J.F. // Science. 2007.V. 315. No. 5814. P. 954.
2. Bian Y., Wu C., Li H., Zhai J. // Appl Phys Lett. 2014. V. 104. No. 4. P. 042906.
3. Jiang W., Wang X.D., Chen Y., Wu G.J., Ba K., Xuan N.N., Sun Y.Y., Gong P., Bao J.X., Shen H., Lin T., Meng X.J., Wang J.L., Sun Z.Z. // InfoMat. 2019. V. 1. No. 2. P. 260.
4. Yang Z.B., Wu Z.H., Lyu Y.X., Hao J.H. // InfoMat. 2019. V. 1. No. 1. P. 98.
5. Müller K.A., Burkard H. // Phys. Rev. B. V. 197919. P. 3593.
6. Cardona M. // Phys. Rev. 1965. V. 140. P. A651.
7. Robertson J. // European Phys. J.-Appl. Phys. 2004. V. 28. No. 3. P. 265.
8. Warusawithana M.P., Cen C., Sleasman C.R., Woicik J.C., Li Y., Kourkoutis L.F., Klug J.A., Li H., Ryan P., Wang L.-P. // Science. 2009. V. 324. No. 5925. P. 367.
9. Ohtomo A., Hwang H. // Nature. 2004. V. 427. No. 6973. P. 423.
10. Khan M.A., Braic L., Salik Y.A., Idriss H. // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 542. P. 148601.
11. Королёв М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Ч. 1/ М.А. Королёв, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева [и др.]. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
12. Zollner S., Demkov A.A., Liu R., Fejes P.L., Gregory R.B., Alluri P., Curless J.A., Yu Z., Ramdani J., Droopad R., Tiwald T.E., Hilfiker J.N., Wollam J.A. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2000. V. 18. P. 2242.
13. Wang Z., Kugler V., Helmersson U., Konofaos N., Evangelou E.K., Nakao S., Jin P. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 1513.
14. Gaidi M., Stafford L., Amassian A., Chaker M., Margot J., Martinu L., Kulishov M. //J. Mater. Res. 2005. V. 20. No. 1. P. 68.

Композиционные материалы гидроакустических преобразователей для экстремальных условий

Парфенов А.А., Дыкина Л.А., Гончаров М.А., Медведев С.С.
Южный Федеральный Университет, ИВТ и ПТ

Введение

В настоящее время в гидроакустических приемниках и излучателях в качестве активного элемента используются пьезокерамические изделия на основе твёрдых растворов системы цирконата титаната свинца. Отличительными особенностями данных изделий являются технологичность, невысокая стоимость производства и хорошие значения чувствительности. Недостатками пьезокерамических изделий являются ее хрупкость, высокий акустический импеданс, что зачастую требует усложнения конструкции конечного устройства. К тому же условия эксплуатации подводных аппаратов на основе пьезокерамических изделий ограничены за счет разрушающего влияния повышенного давления. Природа материала преобразователей позволяет использовать устройства на глубине не более 1500 м (15 МПа).

Современное материаловедение направлено на изучение и разработку новых функциональных материалов, обладающих сверхвысокими значениями электрофизических параметров, в частности, объемных характеристик и, при этом, способных работать в экстремальных условиях без заданных потерь. Устройства на основе таких материалов могут иметь ряд конструктивных и эксплуатационных преимуществ. Во многом, эффективность достигается за счет перехода на композиционные материалы, из которых, в последующем, изготавливаются композиционные пьезоэлектрические элементы для преобразователей. [1-3]

Распространёнными типами конструкций пьезокерамических преобразователей в гидроакустических антеннах являются цилиндрические воздухозаполненные оболочки, а также наборы плоских биморфных дисков, разделённых воздушным промежутком. Оба типа конструкций имеют жёсткие ограничения верхнего диапазона частот, так как возможности уменьшения толщины

пьезокерамических элементов весьма ограничены, так как для снижения влияния помех радиус приёмника должен быть больше длины изгибной волны. [4, 5]

В связи с вышесказанным, актуальным представляются исследования, направленные на разработку и изучение свойств перспективных пьезоэлектрических материалов, позволяющих создавать высокочувствительные приёмники объёмного типа, в которых акустическое давление воспринимается непосредственно каждым локальным участком активного элемента без необходимости введения воздушных включений и различного типа усилителей, что, в свою очередь, существенно позволит упростить конструкцию конечного изделия.

Таким образом, были поставлены *следующие цели и задачи*:

- Изготовить прототип элемента пьезоэлектрического композиционного на основе высокоэффективного пьезоэлектрического материала для гидроакустического преобразователя;
- Провести сравнение электрофизических параметров (ЭФП) изделий из монолитной пьезокерамики с полученными элементами пьезоэлектрическими композиционными.
- Провести комплексные испытания на выявление зависимости электрофизических параметров (ЭФП) элементов пьезоэлектрических композиционных при воздействии гидростатического давления эквивалентного глубоководному погружению.

Для этого были проанализированы разработанные в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ новые пьезоэлектрические материалы. Перечень перспективных материалов с их сравнительными характеристиками представлен в таблице 1.

Материал ПКП-13 имеет относительно высокие значения коэффициентов связи и пьезомодулей при этом обладая достаточно низким значением относительной диэлектрической проницаемости (в сравнении с аналогичными материалами этой группы), такие материалы находят широкое применение в электроакустических приемных преобразователях благодаря высоким значениям пьезоконстанты g_{33}, являющейся характеристикой объемной пье-

зочувствительности, для материала ПКП-13 $g_{33} = 32\ \frac{\text{В×М}}{\text{Н}} \times 10^{-3}$, в сравнение, у промышленно выпускаемого ЦТС-19 $g_{33} = 23\ \frac{\text{В×М}}{\text{Н}} \times 10^{-3}$

Таблица 1

Пьезоэлектрические материалы для акустических и гидроакустических преобразователей.

Пьезокерамические материалы на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС)									
Материал	ρ, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	T_C, °С	$\frac{\varepsilon_{33}^{\text{T}}}{\varepsilon_0}$	$tg\delta$, % (1 кГц)	K_p	$\lvert d_{31}\rvert$, $\frac{\text{пКл}}{\text{Н}}$	$\lvert d_{33}\rvert$, $\frac{\text{пКл}}{\text{Н}}$	Q_m	g_{33}, $\frac{\text{В} \times \text{М}}{\text{Н}}$
ПКП-11	7800	175	3900	2.0	0,58	228	590	100	17×10^{-3}
ПКП-12	7400	160	4950	2.0	0,66	325	660	60	15×10^{-3}
ПКП-13	7500	285	1100	2.5	0.60	139	320	80	32×10^{-3}
ПКП-31	7600	320	1100	0.3	0.58	110	250	2000	25×10^{-3}
ПКП-36	7600	290	1400	0.6	0,54	160	330	800	26×10^{-3}
Пьезоэлектрический материал на основе халькогалогенида сурьмы (ХГС)									
ХГС-3	3500	50	650	3,0	-	50	500	10	87×10^{-3}

Халькогалогенид сурьмы (сульфоиодид сурьмы – SbSI) относится к классу веществ, сочетающих сегнетоэлектрические и полупроводниковые свойства, и отличается от других сегнетоэлектриков самыми большими значениями объемных характеристик (объемной пьезочувствительности и пьезомодуля), ввиду высокой величины отношения d_{33} к ε_{33}^{T}. Таким образом, значение объёмной чувствительности, g_{33}, для ХГС-3 – $87\ \frac{\text{В×М}}{\text{Н}} \times 10^{-3}$.

На основе представленных данных можно сделать вывод о том, что изделия из материала на основе халькогалогенида сурьмы (ХГС-3) обладают существенным преимуществом по сравнению с существующими твердотельными пьезоэлектриками, имеют рекордно высокие значения электрофизических параметров и чувствительности к акустическому воздействию.

Исходя из этого, целесообразным явилось изучение свойств пьезокомпозиционных элементов на основе данного материала, а

также исследование возможности применения их в условиях повышенных гидростатических давлений.

К настоящему времени в НКТБ Пьезоприбор отработана технология изготовления элементов пьезоэлектрических композиционных на основе сульфоиодида сурьмы (халькогалогенида сурьмы – ХГС-3).

Композиционный материал на основе ХГС-3 представляет собой поликристаллическую структуру, состоящую из кристаллов сульфоиодида сурьмы (SbSI), ориентированных вдоль плоскости YZ внутри полимерной матрицы (Рис.1).

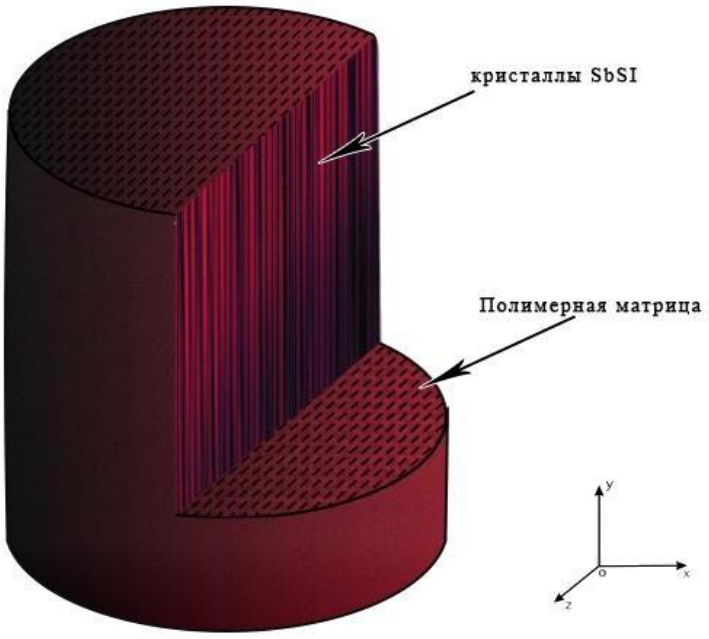


Рис. 1 – Схематическое изображение структуры композиционного материала

Элемент пьезоэлектрический композиционный на основе SbSI изготавливался методом укладки и ориентации кристаллов, выращенных методом Бриджмена-Стокбаргера в матрицу с последующей заливкой полимерным связующим. На поверхности, предусматривающие токопроводящее покрытие, методом вакуумного напыления наносили никелевый электрод. Полученный элемент представлял собой параллелепипед с геометрическими размерами (37×11×7,5) мм.

Методики исследования

Определение плотности (ρ) образцов в работе осуществлялось методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 15139-69),

В качестве жидкой среды использован октан, Плотность керамики рассчитывалась по формуле 1:

$$\rho = \frac{A}{A-B} \cdot (\rho_0 - d) + d \qquad (1)$$

где ρ_o – плотность октана, A – масса сухой заготовки, B – масса заготовки, насыщенной октаном, d – плотность воздуха.

Величину статической электрической емкости C_0 поляризованных образцов и тангенса угла их диэлектрических потерь (tgδ) определяли с помощью установки «ЦЕНЗУРКА-МА2» производства НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ в области низких частот (1000 Гц или 1 кГц). Относительную диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$) рассчитывали в автоматическом режиме установки «Цензурка-МА2» по формуле:

$$\frac{s_{33}^T}{s_0} = \frac{0{,}1129 C_0 h}{S_э} \qquad (2)$$

где h - расстояние между электродами, м

$S_э$ - площадь поверхности электрода, м^2

C_0 - статическая электрическая емкость, пФ

Измерение значения пьезомодуля d_{33} осуществлялось квазистатическим методом на установке «Piezo d_{33} Test System» (США). При квазистатическом методе измерения d_{33} пьезоэлемент (ПЭ) подвергается действию переменной механической силы с частотой намного ниже его собственных резонансных частот. Одновременно на пьезоэлемент действует одноосная статическая нагрузка. Прибор измерят заряд на электродах элемента, подвергающегося дозированному механическому воздействию.

Измерение значения объёмных характеристик M_u и M_q проводилось на установке «Паскаль 4» при воздействии звукового давления 20 Па, на частоте 63 Гц.

Объемная пьезочувствительность и объемный пьезомодуль рассчитывались по результатам измерений чувствительности к звуковому давлению по напряжению и заряду, по формулам:

$$g_v = \frac{M_u}{h} \qquad (3)$$

где Mu - чувствительность по напряжению, мкВ/Па;

h – расстояние между электродами элемента, м.

$$d_v = \frac{M_q}{S_э} \qquad (4)$$

где M_Q - чувствительность по заряду, Кл/Н;

$S_Э$ - площадь электрода, м^2.

Испытание на воздействие гидростатического давления проводились по следующей методике: у изготовленного элемента пьезоэлектрического композиционного проводился контроль параметров: C, tg и Mu по ранее описанной методике. Изготовленный элемент пьезоэлектрический композиционный запаивался в герметичную полимерную оболочку, представляющую собой тонкую плёнку. Далее элемент пьезоэлектрический композиционный помещался в камеру установки «Глубина». В камере устанавливался необходимый уровень гидростатического давления. При данном уровне гидростатического давления элемент пьезоэлектрический композиционный выдерживался 24 часа. Далее элемент пьезоэлектрический композиционный вынимался из камеры и выдерживался при нормальных условиях в течение суток, затем происходил контроль его параметров: C, tg и Mu. Далее элемент пьезоэлектрический композиционный выдерживался при нормальных условиях в течение 7 суток, затем происходил контроль его параметров: C, tg и Mu.

Проведение испытаний

Для проведения испытаний были изготовлены 10 элементов пьезоэлектрических композиционных. На них были измерены ЭФП, средние значения которых приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Средние значения полученных образцов

C, пФ	$tg\delta$, %	M_u, $\frac{\text{мкВ}}{\text{Па}}$	M_q, $\frac{\text{фКл}}{\text{Па}}$	D_{33}, $\frac{\text{пКл}}{\text{Н}}$	ρ, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
361	2,1	590	211	590	3,4

Исходя из измеренных значений рассчитаны по формулам (2,3,4) относительная диэлектрическая проницаемость, объемная пьезочувствительность (g_v) и объемного пьзомодуль (d_v). Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты вычислений параметров полученных образцов

$\frac{\varepsilon_{33}^{T}}{\varepsilon_0}$	$g_v, \frac{В \times М}{Н}$	$d_v, \frac{пКл}{Н}$
751	78×10^{-3}	518×10^{-12}

На одном из полученных образцов были проведены испытания на воздействие гидростатического давления 10 МПа по ранее описанной методике. Результаты испытания представлены на рисунке 2.

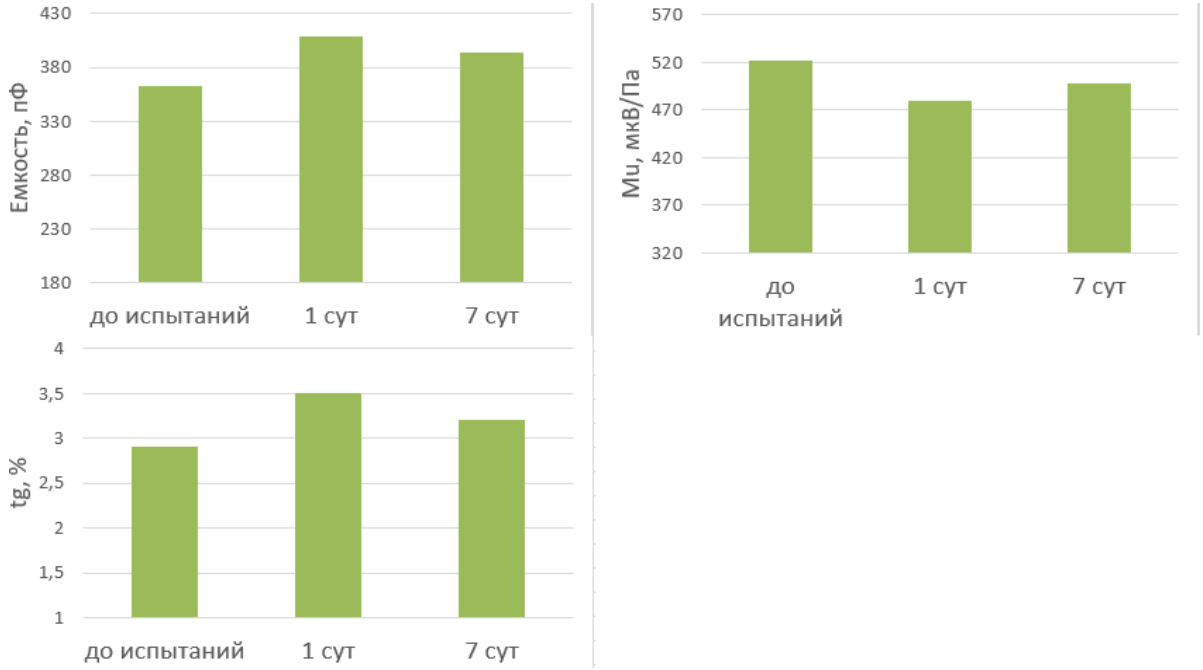


Рис. 2 – Изменение параметров в результате воздействия давления 10 МПа

Как видно из данных, представленных на рисунке 2, элементы пьезоэлектрические композиционные сохраняют высокие значения чувствительности после воздействии гидростатического давления 10 МПа.

Следующий шаг исследования заключался в увеличении гидростатического давления до 30 МПа. Результаты испытания представлены на рисунке 3.

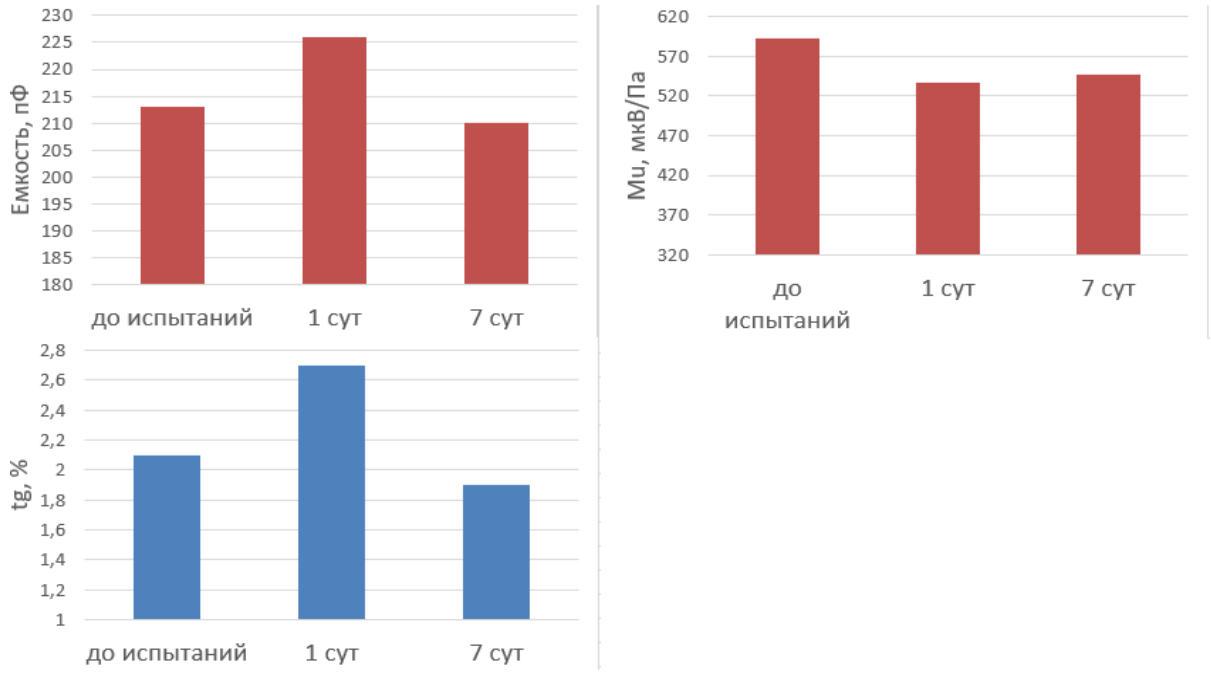


Рис. 3 - изменение параметров в результате воздействия давления 30 МПа

Элементы пьезоэлектрические композиционные также сохранили значения чувствительности, что послужило продолжению дальнейшего эксперимента.

Следующий шаг исследования заключался в увеличении гидростатического давления до 60 МПа. Результаты испытания представлены на рисунке 4.

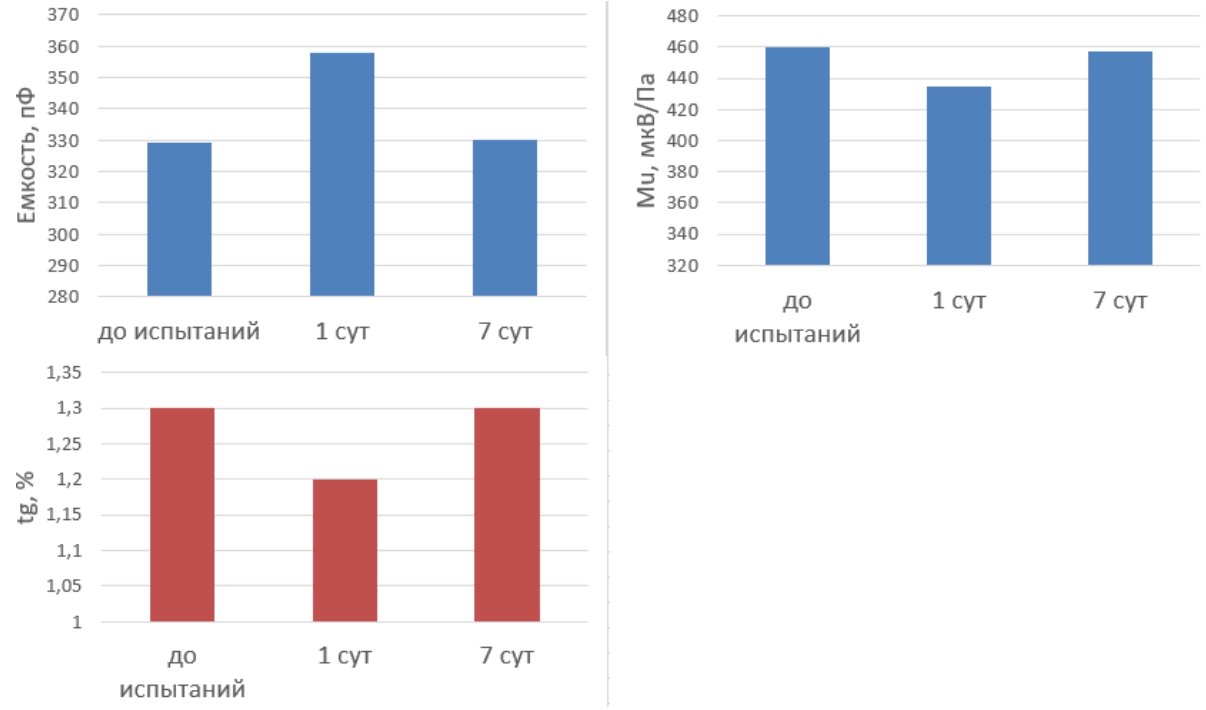


Рис. 4 - изменение параметров в результате воздействия давления 60 МПа

Из полученных данных следует вывод о том, что элементы пьезоэлектрические композиционные сохраняют рекордные значения чувствительности и после воздействия гидростатического давления 60 МПа, что делает возможным использование их на глубинах до 6000 м.

Заключение.

Таким образом, проведенная работа позволила выявить потенциальную возможность использования преобразователей на основе элементов пьезоэлектрических композиционных из пьезоматериала ХГС-3 в глубоководных гидроакустических системах с сохранением сверхвысоких параметров.

Список литературы

[1] Физическая акустика. Том 1.Методы и приборы ультрозвуковых исследований, часть А [Текст]/Под ред. У. Мезона. — М.: Издательство Мир - москва 1966.

[2] Нестеров, А.А. [Текст]: Труды международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» / Т.Г. Лупейко, А.А. Нестеров - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского гос. ун-та, 1999.- т.1,-с.254-261.

[3] Нестеров, А.А. [Текст]: Сборник трудов «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий» / Флик Е.А., Масуренков К.С.- Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2006.- с. 200-204.

[4] Нестеров, А.А. Зависимость объемных пьезохарактеристик керамики на основе легированного PbTiO3 от способа получения исходной шихты / А.А. Нестеров, А.Ю. Копытин // Фундаментальные проблемы функционального материаловеденья, пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий.- 2005.-№7.- С. 102-104.

[5] Megaw H. D. Crystal Structures: a working approach. Philadelphia, Saunders. 1973. 533 p.

Метод увеличения объёмно-чувствительных параметров высокопористой пьезокерамики

К.т.н. Е.В.Карюков, А.Ю.Малыхин, А.А. Парфёнов,
С.С. Медведев, д.т.н. проф. А.А. Панич, Н.А. Гирагосова
Южный Федеральный Университет, ИВТ и ПТ

В качестве чувствительных элементов приемников звука при построении гидроакустических антенн традиционно используют как плотную пьезокерамику, так и композиционные пьезоматериалы. Частным случаем композиционных материалов является пористая пьезокерамика. Высокая эффективность, возможность в широких пределах варьировать свойствами и микроархитектурой материала, а также технологичность вызывают растущий интерес к пористой пьезокерамике и пьезопреобразователям (ПП) на её основе. К недостаткам пористых пьезокомпозитов можно отнести низкую механическую прочность керамического каркаса по сравнению с плотной керамикой. Этот недостаток позволяет эффективно использовать ПП на глубинах, не превышающих 1000 метров.

Как известно, пористая пьезокерамика может иметь как открытые, так и закрытые поры. Чем выше общая пористость керамического каркаса чувствительного пьезоэлемента, тем выше удельная доля пористости открытого типа [1, 2].

С ростом открытой пористости возрастают объемно-чувствительные характеристики пьезокомпозита. Вследствие этого наибольший практический интерес представляют пористые композиты с пористостью выше 30-40%. Пористость выше 65% практически не применима в связи с низкой механической прочностью получаемого каркаса.

В данной работе мы уделили внимание такому аспекту производства пористой пьезокерамики как формирование токопроводящего слоя на поверхности пористого каркаса. Известные методы – нанесение серебросодержащей пасты или магнетронное напыление ведут к проникновению токопроводящего слоя в толщу керамики. Это приводит к уменьшению эффективной рабочей

высоты пьезокомпозита, и, как следствие, недостаточно высокой объёмной чувствительности к акустическому давлению по напряжению M_u и его удельной объёмной чувствительности g_v, а также к повышенному расходу серебросодержащей пасты, разбросу параметров. При изготовлении чувствительных элементов в соответствии с классической технологией серебросодержащая паста, используемая при нанесении электродов, проникает в открытые поры вглубь керамического каркаса, а формирующийся металлический электрод после спекания полностью повторяет морфологию поверхности керамического каркаса. При этом глубина проникновения серебросодержащей пасты связана с величиной общей пористости: чем выше пористость, тем глубже проникает серебросодержащая паста вглубь пористого керамического каркаса элемента. Для образования качественного электрода, пригодного к пайке, необходимо нанесение 2-3 слоев пасты на заготовки с пористостью 30-40% и 3-4 слоя на заготовки пористостью выше 40%, что приводит к повышенному расходу драгметалла.

Техническим результатом настоящей работы является увеличение объёмной чувствительности пьезокомпозитного элемента к звуковому давлению по напряжению M_u и его удельной объёмной чувствительности g_v за счет увеличения эффективной рабочей высоты и уменьшения расхода серебросодержащей пасты.

Указанный технический результат достигается тем, что при изготовлении композитных чувствительных пьезоэлементов с пористостью 20-60% на стадии нанесения электродов на торцевые поверхности с последующим вжиганием серебросодержащей пасты, было произведено дополнительное покрытие закупоривающим поры подслоем. В качестве такого подслоя использовались эластичный органический полимер (наилучший результат достигнут для образцов с пористостью 20-40%) или стеклокерамика (наилучший результат достигнут для образцов с пористостью более 40%). В случае использования подслоя из органического полимера образцы подвергались сушке и полимеризация при 105°C в течение 1 часа. В случае формирования подслоя из стеклокера-

мики образцы подвергались термической обработке при 600 °С в течение 30 минут. Далее на оба вида образцов наносился токопроводящий серебросодержащий слой.

Создание тонкопленочного подслоя из органического полимера или стеклокерамики перед нанесением серебросодержащей пасты выравнивает поверхностные открытые поры и сглаживает поверхность, что препятствует проникновению серебросодержащей пасты вглубь пористого керамического каркаса.

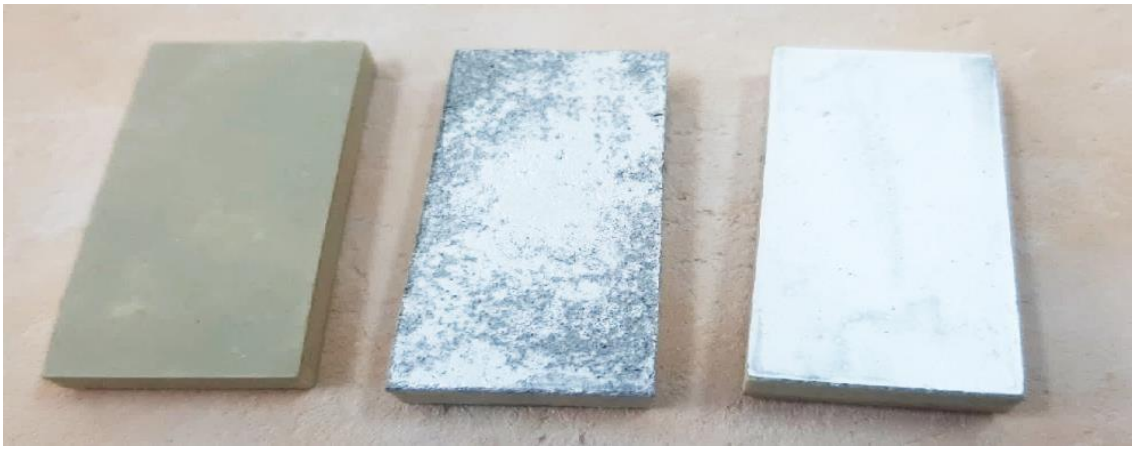


Рис. 1. Различные способы нанесения электродов, слева-направо: пористый каркас без покрытия, пористый каркас покрытый серебром, пористый каркас, покрытый серебром с органическим подслоем

При вжигании серебросодержащей пасты, слой органического полимера полностью выгорает с переходом в газообразные соединения при температуре выше 400°С. Использование слоя органического полимера позволяет получить электроды при нанесении 1-2 слоев серебросодержащей пасты на пористые каркасы с пористостью 20-40% и двух слоев с пористостью выше 40%, что приводит к экономии драгметалла. Эффективность данного метода снижается при пористости керамического каркаса выше 40% в связи с тем, что для эффективного сглаживания пор требуется большее количество органического полимера, который при выгорании может повредить формируемый электропроводный слой. Это, в свою очередь, ведет к снижению адгезии серебра к керамике (Рис. 2). При работе с образцами пористостью выше 40% превосходных результатов удалось добиться, используя закупоривающий подслой из стеклокерамики. Данный метод более трудоёмкий, подразумевает дополнительные технологические

операции: изготовление и измельчение стеклокерамики, изготовление пластичной пасты на ее основе, вторичную термообработку для формирования монолитного стеклокерамического слоя при закупоривании пор.

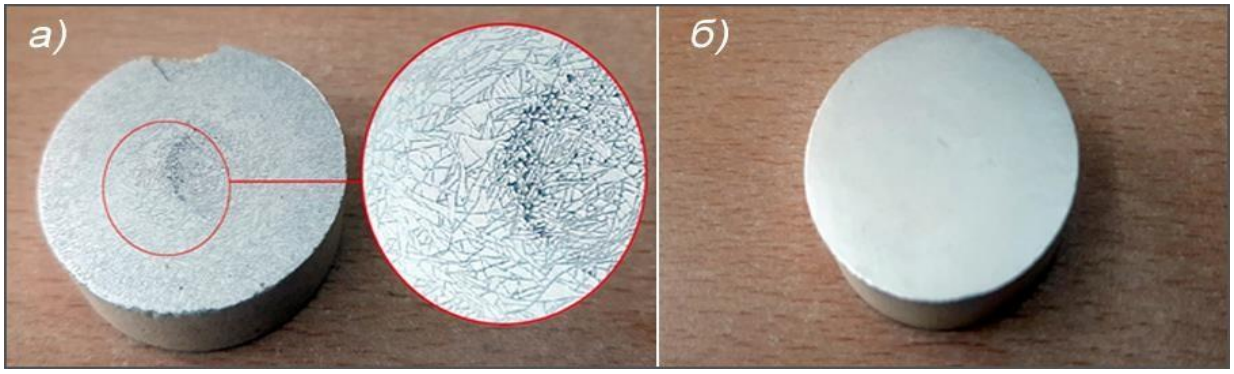


Рис. 2. а) Нарушение электрода вследствие низкой адгезии серебра, вызванной чрезмерным количеством органического полимера на подслое. б) Пористый пьезокомпозит с подслоем из стеклокерамики

Эффективность применения разработанных нами методов демонстрирует таблица 1.

Таблица 1.

Зависимость объёмной чувствительности по напряжению Mu пьезоэлемента из материала ПКП-13 диаметром 12мм, высотой 5мм и 9мм от пористости керамического каркаса и типа нанесенного подслоя.

Пористость керам. каркаса, %	Тип подслоя	Образцы высотой 5мм		Изменение M_u, %	Образцы высотой 9мм		Разность M_u, %
		M_u, мкВ/Па	$g_v \cdot 10^3$, мкВ·м/Н		M_u, мкВ/Па	$g_v \cdot 10^3$, мкВ·м/Н	
40	Без подслоя	201	40	-	374	41	-
50		381	76	-	696	77	-
60		520	104	-	956	103	-
40	Органический полимер	219	44	9	388	45	4
50		434	87	14	744	86	7
60		615	125	18	1070	121	12
40	Стеклокерамика	217	43	8	387	45	3
50		441	89	16	758	87	9
60		628	129	21	1116	124	17

Заключение

Как следует из таблицы 1, композитные чувствительные пьезоэлементы, изготовленные разработанными нами методами, превосходят по чувствительности по напряжению M_u контрольные образцы на 3-9% при пористости керамического каркаса 40% и на 12-21% при пористости керамического каркаса 60%. При этом максимальный эффект достигается для высокопористых образцов и в тех случаях, когда потеря высоты эффективного слоя пьезокомпозита наиболее критична.

Установлено, что оба представленных метода с использованием органического полимерного и стеклокерамического подслоя имеют значительные преимущества перед классической технологией нанесения токопроводящего слоя. При этом наиболее рациональным является использование метода с органическим купирующим подслоем при пористости пьезокерамического каркаса 20-40% и метода со стеклокерамическим подслоем при пористости каркаса более 40%.

Источники

1. А.А. Нестеров, А.А. Панич, С.Н. Свирская, А.Ю.Малыхин, А.В. Скрылёв, Е.А. Панич – Способы формирования микроструктуры пористых пьезокерамических каркасов, Инженерный вестник Дона №3 (2012).

2. Newnham R.E., Composite elektroceramics // Ferroelectrics. 1986. V.68. pp. 1-32.

3. Радченко Г.С., Скрылев А.В., Малыхин А.Ю., Панич А.А. Усиление пьезоэлектрических и диэлектрических свойств и макроскопическая релаксация зарядового и полевого отклика в 0− 3 композитах //Журнал технической физики.– №88 (2).– 2018.

4. Шевцова М. А. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук «Конечно-элементное моделирование эффективных свойств пористых пьезоэлектрических материалов и устройств на их основе» – Ростов-на-Дону – 2014. – С. 86-98.

5. Пористые пьезокомпозиционные материалы на основе пьезокерамики ПКП-12 / Е. В. Карюков, А. А. Панич, В. К. Доля [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 7.

6. А. В. Нагаенко, А. А. Нестеров, Е. А. Панич Управление электрофизическими параметрами пьезоматериалов путем создания многокомпонентных керамических композитов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 396-399.

Исследование свойств пьезокерамического материала ПКП-35 в широком интервале температур

А.Ю. Малыхин[1], Г.М. Акбаева[1], А.И. Бурханов[2], А.В. Сопит[2], М.А. Гончаров[1]

[1]Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

e-mail представляющего автора: malyhin@sfedu.ru

[2]Волгоградский технический университет, 400074, Волгоград, Россия

Введение

В настоящей работе рассматривается влияние температуры на электрофизические параметры пьезокерамического материала ПКП-35, выпускаемого в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ. ПКП-35 представляет собой твёрдый раствор на основе системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), модифицированный различными добавками.

Целью работы явилось изучить влияние температурного воздействия в интервале от -40 до +400°С. Изучены зависимости скорости звука, коэффициента затухания, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и пьезомодуля d_{31} от температуры.

Данное исследование продиктовано растущими потребностями аэрокосмической отрасли, машиностроения, медицинского приборостроения.

Эксперимент

В ходе выполнения эксперимента по определению температурных зависимостей пьезокерамического материала ПКП-35 собран измерительный стенд, состоящий из климатической камеры Tira Mini TTC 4002 и аппаратуры Цензурка-МА2.1. В измерительную камеру помещалась державка с измеряемым элементом, устанавливалась температура. С целью исключения образования влаги внутри измерительной камеры помещался контейнер с предварительно высушенным при 105°С силикагелем. Державка подключалась к аппаратуре через термоизоляционный разъём.

Ёмкость и диэлектрические потери проводов и державки компенсировались средствами автоматической калибровки аппаратуры Цензурка МА-2.1. В интервале температур от -40 до +150°С измерения производились на созданном стенде. При температуре выше 150°С измерения производились на установке Аттолл-3М производства НКТБ «Пьезоприбор». Зависимость относительной диэлектрической проницаемости и пьезомодуля d_{31} от температуры приведена на Рис.1.

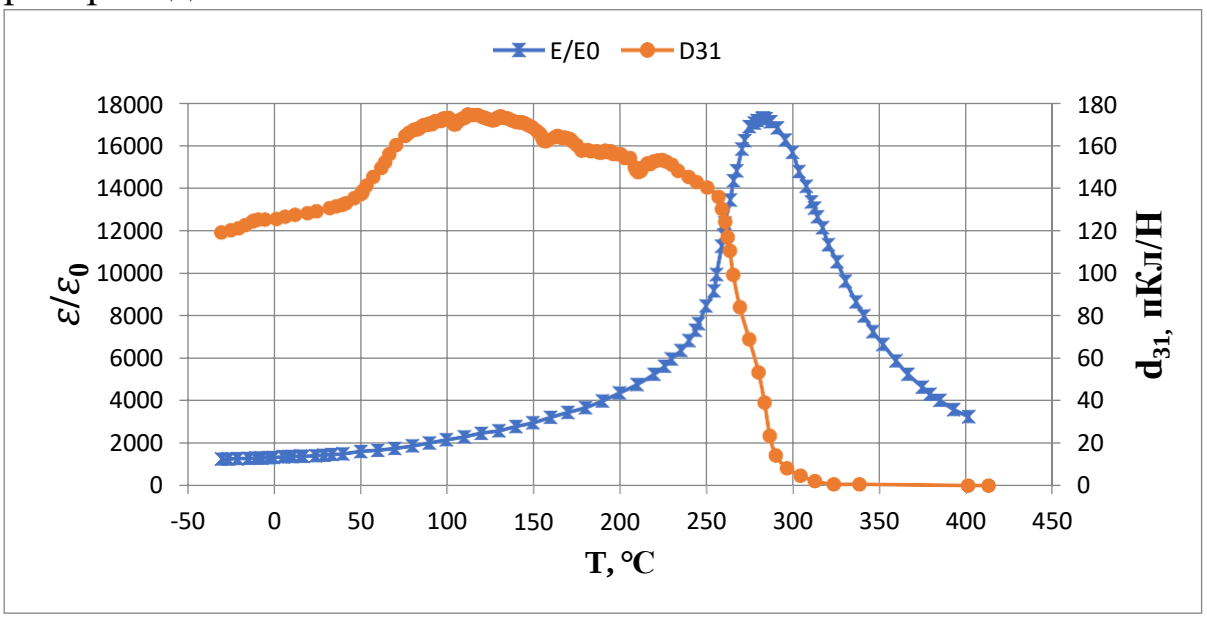


Рис.1 – График зависимостей относительной диэлектрической проницаемости и пьезомодуля d31 от температуры

Вид графиков зависимости диэлектрической проницаемости и пьезомодуля от температуры характеризует высокий рабочий диапазон керамики ПКП-35. Перегиб кривой $\varepsilon/\varepsilon_0(T)$ в районе 280 °С соответствует литературным данным [1]. Для изучения работы пьезоэлектрических преобразователей, выполненных из материала ПКП-35 в ультразвуковом частотном диапазоне (100 кГц) получены графики зависимости скорости звука и коэффициента затухания от температуры (Рис. 2,3).

При достаточно линейной зависимости в диапазоне температур 20-220°С, скорость звука экспоненциально растёт при температуре выше 240 °С. Аналогичная динамика наблюдается на графике зависимости коэффициента затухания от температуры (Рис. 3).

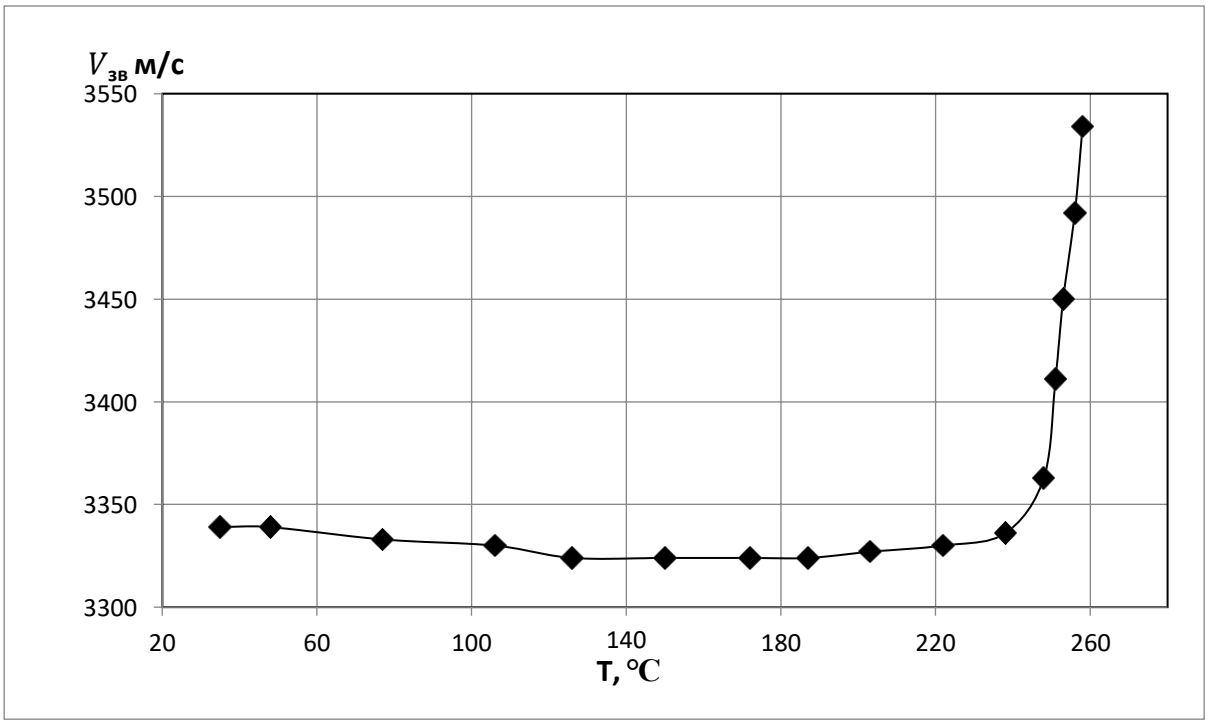


Рис.2 – Зависимость скорости звука от температуры пьезоматериала ПКП-35

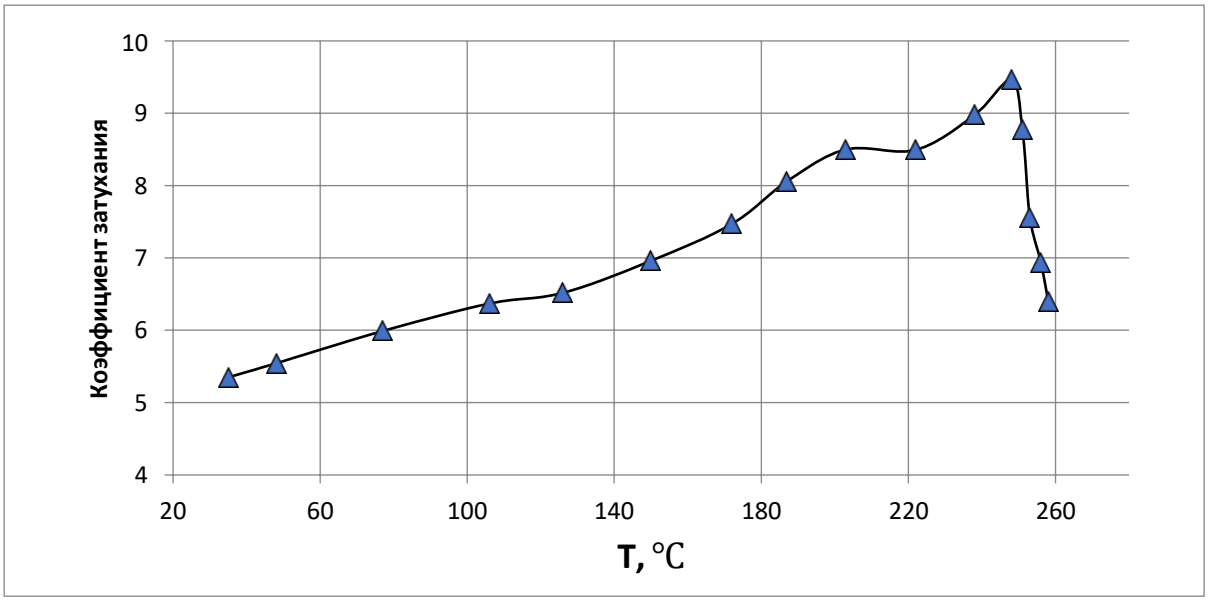


Рис.3 – зависимость коэффициента затухания от температуры пьезоматериала ПКП-35

Заключение

В результате данного исследования получены температурные зависимости электрофизических параметров пьезокерамического материала ПКП-35. В диапазоне от -40 до +400℃ изучена динамика изменения диэлектрической проницаемости и пьезомодуля d_{31}. Получены зависимости скорости звука и коэффициента затухания в диапазоне от 20 до 260℃.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о высокой стабильности свойств пьезокерамики ПКП-35, выпускаемой в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ.

Измерения, выполненные в рамках данной работы, получены с применением оборудования ЦКП «Высокие технологии».

Литература

1. Малыхин А.Ю., Нестеров А.А., Панич А.Е. «Особенности механических характеристик сегнетожесткого материала ПКП-35 при использовании в условиях силового ультразвука» // Материалы XIV всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий», г. Москва, 2019

2. Прилипко, Ю.С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии / Ю.С. Прилипко – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 492с.

3. А. Ю. Малыхин, А. А. Панич «Пьезокерамический материал ПКП-35 для мониторинга окружающей среды и средств неразрушающего контроля» // Системы контроля окружающей среды - 2019 : Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Севастополь, 12–13 сентября 2019 года. – Севастополь: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Институт природно-технических систем”, 2019. – С. 53.

4. Нагаенко, А. В. Пьезоэлектрики. Основные параметры и технология получения : Учебное пособие / А. В. Нагаенко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2021. – 104 с. – ISBN 9785907361348.

5. Фесенко Е.Г., Данцингер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. Ростов-на-Дону.: Из-во РГУ. 1983.

Исследование электрической прочности пьезокерамических материалов системы ЦТС

Дыкина Л.А., Малыхин А.Ю., Гореленко К.А., Алексюнин Е.С., д.т.н. проф. Панич А.А.
Южный Федеральный Университет, ИВТ и ПТ

Одним из важнейших параметров при построении высоковольтных пьезоэлектрических преобразователей является электрическая прочность керамики - $E_{пр.}$ От этой величины зависит работоспособность устройства в сильных электрических полях. Целью данной работы является определение электрической прочности нескольких составов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), выпускаемых в НКТБ «Пьезоприбор» и условно разделяемые на сегнетомягкие и сегнетожесткие [1-2].

В качестве объектов исследования выбраны пьезокерамические материалы ЦТС-19, ПКП-12 и ПКП-35. Согласно отраслевому стандарту [3], определение электрической прочности производится на испытательной установке, обеспечивающей плавный подъём напряжения со скоростью не более 500 В/с. Испытания образцов производят в конденсаторном масле по ГОСТ 5775-85. В настоящем исследовании вместо конденсаторного масла была взята полисилоксановая жидкость ПЭС-5, по своим характеристикам превосходящая конденсаторные масла. Электрическая прочность вычисляют по формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

где $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение, В;

h – толщина образца в месте пробоя.

В качестве исследуемых образцов изготовлены диски диаметром 30 мм и толщиной 2 мм.

В таблице 1 приведены характеристики исследуемых пьезокерамических материалов.

Таблица 1.

Характеристики исследуемых пьезокерамических материалов

Параметр	Материал		
	ЦТС-19	ПКП-12	ПКП-35
$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_{0}$	1622-1770	4800-4950	1250-1400
$tg\delta$, %	1,5-1,6	2,1-2,3	0,55-0,6
$-d_{31}$, *пКл/Н*	124-148	325-330	147-152
d_{33}, *пКл/Н*	325-377	660-680	335-340
K_p	0,55	0,66	0,58
K_{31}	0,31	0,38	0,34
K_{33}	0,67	0,70	0,65
Q_m	80	60	750-860
σ_p	0,38	0,34	0,3
Тс, ^{o}C	290	150	280
V_1^E, *м/с*	3000-3070	2770-2810	3250-3310
V_3^D, *м/с*	3920	3700	3851
ρ, *кг/м*^{3}	7500	7400	7650

В ходе выполнения исследования по определению электрической прочности выбранных материалов, на образцы плавно подавалось напряжение. Контроль скорости подъёма регулировался вручную. Начальная температура окружающей среды и образцов составляла +21℃. Эксперимент предполагал также получение температурных зависимостей величины $E_{\text{пр}}$. Для этого после проведения серии измерений пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ для каждого выбранного материала, заранее подготовленные новые образцы нагревались вместе с жидкостью ПЭС-5, выдерживались на целевой температуре 10 минут, после чего на образец плавно подавалось электрическое напряжение до пробоя. Напряжение пробоя фиксировалось, после чего серия экспериментов продолжалась на следующей температурной точке. Результаты, полученные в ходе эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Электрическая прочность исследуемых элементов

Материал	$E_{пр}$, В/мм				
	20°C	50°C	75°C	100°C	150°C
ЦТС-19	6250	5880	4710	4450	4140
ПКП-12	5450	4350	4200	4150	4000
ПКП-35	7850	5950	6000	6250	4950

Графическое представление зависимости $E_{пр}(T)$ представлено на Рис.1.

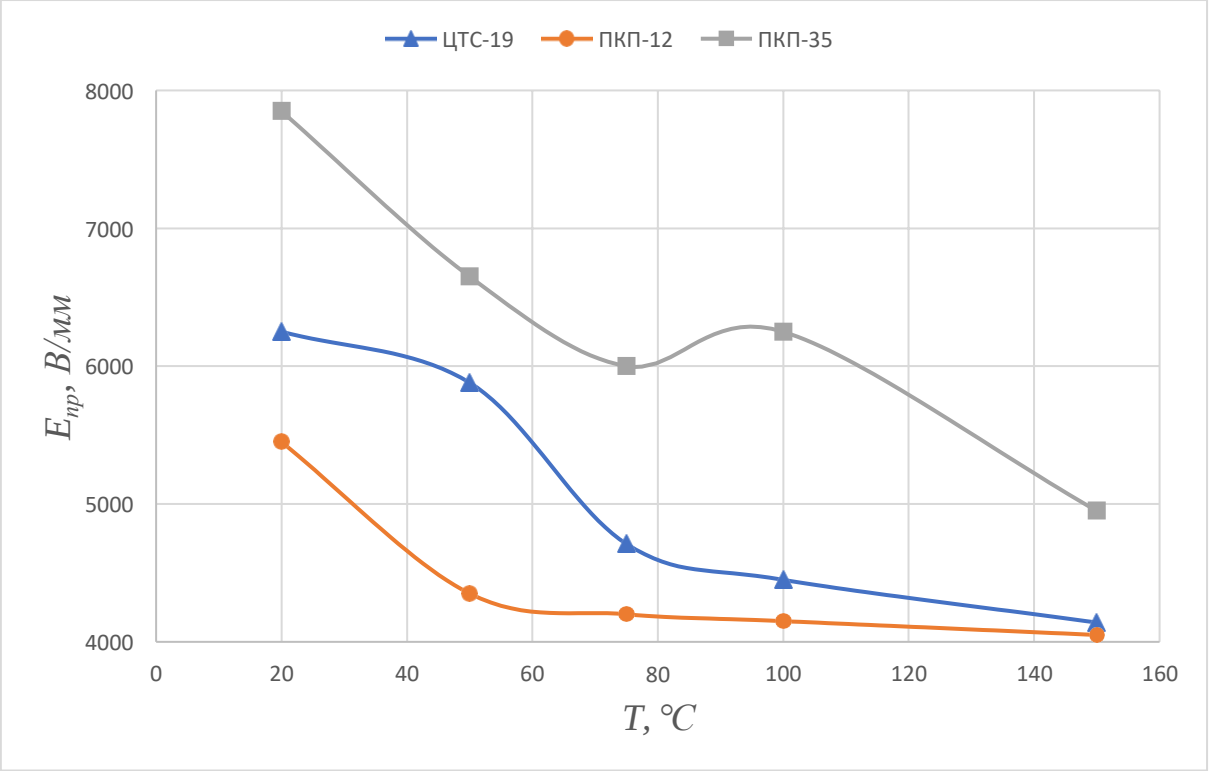


Рис.1 – зависимость электрической прочности от температуры пьезоматериалов ЦТС-19, ПКП-12, ПКП-35

Процесс электрического пробоя керамики в каждом случае сопровождался растрескиванием испытуемого образца. Эпицентр практически всегда находился в центре элемента, а трещины распространялись по направлению к краям. После растрескивания образца возникала электрическая дуга в нескольких точках вдоль одной из трещин, в том сегменте, который оставался под полем на момент образования пробоя. Внешний вид образца во время и

после пробоя, а также его микроструктура проиллюстрированы на Рис.2. На снимке участка, расположенного в области прохождения дуги заметны аморфные области без ярко выраженных зёренных границ. Такая структура вызвана оплавлением керамики вследствие локального нагрева. Под оплавленной коркой (Рис 2, а) отчётливо видна структура зёрен, характерная для ЦТС-керамик и соответствующая по гранулометрическому составу снимку, сделанному в соседней от пробоя области (Рис. 2, б).

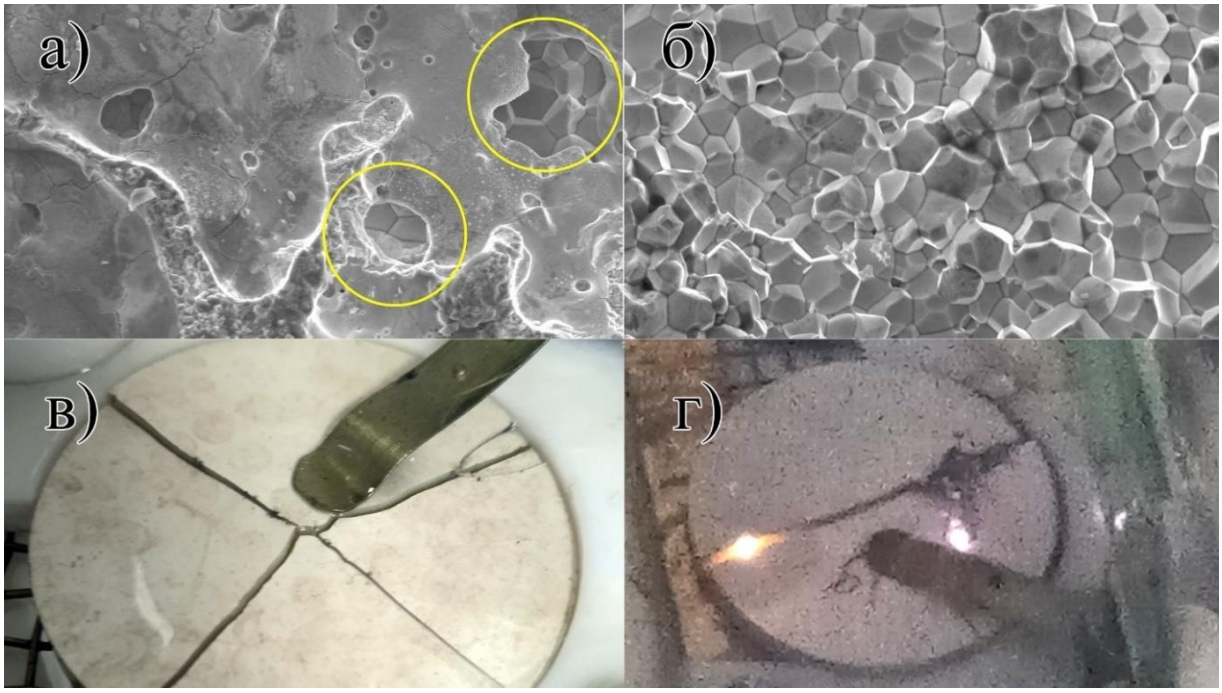


Рис.2 – Микроструктура образца после электрического пробоя: а) в области прохождения дуги; б) на изломе; и внешний вид образца: в) после пробоя; г) в момент образования электрической дуги.

Заключение

В ходе выполненной работы получены зависимости электрической прочности пьезокерамических материалов ЦТС-19, ПКП-12 и ПКП-35 от температуры в диапазоне 20-150°С. Полученные данные согласуются с имеющимися в литературе представлениями о применяемых сегнетожёстких и сегнетомягких пьезоэлектриках. Настоящее исследование имеет практическую ценность при моделировании электромеханических преобразователей и устройств, работающих в условиях сильных электрических полей.

Источники

1. Скрылев, А. В. Исследования композиционного пьезоматериала, как основы активных элементов пьезогенераторов / А. В. Скрылев, Л. А. Дыкина, А. А. Панич // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : СБОРНИК ДОКЛАДОВ VI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 08–09 октября 2020 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2020. – С. 72-79.

2. Малыхин А.Ю., Нестеров А.А., Панич А.Е. «Особенности механических характеристик сегнетожесткого материала ПКП-35 при использовании в условиях силового ультразвука» // Материалы XIV всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий», г. Москва, 2019

3. Отраслевой стандарт №110444-87: Материалы пьезокерамические

4. Плетнев, П. М. Достижения и прогрессивные методы совершенствования функциональных керамических материалов / П. М. Плетнев, И. И. Рогов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 17. – С. 232-244.

5. Особенности технологии изготовления пьезоэлектрических преобразователей / А. И. Екимов, Н. А. Амельченко, Ю. А. Филиппов, В. Д. Утенков // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 4. – С. 79-83.

6. A. V. Skrylev, A. I. Burkhanov, G. M. Akbaeva & L. A. Dykina (2019) Electrophysical and mechanical properties of PZT-based soft ferroelectric material in wide range of temperatures // Ferroelectrics, 538:1, 146-153, DOI: 10.1080/00150193.2019.1569997

7. Каталог пьезокерамических материалов и элементов НКТБ «Пьезоприбор» // Ростов-на-Дону, 2020, https://ivtipt.ru/pm

8. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. М.: Энергия, 1976, 336 с.

9. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972, 288 с.

Люминесцентные свойства Al-замещенных $BaFe_{12}O_{19}$

Р.З. Мехдиева, А.И. Маммадов, С.Г. Джабаров, Р.Э. Гусейнов
Институт Физики НАНА, Баку, Азербайджан

В последнее время возрос интерес к исследованиям бариевых ферритов с гексагональной структурой ($BaFe_{12}O_{19}$) и твердых растворов на их основе, допированных различными концентрациями ионов (Al, Ga, In и др.) [1-3]. Интерес связан с широким спектром физических явлений, наблюдаемых в этих соединениях: структурные фазовые переходы различной природы; сегнетоэлектрические и ферримагнитные состояния; химическое, зарядовое и орбитальное упорядочение ионов; магнетоэлектрический эффект [4,5]. Благодаря этим свойствам бариевые гексаферриты являются перспективными материалами в качестве ферримагнетиков, мультиферроиков, микроволновых материалов [2].

Из ранних исследований известно, что в кристаллах $BaFe_{12}O_{19}$ не наблюдаются фотолюминесцентные особенности. Кристаллы $BaAl_{12}O_{19}$ легированные различными редкоземельными элементами являются люминофорным материалом для белых световых диодов [6-9]. В кристаллы добавлением в качестве примесей Mn и Tb, в зеленой области наблюдаются максимумы излучения и это показывает, что эти максимумы появляются в связи с внутриатомным переходом элементов Mn и Tb [6]. Исследования кристаллов $BaAl_{12}O_{19}$, легированных Eu, показывают, что в голубой области наблюдается излучение ($4f^{6}5d - 4f^{7}$) 444 нм за счет внутриатомного перехода Eu [9]. При повторном отжиге кристалла резко возрастает интенсивность пика излучения и надвигается 438 нм. В кристаллах $BaAl_{12}O_{19}$ легированных Eu в области 375–600 нм, наблюдается широкий люминесцентный спектр, где в значениях 438 нм, 462 нм, и 511 нм имеют место три максимума [9].

Несмотря, что многие физические особенности $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ исследованы, их люминесцентные свойства изучены недостаточно. В представленной работе, впервые изучены люми-

несцентные особенности поликристаллов $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ в интервале $x = 0.1 \div 1.2$ при комнатной температуре.

Поликристаллические образцы $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ (x = 0.1; 0.3; 0.6; 0.9 и 1.2) были получены из оксидов Fe_2O_3, Al_2O_3 марки «ЧДА» и карбоната $BaCO_3$, взятых в соответствующих пропорциях. Исходные составы подвергались синтезирующему обжигу на воздухе при 1473 K (6 ч), а затем спекались при 1573 K (6 ч). После спекания образцы медленно охлаждались (~100 K/ч).

Рентгеновская дифракция образцов проведена на D8 Advance порошковый дифрактометр (Bruker) со следующими параметрами: 40 кВ, 40 мА, Cu Kα излучения (λ = 1.5406 Å). Обработка рентгеновских дифракционных данных осуществлялась с помощью программы FullProf [10,11].

При нормальном условии дифракционные спектры соответствуют гексагональной кристаллической структуре с пространственным типом симметрии $P6_3/mmc$, что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее [12]. Результаты уточнения кристаллические структуры приведены в таблице 1. С увеличением содержания ионов алюминия наблюдается уменьшение значение элементарной ячейки. Такое поведение объясняется замещением ионов Fe^{3+} с большим ионным радиусом (r = 0.645 Å) ионами Al^{3+}, ионный радиус которых меньше (r = 0.535 Å) [13]. Атомы кислорода, вместе с атомами железа и замещающего его атомами алюминия создают октаэдры $Fe(1)/Al(1)O_6$, $Fe(4)/Al(4)O_6$, $Fe(5)/Al(5)O_6$, бипирамиды $Fe(2)/Al(2)O_5$ и тетраэдры $Fe(3)/Al(3)O_4$.

Таблица 1.

Параметры кристаллической решетки $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ (x = 0.1–1.2) при комнатной температуре.

Концентрация					
X	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2
Параметры решетки					
a* = *b	5.8899(2)	5.8854(1)	5.8846(1)	5.8809(2)	5.8700(2)
C	23.1972(6)	23.1756(5)	23.1719(3)	23.1686(9)	23.1268(9)

В качестве источников возбуждения, использованы лазеры с длиной волны 375 нм и 435 нм. Эксперименты проведены при комнатной температуре. Известно, что в кристаллах $BaFe_{12}O_{19}$ не наблюдается люминесценция, поэтому можем сказать, что причиной появления люминесцентных особенностей в кристаллах $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ является внедрение атомов Al. С повышением концентрации Al в интервале x = 0.1-1.2 в кристаллах наблюдается усиление излучения. Это явление происходит с повышением концентрации атомов, поглощающих свет и создающих люминесценцию.

Лазером с длиной волны 375 нм, в голубой области наблюдаются максимумы относительно слабого излучения в 420 нм, 444 нм и 470 нм (Рис. 1). Максимумы, имеющие место при значениях 444 нм, 470 нм наблюдаются также и в кристаллах $BaAl_{12}O_{19}$ легированных Eu [14,15]. Из этого следует, что связывать эти максимумы только с переходами Eu или Al неправильно, и связаны они со структурой самого кристалла $BaAl_{12}O_{19}$. В чистых кристаллах дополнительно наблюдаются относительно широкие два соединенных пика. Совпадение максимума излучения, происходящего при 444 нм перехода Eu и со своим максимумом кристалла, происходит в результате заполнения атомами Eu мест дефектов в кристаллах. И все это становится причиной для сужения пиков, повышения интенсивности и как следствие потери дополнительного пика в 420 нм.

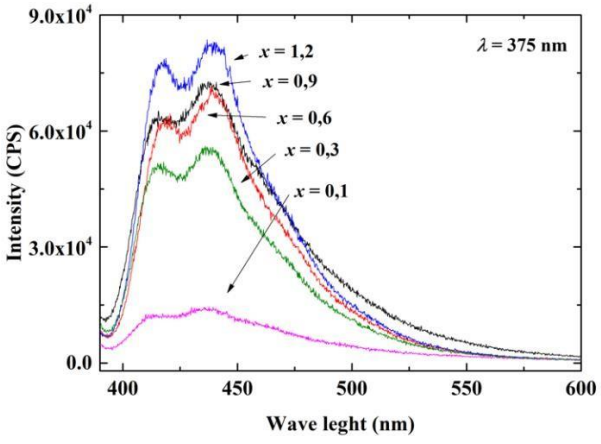


Рис. 1. Спектры люминесценции соединений BaFe12–xAlxO19 (x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 и 1.2), возбужденных лазером с длиной волны λ = 375 нм.

При возбуждении длиной волны 435 нм, в ультрафиолетовой области наблюдается два максимума в 355 нм и 380 нм (Рис. 2), связанное с антистоксовой [13] люминесценцией в этом кристалле.

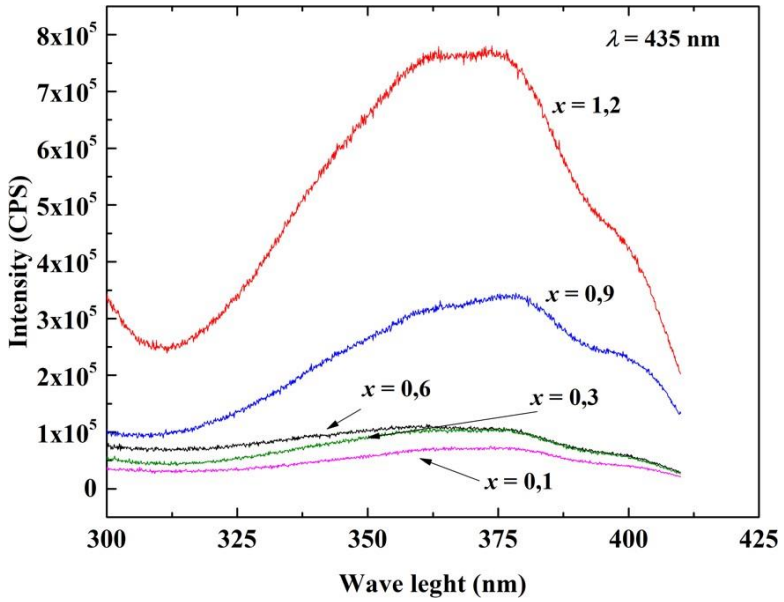


Рис. 2. Спектры люминесценции соединений BaFe12–xAlxO19 (x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 и 1.2), возбужденных лазером с длиной волны λ = 435 нм.

Таким образом, в кристаллах $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$ (x = 0.1-1.2) проведено возбуждение лазером с длиной волны 375 нм и 435 нм, изучены их люминесцентные особенности. Из полученных люминесцентных спектров видно, что с замещение магнитных ионов Fe^{3+} диамагнитными ионами Al^{3+}, интенсивность спектров возрастает. При возбуждении лазером с длиной волны 435 нм, в ультрафиолетовой области наблюдалась антистоксовая люминесценция.

Список литературы

1. R.E. Huseynov, A.I. Mammadov, R.Z. Mehdiyeva, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, T.P. Hoang, N.T. Dang, S.H. Jabarov. Journal of the Korean Physical Society. 74, 584 (2019).

2. S.H. Jabarov, International Journal of Modern Physics B. 32, 1850303 (2018).

3. A.V. Trukhanov, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, S.H. Jabarov, V.V. Korovushkin, S.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova. Ceramics International. 43 Номер 15 Страницы 12822-12827

4. S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, I.S. Kazakevich, A.M. Balagurov. Journal of Alloys and Compounds. 417, 130 (2016).

5. А.В. Труханов, С.В. Труханов, В.Г. Костишин, Л.В. Панина, М.М. Салем, И.С. Казакевич, В.А. Турченко, В.В. Кочервинский, Д.А. Кривченя. ФТТ, 59(4), 721 (2017).

6. V.R. Panse , N.S. Kokode, S.J. Dhoble. Chem. Bio. Phy. Sci. Sec. B. 14(4), 3736 (2014).

7. Singh, Vijay, Chakradhar, R P S and Rao, J L and Ko, Ilgon and Kwak, Ho-Young. Journal of Luminescence. 130(4), 703 (2010).

8. D. Ravichandran, S.T. Johnson, S.E.R. Roy, W.B. White. 19, 197 (1999).

9. L. Сяо, M. Он, Y. Tian, Y. Chen, T. Каракия, W. Li, Y. Ce, L. Чжан. J. Nanosci Nanotechnol. Mar. 10(3), 2131(2010).

10. A.M. Balagurov. Neutron News. 16(3), 8 (2005).

1. [1]1. J. Rodriguez-Carvajal. Physica B. 192, 55 (1993).

11. А.В. Труханов, Н.Т. Данг, С.В. Труханов, С.Г. Джабаров, И.С. Казакевич, А.И. Маммадов, Р.З. Мехдиева, В.А. Турченко, Р.Е. Гусейнов. ФТТ. 58, 961 (2016).

12. Л.Т. Бугаенко, С.М. Рябых, А.Л. Бугаенко. Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия. 49(6), 363 (2008).

13. E.W. Gorter. Proc. IEEE Suppl. 104B, 225 (1957).

14.A. Jaboski. Nature. 131, 839 (1933).

Пьезоэлектрические свойства и родственные параметры композитов типа 0–3 на основе перовскитовых сегнетопьезокерамик

Асп. А.Н Исаева, д.ф.-м.н., проф. В.Ю Тополов,
студ. П.А Абрамов.
Физический факультет, Южный федеральный университет,
344090, Ростов-на-Дону, Россия

Множество пьезотехнических и других применений пьезоактивных композитов и желание создать новые материалы с высокими параметрами обусловливают необходимость проведения прогнозирования эффективных свойств и других характеристик композитов [1]. На протяжении последних десятилетий наиболее распространенными пьезоактивными композитами являются материалы «сегнетопьезокерамика (СПК) – полимер» со связностями 1–3, 2–2, 0–3, 3–3 [1, 2]. Цель настоящей работы – исследование эффективных пьезоэлектрических свойств и связанных с ними параметров приема композитов типа 0–3 на основе СПК. При этом в качестве СПК выбраны составы со структурой типа перовскита на основе $Pb(Zr, Ti)O_3$.

Композит типа 0–3 (рис. 1) представляет собой систему изолированных СПК включений, окруженных протяженной полимерной матрицей. При этом матрица может быть либо монолитной (в 0–3-композите), либо пористой (в 0–3–0-композите) [2, 3]. Композиты с подобной системой сильно вытянутых СПК включений, ориентированных вдоль оси поляризации OX_3, обычно получают с помощью электрофореза [2]. Сфероидальная форма СПК включения (см. рис. 1) в системе координат $(X_1X_2X_3)$ описывается уравнением $(x_1 / a_1)^2 + (x_2 / a_2)^2 + (x_3 / a_3)^2 = 1$, где $a_1 = a_2$, и аспектное отношение включения определяется как $\rho = a_1 / a_3$. Центры СПК включений занимают узлы простой тетрагональной решётки с единичными векторами, параллельными осям OX_k (см. рис. 1). Форма изолированной поры (см. вставку 2 на рис. 1) характеризуется уравнением $(x_1 / a_{1p})^2 + (x_2 / a_{2p})^2 + (x_3 / a_{3p})^2 = 1$, где $a_{1p} = a_{2p}$, а аспектное отношение поры $\rho_p = a_{1p} / a_{3p}$. Центры пор в

полимерной среде находятся в узлах простой тетрагональной решётки с

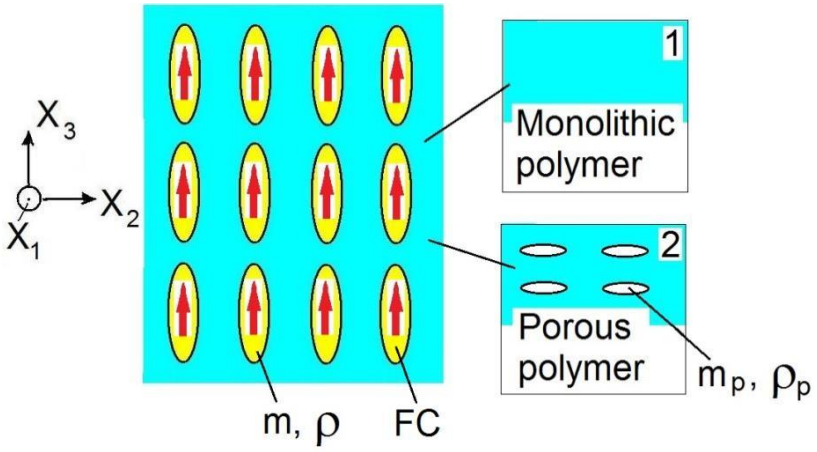


Рис. 1. Схематическое изображение композита типа 0–3 [3].

($X_1X_2X_3$) – прямоугольная система координат, m – объемная концентрация СПК, ρ – аспектное отношение (отношение длин полуосей) сфероидального СПК включения, m_p – объемная концентрация воздушных пор в полимерной матрице, ρ_p – аспектное отношение сфероидальной поры. Стрелкой показано направление вектора остаточной поляризации $\boldsymbol{P}_r^{(1)}$ СПК включения единичными векторами, параллельными OX_k. Линейные размеры каждой поры считаются существенно меньшими, чем наименьшая ось СПК включения. Поверхностные заряды, обусловленные поляризацией $\boldsymbol{P}_r^{(1)}$ СПК включения, полностью компенсируются свободными носителями заряда в среде между компонентами композита.

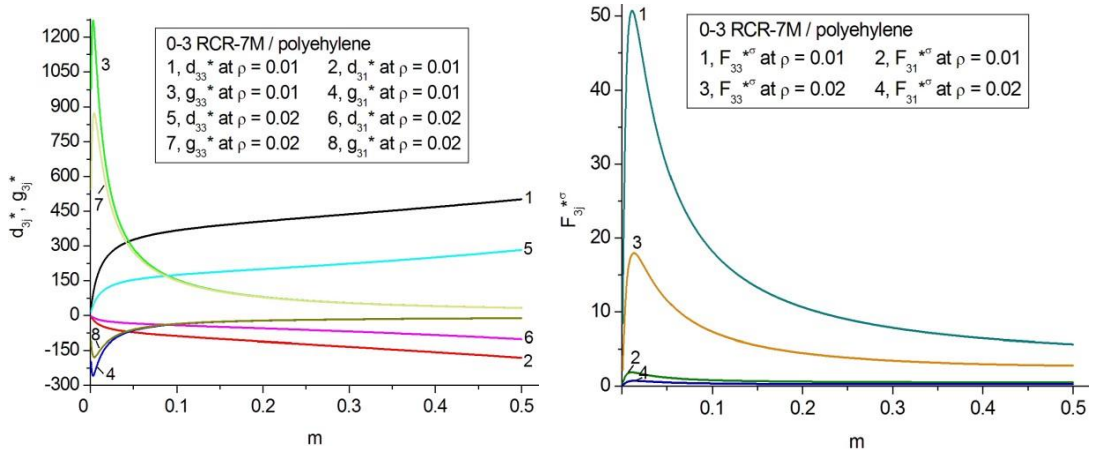
Для определения концентрационных зависимостей эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических свойств композитов со сфероидальными СПК включениями (рис. 1) используется метод эффективного поля (МЭП) [1–3]. Эффективные свойства пористой полимерной матрицы определяют в рамках приближения dilute approach [4], не учитывающего взаимодействий между изолированными порами. Проведено сравнение полученных в рамках МЭП расчетных данных с результатами расчетов по методу эффективной среды (МЭС) [1]. Экспериментальные значения упругих, пьезо- и диэлектрических констант СПК ПКР-7М и полиэтилена при комнатной температуре взяты из работ [1, 2].

В работе проанализировано поведение эффективных пьезомодулей d_{3j}^*, пьезокоэффициентов $g_{3j}^* = d_{3j}^* / \varepsilon_{33}^{*\sigma}$ (j = 1; 3) и связанных с ними модифицированных параметров приема

$$F_{3j}^{*\sigma} = L_{3j}^* (Q_{3j}^*)^2 \quad (1)$$

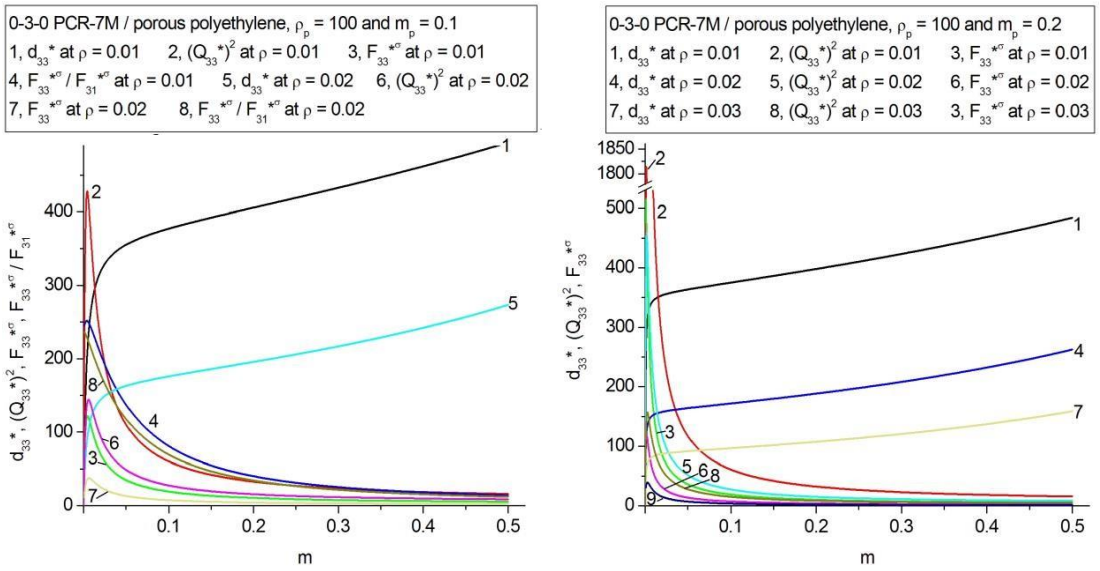
композитов типа 0–3. Модифицированные параметры приема $F_{3j}^{*\sigma}$ из (1) позволяют оценить эффективность преобразования механической энергии в электрическую при воздействии на образец постоянного механического напряжения [5]. В формуле (1) $L_{3j}^* = [(k_{3j}^*)^{-1} - ((k_{3j}^*)^{-2} - 1)^{1/2}]^2 / (k_{3j}^*)^2$, k_{3j}^* – коэффициенты электромеханической связи, $(Q_{3j}^*)^2 = d_{3j}^* g_{3j}^*$ – традиционные параметры приема [1, 5].

На рис. 2, 3 представлены концентрационные зависимости эффективных параметров, рассчитанных для исследуемых композитов в рамках МЭП. Отмечается достаточно быстрое уменьшение по модулю d_{3j}^* и g_{3j}^* при m = const с увеличением аспектного отношения СПК включения ρ от 0.01 до 0.02, см. рис. 2, а. Наблюдаемое уменьшение d_{3j}^* и g_{3j}^* влечет за собой уменьшение параметров приема $(Q_{3j}^*)^2$ и $F_{3j}^{*\sigma}$ из формулы (1). Пример уменьшения $F_{3j}^{*\sigma}$ показан на рис. 2, б. Наличие экстремумов g_{3j}^* и $F_{3j}^{*\sigma}$ при $m << 1$ (см. рис. 2)



а б

Рис. 2. Концентрационные зависимости пьезокоэффициентов d3j* (а, в пКл / Н) и g3j* (а, в мВ.м / Н) и модифицированных параметров приема F3j*σ (б, в 10-12 Па-1) 0–3-композита «СПК ПКР-7М – полиэтилен» при ρ = const



а б

Рис. 3. Концентрационные зависимости пьезомодуля d33* (в пКл / Н), параметров приема (Q33*)2 и F33*σ (в 10-12 Па-1) и фактора анизотропии F33*σ / F31*σ 0–3–0-композита «СПК ПКР-7М – пористый полиэтилен» с сильно сплющенными порами (ρp = 100) при пористости матрицы mp = 0.1 (а) и mp = 0.2 (б) обусловлено сильным влиянием диэлектрических и упругих свойств полимерной матрицы на пьезоэффект и параметры приема композита, что приводит к комбинированию свойств [1].

Формирование пористой структуры внутри полимерной среды способствует увеличению ряда параметров 0–3–0-композита при m = const (см. рис. 3) по сравнению с параметрами родственного 0–3-композита. Данные рис. 3 показывают, что в присутствии матрицы с сильно сплющенными порами (при ρ_p = 100) наблюдается заметное возрастание параметров приема $(Q_{33}^*)^2$ и $F_{33}^{*\sigma}$ при значительном факторе анизотропии $F_{33}^{*\sigma} / F_{31}^{*\sigma}$. Этот эффект проявляется наиболее отчетливо в области $m << 1$, т.е. при больших объемных концентрациях пористой полимерной матрицы.

Как следует из таблицы 1, наблюдается согласие между параметрами, определенными с помощью МЭП и МЭС. Различия между численными

Таблица 1.

Эффективные параметры, рассчитанные для 0–3-композита «СПК ПКР-7М – полиэтилен» в рамках МЭП и МЭС

ρ	m	Расчеты по МЭП				Расчеты по МЭС			
		d_{33}^*, пКл / Н	d_{31}^*, пКл / Н	g_{33}^*, мВ·м / Н	$(Q_{33}^*)^2$, 10^{-12} Па$^{-1}$	d_{33}^*, пКл / Н	d_{31}^*, пКл / Н	g_{33}^*, мВ·м / Н	$(Q_{33}^*)^2$, 10^{-12} Па$^{-1}$
0.01	0.05	327	–72.6	289	94.6	334	–75.0	298	99.5
	0.10	367	–88.4	154	56.6	384	–88.0	163	62.6
	0.30	437	–134	53.7	23.5	481	–147	57.1	27.5
0.05	0.05	35.3	–7.96	210	7.41	36.2	–8.13	218	7.89
	0.10	43.4	–10.6	131	56.9	46.8	–11.1	133	62.2
	0.30	61.6	–19.1	51.3	3.16	68.0	–21.1	53.4	3.63

Значениями данных параметров возрастают с увеличением объемной концентрации СПК m при аспектном отношении СПК включения ρ = const или с уменьшением ρ при m = const. В обоих случаях такие изменения приводят к увеличению пьезоактивности композита, т.е. к возрастанию $|d_{3j}^*|$. Это означает усиление электромеханического взаимодействия между СПК включениями в композите (см. рис. 1). В заключение отметим, что вследствие достаточно высоких значений g_{33}^*, $F_{3j}^{*\sigma}$, а также благодаря большой анизотропии d_{3j}^*, g_{3j}^* и $F_{3j}^{*\sigma}$ исследованные композиты типа 0–3 представляют интерес для сенсорных и энергосберегающих применений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90163.

Список литературы

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

2. Khanbareh H., Topolov V.Yu., Bowen C.R. Piezo-particulate composites. Manufacturing, properties, applications.– Cham: Springer Nature, 2019.– 160 p.

3. Isaeva A.N., Topolov V.Yu. // J. Adv. Diel.– 2021.– Vol.11, N 2.– P. 2150010-9 p.

4. Dunn M.L., Taya M. // J. Amer. Cer. Soc.– 1993.– Vol.76, N 7.– P. 1697–1706.

5. Roscow J.I., Pearce H., Khanbareh H. et al. // Eur. Phys. J. Special Topics.– 2019.– Vol. 228, N 7.– P. 1537–1554.

Пьезоэлектрические и энергосберегающие параметры новых композитов типа 1–3 на основе кристаллов PMN–*x*PT

А.Н. Исаева, В.Ю. Тополов, Б.О. Проценко
Физический факультет ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

В последнее десятилетие возрос интерес к пьезоактивным композитам на основе кристаллов релаксоров-сегнетоэлектриков $(1 - x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - xPbTiO_3$ (PMN–*x*PT) или $(1 - y)Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - yPbTiO_3$ (PZN–*y*PT) [1] благодаря уникальным электромеханическим свойствам данных кристаллов в области морфотропной фазовой границы. Наиболее распространенными связностями данных композитов являются 2–2 и 1–3. Однако в литературе имеются ограниченные данные по трехкомпонентным композитам с элементами связностей 2–2 и 1–3 [2, 3]. В настоящем сообщении мы рассмотрим примеры эффективных пьезоэлектрических свойств и связанных с ними энергосберегающих параметров новых композитов типа 1–3 на основе полидоменных кристаллов PMN–*x*PT, поляризованных вдоль направления [001] перовскитовой ячейки.

Рассматриваемый композит представляет собой систему параллельных кристаллических стержней, регулярно распределенных в протяженной полимерной слоистой матрице (рис. 1). Вектор спонтанной поляризации каждого стержня $\boldsymbol{P}_s^{(1)} \parallel OX_3$ (см. вставку 1 на рис. 1), и OX_3 является осью поляризации композита в целом. Центры симметрии оснований стержней образуют простую квадратную сетку в горизонтальной плоскости, а слои полимеров в матрице (см. вставку 2 на рис. 1) регулярно чередуются вдоль OX_3. Данный композит характеризуется связностью 1–2–2, а его эффективные электромеханические свойства зависят от объемных концентраций m и m_s (см. рис. 1). Для определения эффективных свойств на первом этапе матричный метод [1] применен к 2–2-матрице, где проводится усреднение по m_s, на втором этапе – к структуре типа 1–3 (усреднение по m). Отметим, что результаты расчетов эффективных свойств по матричному методу хорошо согласуются с результатами, полученными по методу конечных элементов [2].

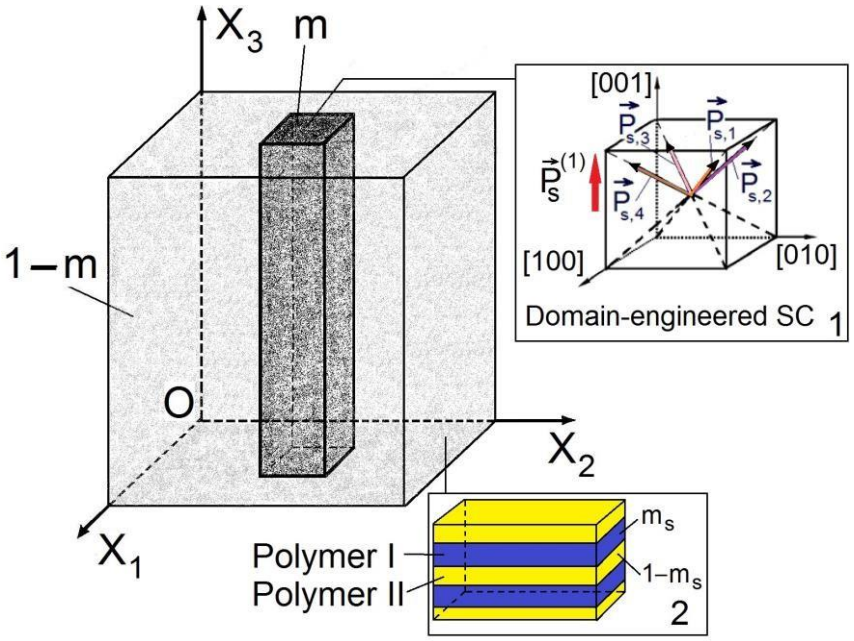


Рис.1. Схематическое изображение 1–2–2-композита [3]. m_s – объемная концентрация полимерного компонента-1 (более жесткого полимера) внутри матрицы, m – объемная концентрация кристаллического компонента.

Для 1–2–2-композитов «полидоменный кристалл PMN–*x*PT – аральдит – полиэтилен» при $x = 0.28 \ldots 0.33$ определены концентрационные зависимости эффективных пьезомодулей d_{3j}^*, пьезокоэффициентов $g_{3j}^* = d_{3j}^*/\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ ($j = 1; 3$), фактора анизотропии $\zeta_d^* = d_{33}^*/d_{31}^* = g_{33}^*/g_{31}^*$ и параметров приема, связанных с энергосберегающими применениями. Для оценки эффективности работы пьезоэлектрического материала в качестве сенсора или актюатора, а также для определения отношения «сигнал / шум» используют традиционные параметры приема [1, 2]

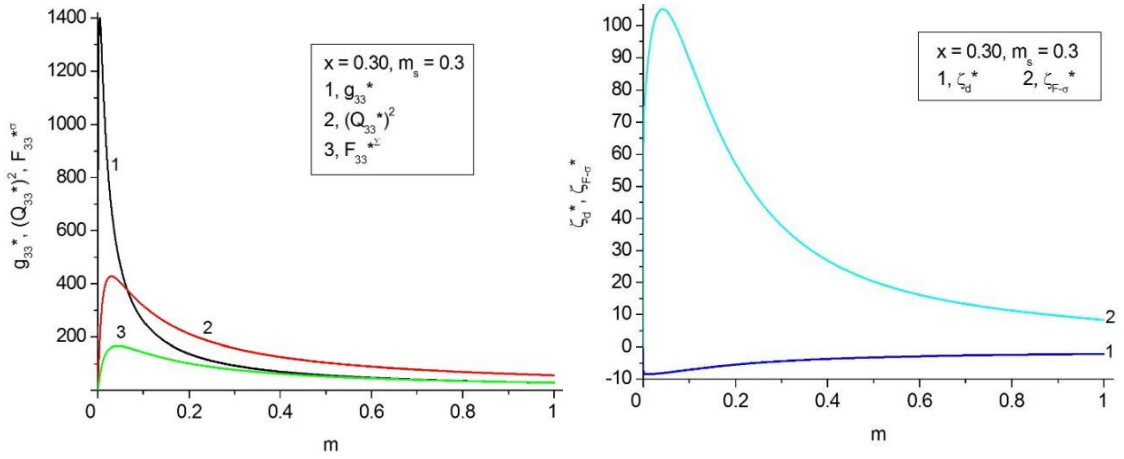
$$(Q_{3j}^*)^2 = d_{3j}^* g_{3j}^*. \qquad (1)$$

Эффективность преобразования механической энергии в электрическую под действием постоянного механического напряжения можно оценить с помощью модифицированных параметров приема [4]

$$F_{3j}^{*\sigma} = L_{3j}^* (Q_{3j}^*)^2 \qquad (2)$$

и фактора анизотропии $\zeta_{F\text{-}\sigma}^* = F_{33}^{*\sigma}/F_{31}^{*\sigma}$. В формуле (2) $L_{3j}^* = [(k_{3j}^*)^{-1} - ((k_{3j}^*)^{-2} - 1)^{1/2}]^2 / (k_{3j}^*)^2$, k_{3j}^* – коэффициенты электромеханической связи, а параметры приема $(Q_{3j}^*)^2$ определяются согласно формуле (1). Экспериментальные значения электромеханических констант компонентов взяты из работ [1, 2].

Примеры концентрационных (m) зависимостей ряда эффективных параметров композитов при m_s = const представлены на рис. 2. В таблице 1 приведены значения параметров, связанных с продольным пьезоэффектом в композитах, а также факторы анизотропии при x = 0.28 … 0.33. Немонотонное поведение g_{33}^*, $(Q_{33}^*)^2$ и $F_{33}^{*\sigma}$ (см. рис. 2, а) обусловлено существенным влиянием диэлектрических свойств полимерной матрицы на данные параметры в области концентраций $m << 1$. Максимум фактора анизотропии $\zeta_{F\text{-}\sigma}^*$ (см. рис. 2, б) наблюдается также при $m << 1$, причем на параметры приема $F_{3j}^{*\sigma}$ из (2) и их анизотропию $\zeta_{F\text{-}\sigma}^*$ оказывают заметное влияние и диэлектрические, и упругие свойства матрицы. Данные таблицы 1 показывают, насколько существенно влияние пьезомодуля $d_{33}^* \sim 10^3$ пКл/ Н на пьезокоэффициент g_{33}^* и параметры приема $(Q_{33}^*)^2$ и $F_{33}^{*\sigma}$ при фиксированных концентрациях m и x. Несмотря на удаление состава PMN–xPT от морфотропной фазовой границы, например, при x = 0.28 мы не наблюдаем значительного уменьшения g_{33}^*, $(Q_{33}^*)^2$ и $F_{33}^{*\sigma}$ по сравнению с аналогичными параметрами родственных композитов из таблицы 1. Факторы анизотропии композитов ζ_d^* и $\zeta_{F\text{-}\sigma}^*$, как следует из таблицы 1, проявляют малую чувствительность к изменениям молярной концентрации x при m = const.



а б

Рис. 2. Концентрационные зависимости пьезокоэффициента g33* (а, в мВ.м/ Н), параметров приема (Q33*)2 и F33*σ (а, в 10-12 Па-1) и факторов анизотропии ζd* и ζF-σ* (б) 1–2–2-композита «полидоменный кристалл PMN–0.30PT – аральдит – полиэтилен» при ms = 0.3

Таблица 1. Эффективные параметры 1–2–2-композитов «полидоменный кристалл PMN–*x*PT – аральдит – полиэтилен» при m_s = 0.3 и m = 0.1; 0.2

m	x	d_{33}^*, пКл/ Н	g_{33}^*, мВ·м/ Н	$(Q_{33}^*)^2$, 10^{-12} Па$^{-1}$	ζ_{d*}	$F_{33}^{*\sigma}$, 10^{-12} Па$^{-1}$	$\zeta_{F\text{-}\sigma}^*$
0.1	0.28	898	231	208	–6.95	98.1	90.9
	0.29	1000	296	296	–7.08	134	90.2
	0.30	1220	260	317	–7.08	143	89.5
	0.33	1340	354	474	–7.00	239	97.8
0.2	0.28	1030	119	123	–5.34	60.4	55.6
	0.29	1250	193	193	–5.53	92.5	58.2
	0.30	1540	211	211	–5.48	101	57.0
	0.33	1880	350	350	–5.41	192	63.3

Благодаря высоким пьезоактивности и пьезочувствительности, большим значениям параметров приема и факторов анизотропии (см. рис. 2 и таблицу 1) исследованные нами композиты представляют интерес как активные элементы пьезоэлектрических актюаторов, сенсоров, энергосберегающих и других устройств.

Исследование проведено при финансовой поддержке в рамках Внутреннего гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

Список литературы

1. Topolov V.Yu., Bowen C.R., Bisegna P. Piezo-active composites. Microgeometry – sensitivity relations.– Cham: Springer Internat. Publ. Switzerland, 2018.– 179 p. Bowen C.R., Topolov V.Yu., Isaeva A.N., Bisegna P. // CrystEngComm.– 2016.– Vol. 18.– P. 5986–6001.

2. Topolov V.Yu., Bowen C.R., Isaeva A.N., Panich A.A. // Phys. Stat. Sol. A.– 2018.– Vol. 215, N 1.– P. 1700548–12 p.

3. Roscow J.I., Pearce H., Khanbareh H. et al. // Eur. Phys. J. Special Topics.– 2019.– Vol. 228, N 7,– P. 1537–1554.

Влияние дефектности порошков сегнетофаз системы ЦТС на температуру их спекания и ЭФП, изготавливаемой из них пьезокерамики

А.А. Нестеров, Е.А. Панич
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Введение

В связи с перспективностью ряда типов пьезопреобразователей (ПП), изготавливаемых на основе тонкоплёночных керамических пьезоматериалов, всё более актуальным становится поиск решения проблем, связанных с несовершенством технологий керамических плёнок, толщиной от 50 до 200 мкм. Все эти проблемы, формально, можно разделить на два типа: а) относительно низкая воспроизводимость электрофизических параметров плёнок (даже в пределах одной партии); б) коробление тонкоплёночных изделий при спекании сырых заготовок.

Первая из проблем связана со значительным ростом (по сравнению с объёмной пьезокерамикой) отношения площади поверхности образца (s) к его объёму (v). Увеличение значения (s/v) приводит к пропорциональному росту скорости испарения легколетучих компонентов систем (для системы ЦТС это PbO), поэтому, при обжиге плёнки, этим компонентом обедняется не только поверхностный слой (как у объёмной пьезокерамики), но и её внутренний объём образца (эффект малой толщины изделия).

Коробление же керамической плёнки связано с процессами усадки исходной прессзаготовки, скорость и степень которой (по различным осям изделия) зависит от её геометрии и равномерности распределения механических напряжений в образце, возникающих, например, в процессе вальцевания плёнки.

На первый взгляд, указанные проблемы можно отнести к разноплановым, однако их острота, в значительной степени, может быть снижена за счёт разработки общих технологических приёмов, способствующих уменьшению температуры процессов синтеза порошков сегнетофаз и спекания прессзаготовок.

Как известно [1 – 4] механизмы процессов синтеза и спекания порошков фаз системы ЦТС заключаются в сопряжённой диффузии ионов Pb^{2+} и O^{2-} по *вакансионному* механизму. При этом коэффициент диффузии (D) выше у ионов O^{2-} до температуры 1173 К, а при более высокой температуры значения D выше у ионов Pb^{2+}. Основываясь на этих данных, можно предложить способы, которые позволят снизить температуры синтеза порошков сегнетофаз, а также температуру спекания, изготавливаемых из них, объёмных и плёночных керамических материалов. Эти приёмы базируются на совершенствовании механизмов массопереноса, реализуемых в рассматриваемых системах и определяемые, как *вакансионные.* Другими словами, для сокращения времени процесса спекания (при фиксированной температуре) или для снижения температуры процесса (при его фиксированном времени) необходимо повысить дефектность фаз по катионным или анионным позициям, или же по обоим позициям одновременно.

Конкретный тип целевого изменения дефектности фаз зависит (при выбранной температуре) от скорости лимитирующей стадии процесса, которая определяется по значению (D). Так в нашем примере, для увеличения скорости процессов синтеза или спекания при температурах ниже 1173 К, в первую очередь, необходимо повышать дефектность фаз по позиции Pb^{2+}, например, за счёт замены трёх ионов Pb^{2+} на два иона M^{3+} (M = Bi, La …), а при температурах выше 1173 К, эффективным будет замена Ti^{4+} или Zr^{4+} на катион, имеющий меньший заряд, например, Fe^{3+}, Mn^{3+}, Ni^{3+}, Co^{3+}, Ni^{2+}, Co^{2+} и т.д. [3, 4].

Для проверки высказанной гипотезы нами, в качестве базового материала, был выбран ЦТС-19, состав которого можно выразить как ($Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ + 1 % масс. Nb_2O_5). Очевидно, что Nb_2O_5 введён в эту систему для повышения дефектности базовой фазы (типа ABO_3) по катионной позиции A ($xPbTi(Zr)O_3$ – $(1\text{-}x)PbNb_2O_6$), но этот приём, как отмечалось выше, эффективен только при температурах ниже 1173 К, т.е., в лучшем случае, в процессе синтеза порошка сегнетофазы. Кроме этого, для Nb_2O_5

характерно образование (уже при температурах порядка 900 К) термодинамически стабильных фаз со структурой типа пирохлора, исчезновение которых в подобных системах наблюдается только выше 1250 К [5], когда D иона Pb^{2+} и так высок, а скорость процесса спекания лимитируется скоростью диффузии иона O^{2-}.

С учётом теории диффузионных процессов [1 – 4], можно сделать вывод, что оптимальной концентрацией точечных дефектов системы, обеспечивающих высокую скорость массопереноса, является величина не более 5 мол.%, так как дальнейшее увеличение концентрации дефектов в системе может привести к перестройке кристаллической решётки базовой фазы. Этот фактор определил пределы концентраций, вводимых нами добавок, которые, по конкретной позиции, не превышали 3 моль. %.

В отличие от большинства известных составов, мы сформировали сегнетофазы (производные от $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$), которые, одновременно, имели дефектность и по катионным и по анионным подрешёткам. Для этого часть ионов свинца была заменена на ионы Bi^{3+}, а часть ионов Sr^{2+} на Sb^{3+} или Cd^{2+}, тогда как часть ионов Zr^{4+} и Ti^{4+} были замещены ионами Mn^{n+}, Ni^{n+}, Co^{n+}, Zn^{2+}, которые объединялись в пары, например, Ni^{n+}- Cd^{2+} или Mn^{n+} - Cd^{2+}. Для снижения вероятности образования в системе фаз со структурой типа пирохлора, доля ионов Nb^{5+} была снижена (по сравнению с ЦТС-19) в два раза и в систему были введены ионы W^{6+}. Частично, дефектность фаз регулировалась путём введения в систему фторидов кальция или калия (0,5 – 1 мол. %).

В связи со сложным составом базовых фаз (с учётом указанных легирующих добавок), синтез их порошков проводился низкотемпературным методом (НТМ) [3, 6]. Для сравнения ряд партий порошков базовых сегнетофаз была синтезирована методом твёрдофазных реакций (МТФР) с использованием в качестве прекурсоров порошков оксидов элементов, входящих в их состав. Этот синтез (в рамках МТФР) проводился в две стадии: а) температура 700°С (обжига – 2 час); б) после повторного помола, при Т = 800°С (30 мин).

Данные РФА по синтезированным порошкам и образцам керамики показывают, что введение легирующих добавок приводит к смещению морфотропной границы базовой системы $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ - $SrTiO_3$ в область, формально, более богатую $PbTiO_3$ и $SrTiO_3$.

Совместное влияние анионной и катионной дефектности порошков, легированных сегнетофаз системы ЦТС, на температуру спекания и ЭФП, изготавливаемой из них пьезокерамики, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Температуры синтеза ряда порошков сегнетофаз систем:
$xBiCdM_{2-x}W_xO_{6-\delta}$ -
$(1-x)(Pb_{0,87}Bi_{0,02}Sr_{0.07}Sb_{0.02})(Ti_{0,48}Zr_{0,51}Nb_{0,008}O_3$ + 0,5 мол.%· KF),
где M = Mn^{n+}, Ni^{n+}, Co^{n+}, Zn^{2+}, а также температуры спекания, изготавливаемой из них пьезокерамики и значения её ЭФП

№, п/п	$T_{синт}$, °C	$T_{спекан}$ °C	$\varepsilon^{T33}/\varepsilon_0$	tgб	$K_р$	$T_К$, °C	d_{31}, пКл/Н	d_{33}, пКл/Н
1	500	900	2800	0,019	0,60	260	245	560
2	500	920	2530	0,018	0,55	270	225	510
3	500	930	2560	0,019	0,51	280	190	440
4	800	990	2250	0,020	0,55	280	190	425
5	950	1230	1750	0,020	0,60	300	160	330

Состав 1: $(Pb_{0,87}Bi_{0,02}Sr_{0.07}Sb_{0.02})(Ti_{0,48}Zr_{0,51}Nb_{0,008}O_3 + BiCdNi_{1,3}W_{0,7}O_{5,9}$ (НТМ)

Состав 2: $(Pb_{0,87}Bi_{0,02}Sr_{0.07}Sb_{0.02})(Ti_{0,48}Zr_{0,51}Nb_{0,008}O_3 + BiCdZn_{1,3}W_{0,7}O_{5,9}$ (НТМ)

Состав 3: $(Pb_{0,87}Bi_{0,02}Sr_{0.07}Sb_{0.02})(Ti_{0,48}Zr_{0,51}Nb_{0,008}O_3 + BiCdMn_{1,7}W_{0,3}O_{6-\delta}$(НТМ)

Состав 4: состав 1, но порошок синтезирован в рамках МТФР Состав 5: ЦТС-19 [7]

Выводы.

1. На основании данных таблицы 1, можно утверждать, что переход к новым технологическим операциям, обеспечивающих

синтез порошков многокомпонентных порошков сегнетофаз и спекание керамики позволяет снизить температуру синтеза базовых фаз (в рамках НТС), в среднем, на 450°С. Это обеспечивается как использованием более активных прекурсоров (гелеобразные фазы), так и легирующими добавками, способствующие росту дефектности катионной подрешётки. Следует обратить внимание, что последний эффект наблюдается и при синтезе порошков сегнетофазы, формирующихся в рамках МТФР, но так как прекурсоры традиционны, поэтому эффект, в этом случае, ниже.

2. Низкая температура спекания керамики характерна как для прессзаготовок, изготовленных из низкотемпературной, так и из высокотемпературной шихты. Это объясняется тем, что, целенаправленное создание оптимальной дефицитности анионной подрешётки позволяет выровнять коэффициенты диффузии катионов и анионов при температурах ниже 1000°С.

3. Многокомпонентное микролегирование позволяет значительно повысить диэлектрическую проницаемость керамических пьезоматериалов и значения их пьезомодулей, что свидетельствует о более высокой эффективности формирующихся в них доменной структуры

Список литературы

1. Прилипко, Ю.С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии: Монография / Донецк: Норд-Пресс, 2007. - 492 с.

2. 2.Третьяков, Ю. Д. Твердофазные реакции / Ю. Д. Третьяков. - М.: Химия, 1978. - 360 с.

3. 3.Нестеров, А.А. Современные проблемы материаловедения керамических пьезоматериалов / Ростов-на-Дону. Изд. ЮФУ, 2010. - 226 с.

4. Damjanovic D. Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics/ Rep. Prog. Phys. 1998. V. 61. Pp.1267-1324.

5. Sahu K. R., De U. Dielectric Properties of $PbNb_2O_6$ up to 700 C from Impedance Spectroscopy/ Journal of Materials. 2013. Vol. 2013. 1-15 p.

6. Nesterov A. A, Tolstunov M.I. Use of Chelate Complexes of Lead(II) in Low-Temperature Technologies of Ceramic Piezoelectric Materials/ Russian Journal of Applied Chemistry, 2019, V. 92. №6. pp. 743-749

7. Шарапов, В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / М. Техносфера, 2006. 632 с.

Технология и электрофизические свойства пьезокерамики на основе фаз системы $PbTiO_3$ –$BiTi_{0,5}Ni_{0,5}O_3$ – $BiTi_{0,5}Cd_{0,5}O_3$

А.А. Нестеров

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

Введение

Развитие современного производства невозможно без совершенствования пьезопреобразователей различного назначения (приёмники, излучатели, пьезодвижители, конденсаторы и т.д.) [1]. Это, в свою очередь, требует решения большого числа технологических и материаловедческих задач, связанных с созданием новых типов пьезоматериалов (ПМ), с оптимальной, для конкретного изделия, совокупностью механических, электрофизических (ЭФП) и физических свойств. Большинство известных в настоящее время ПМ хотя и обеспечивают, достаточно эффективную работу пьезопреобразователей (ПП), создаваемых на их основе, но только при температурах ниже 200ºС [1-3]. В связи с этим ощущается нехватка ПМ, на базе которых можно изготовить преобразователи, способные работать при более высоких температурах. В данном сообщении показан путь создания одного из таких керамических пьезоматериалов, сохраняющего высокие значения пьезомодулей при температурах выше 200ºС.

Следует отметить, что понятия температура Кюри ($T_К$) материала и рабочая температура ПП (РТП) различны. Это связано с тем, что первая из них определяет условие протекания (при 100 кПа) фазового перехода (сегнето- ⇄ парафаза), а вторая - процесс разрушения доменной структуры керамического образца, т.е. температуру, при которой достигается энергия активации процесса его деполяризации. В связи с этим РТП (в отличие от $T_К$), при фиксированном составе базовых сегнетофаз пьезокерамики, может изменяться в широких пределах. Это связано как с типом преобразователя (приёмник или излучатель) [2, 3], так и с зависимостью характеристик доменной структуры от параметров микроструктуры керамики и дефект-

ности её зёрен. В связи с этим, одним из методов повышения значений РТП пьезокерамики представляется разработка ряда взаимосвязанных технологий, включающих методы синтеза порошков сегнетофаз (оптимального состава и строения), а также методы изготовления из них пьезокерамики, микроструктура которой обеспечивает формирование доменной структуры, имеющей высокую энергию активации процесса деполяризации [4 – 7].

Экспериментальная часть.

Объектами исследования были керамические образцы, состав которых можно представить, как $Pb_{1-x}Bi_xTi_{1-0,5x}Cd_{0,25x}Ni_{0,25x}O_3$ (x = 0,15 – 0,40). Выбор состава базовых сегнетофаз диктовался тем, что T_K фазового переход для $PbTiO_3 \approx 490^oC$, но керамика на его основе, спечённая при температуре выше 500^oC, при более низкой температуре превращается в порошок. Это обусловлено большим изменением объёма элементарной ячейки фаз при переходе (сегнето- ⇄ парафаза). Степень этого изменения можно уменьшить путём легирования $PbTiO_3$ [8, 9]. Выбор же состава твёрдого раствора диктовался тем, что, создаваемый ПМ должен был иметь не только РПТ > 300^oC, но и, практически значимые, величины пьезомодулей. При выборе состава базовых фаз также учитывалось, что совокупность ЭФП, создаваемых на их основе керамических ПМ, определяется не только их кристаллографическим строением и составом фаз, но и архитектурой изготавливаемых керамических образцов (размер, форма, тип связности зёрен и пор, число и протяжённость межфазных границ и т.д.) [6, 7, 10], которая, в значительной степени, определяет тип и стабильность доменной структуры ПМ, значения его коэрцитивных полей и т.д. [7].

В связи со сложным составом базовых фаз, синтез их порошков проводился низкотемпературным методом (НТМ) (рис. 1). Для сравнения, вторая партия порошков базовых сегнетофаз была синтезирована методом твёрдофазных реакций (МТФР) с использованием в качестве прекурсоров порошков оксидов состава TiO_2, PbO, Bi_2O_3, CdO и NiO. Обжиг, изготовленных из их

шихты прессзаготовок, проводился в две стадии: а) температура 850°С (обжига – 2 час); б) после повторного помола, при Т = 1000°С (30 мин).

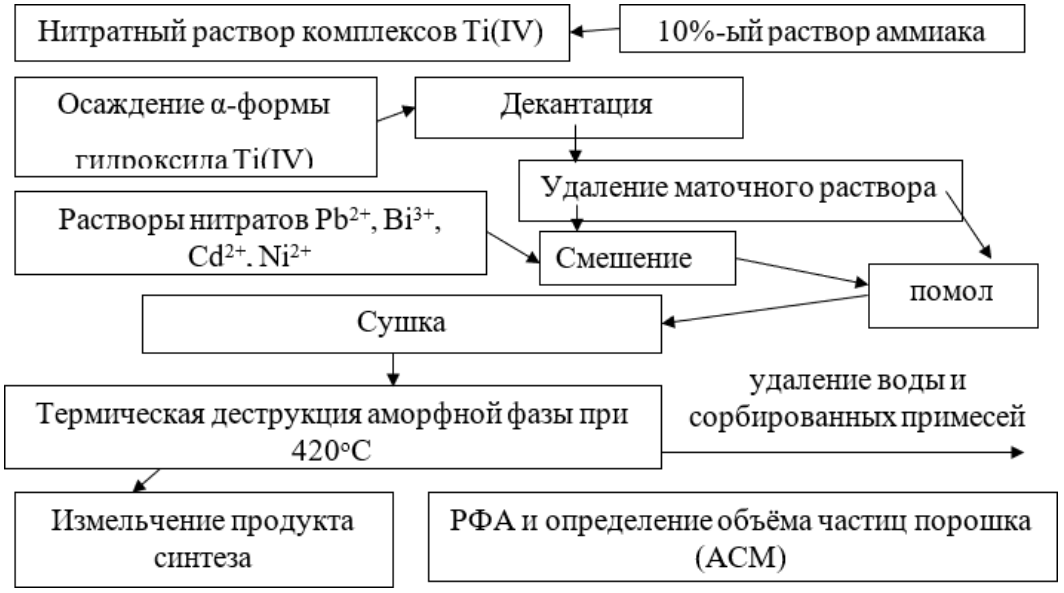


Рис. 1 Принципиальная технологическая схема синтеза порошков фаз состава $Pb_{1-x}Bi_xTi_{1-0,5x}Cd_{0,25x}Ni_{0,25x}O_3$ (x = 0,15 – 0,40) в рамках НТМ

Не зависимо от способа синтеза, порошки фаз $Pb_{1-x}Bi_xTi_{1-0,5x}Cd_{0,25x}Ni_{0,25x}O_3$ (x = 0,15 – 0,40) прессовались в диски диаметром 12,2 мм (плотность дисков (ρ) не менее 50% от теоретической). Обжиг заготовок, изготовленных из: а) низкотемпературной шихты проводился при температурах 950 - 980 °С; б) высокотемпературной шихты – при 1080 - 1180°С, (корундовые тигли, подсыпка: обожжённый порошок $PbZrO_3$ с добавкой до 3 масс. % PbO и до 1,5 масс. % Bi_2O_3). Микроструктура керамики, двух указанных типов, представлена на рис. 2. Из него следует, что при сравнимой (ρ) керамики, диаметр зёрен образцов, изготовленных разными методами, отличается, более чем в 5 раз, а общая площадь межзёренных границ в образцах (а) и (б) более, чем в 30 раз.

Характеристики пьезоэлементов (ПЭ) для определения ЭФП ПМ: электроды серебряные, d = 10 мм, h = 0,5 мм – значение h выбрано с учётом высокого значения коэрцитивного поля материалов. Параметры поляризации ПЭ: поле напряжённостью (Е) от 1 до 8 кВ/мм при 80 - 130ºС (полисилоксановая жидкость ПЭС-5), время от 0,25 до 1,5 ч, плотность керамики определялась методом гидростатического взвешивания (жидкая среда - октан) [11].

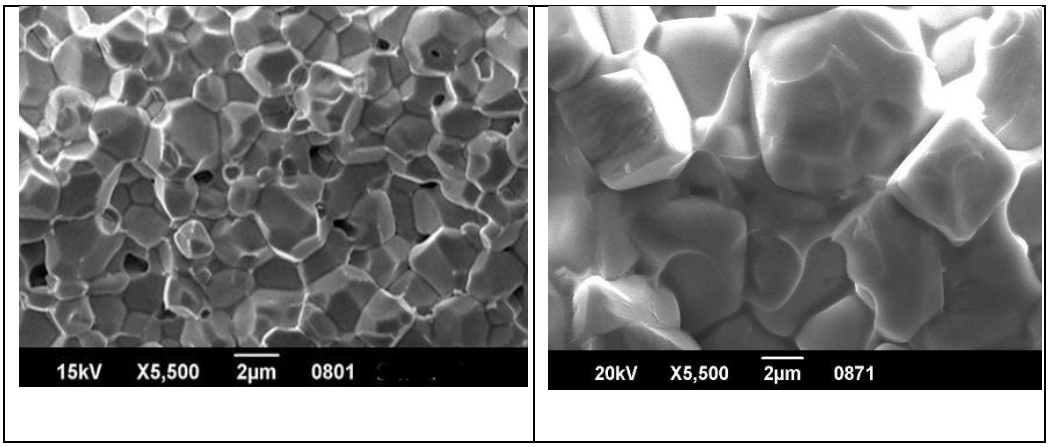


Рисунок 2. Сколы микроструктура керамики состава Pb0,8Bi0,2Ti0,9Cd0,05Ni0,05O3, изготовленной из порошков, синтезированных в рамках: а) НТМ (950оС, 2 ч, (ρ от теоретической 94%); б) МТФР (1150оС, 2 ч, (ρ от теоретической 92%))

Зависимости значений ЭФП ПМ состава $Pb_{0.8}Bi_{0.2}Ti_{0.9}Cd_{0,05}Ni_{0,05}O_3$ (1) и $Pb_{0.7}Bi_{0.3}Ti_{0.85}Cd_{0,075}Ni_{0,075}O_3$ (2), от условий их поляризации и способа синтеза порошков сегнетофаз, представлены на рис. 3 (в рамках НТМ синтезированы порошки сегнетофазы типа 1 и 2, рамках МТФР – типа 1).

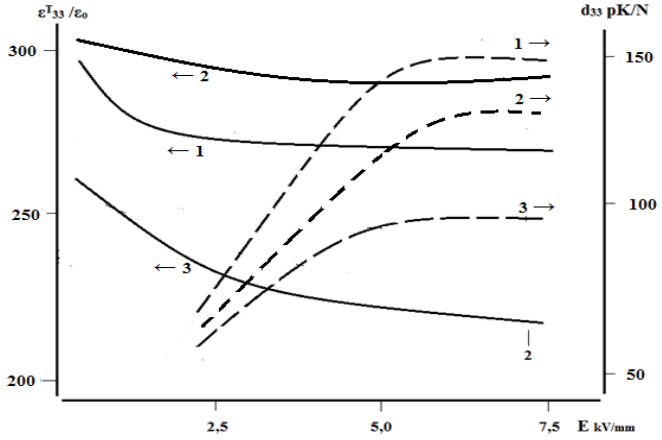


Рис. 3. Изменение εТ33/εо (сплошные кривые 1 – 3) и d33 (штрих-пунктир 1 – 3) от (Е) поляризующего поля (порошки сегнетофаз состава (1) и (2) синтезированы в рамках НТМ, порошок состава (1), синтезирован МТФР (на рис. 3).

Как следует из рис. 3, переход от МТФР к НТМ, при фиксированном составе базовой фазы позволяет повысить значение $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ на 20 - 24%, а значения d_{33} на 30 - 33%. Высокие значения d_{33} ПМ отмечены для фаз состава $Pb_{0.8}Bi_{0.2}Ti_{0.9}Cd_{0,05}Ni_{0,05}O_3$ и $Pb_{0.7}Bi_{0.3}Ti_{0.85}Cd_{0,075}Ni_{0,075}O_3$ (T_K = 412 и 395°С, соответственно). Дальнейшее увеличение значений (х) в составе базовых фаз при-

водит к: а) росту величин $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_o$; б) к снижению коэффициента d_{33} и T_K ПМ.

Для ПЭ, на основе фазы состава (1), порошок которой был синтезирован в рамках НТМ, методом термического циклирования исследовался процесс их деполяризации. Было установлено, что деполяризация этих ПЭ эффективно протекает при температурах выше 340°С (снижение значений d_{33} на 30 – 35% после 30 минутной выдержки при 350°С). В то же время циклирование (8 циклов по 30 минут: нагревание при 310°С – охлаждение) привели только к ≈ 7%-ому снижению значений d_{33} (при одновременном снижении $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_o$ на 4 – 6%).

Список литературы

1. Moulson A. J., Herbert J. M. Electroceramics: Materials, Properties, Applications. 2 Edition // Chichester, West Sussex, England, 2003, John Wiley & Sons, Ltd. - 576 p
2. Ye, Zuo-Guang, ed. Handbook of advanced dielectric, piezoelectric and ferroelectric materials: Synthesis, properties and applications. Elsevier, 2008. - 484 p
3. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики// М: Техносфера, 2006. - 630
4. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. *Химия и технология твердофазных материалов//* М: Изд-во МГУ, Москва, 1985. – 306 с.
5. Нестеров А.А., Панич А.Е. Технологии синтеза порошков сегнетоэлектрических фаз// Ростов н/Дону - Изд-во ЮФУ, 2010. - 226 с
6. Нестеров А.А., Панич А.А. Современные проблемы материаловедения керамических пьезоэлектрических материалов// Ростов н/Дону - Изд-во ЮФУ, 2010. - 226 с
7. Nesterov A.A., Panich A.E., et.al. Method of ‘Chemical Assembly’ of Oxygen Octahedral Ferroelectric Phase Powders and Electrophysical Properties of Ceramics Processed on Their Base // Piezoelectric Materials and Devices. New York: Nova Science Publishers. - 2011. (P. II). - P. 145–183.
8. Kitamura N., Takeuchi M. Development of modified lead titanate piezoelectric ceramics. Techn. Rep. CS News. 1985. V.44. № 2. P 35 – 39.
9. Jamamoto T., Igarashi H., Okazaki K. Mechanical properties of $(Pb,Ca)TiO_3$ family ceramics with zero planar coupling factor. Ceram. Int..1985.V.11. № 3. P. 75 – 79.
10. Newnham R.E. Composites piezoelectric sensors [Text] / R.E. Newnham, A. Safari, I.R. Giniewicz and B.H.Fox // Ferroelectrics. 1984. Vol. 50. P. 15– 21.
11. Государственный стандарт. Определение водопоглощения, кажущейся плотности, открытой и общей пористости. ГОСТ 2409–67. 27 с.

Пьезокерамика на основе фаз системы $PbTiO_3$ - $Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$

А.А. Нестеров

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Введение

Для успешного развития ряда отраслей современной промышленности (аэрокосмической, атомной, нефтехимической, автомобильной и т.д.) необходимы пьезопреобразователи (ПП), способные длительно работать при температурах выше 200ºС. Теоретически, материалы для таких ПП могут быть созданы на основе ряда свинец- и висмутсодержащих сегнетофаз, таких как $BiFeO_3$, $(Bi_2O_2)(A_{n-1}B_nO_{3n+1})$, где A = Ca, Sr, Ba, Pb, K, Bi, $PbNb_2O_6$, $PbTiO_3$ и их твёрдых растворов (таб. 1).

Таблица 1. Электрофизические параметры (ЭФП), при с.у., ряда керамических пьезоматериалов на основе фаз, имеющих высокую температуру Кюри (T_K) [1].

Сегнетофазы систем	ε_r	$tg\delta$ $\bullet 10^{-2}$	d_{33} пК/Н	P_r μК/см^2	$E_к$ кВ/см	T_K ºС
$BiScO_3$-$PbTiO_3$	2000	1 - 2	470	32	20	450
$PbNb_2O_6$	340	-	104	1.5	14	534
$0.9PbNb_2O_6$-$0{,}1Ca_{0.6}TiO_3$,	244	0,97	81	-	-	565
$PbTiO_3$	190	-	56	-	-	470
$BiFeO_3$ - $PbTiO_3$	-	-	87	63	45	600
$BiFeO_3$ - $PbTiO_3$ - $BaTiO_3$ (легир. MnO_2)	545	1,3	222	35.5	39	546
PZT-5A	1700	2,0	370	-	15,5	360

Как следует из таблицы 1, одной из перспективных базовых фаз (для создания керамических пьезоматериалов (КПМ) с высокой T_K) является $PbTiO_3$. Однако изготовить ПКМ на основе этой

фазы, практически, невозможно. Это связано с тем, что при спекании прессзаготовок, изготовленных из порошков этой фазы, при Т >1000°С формируется керамика на основе кубической модификации $PbTiO_3$, которая, при температуре ниже 500°С, превращается в тетрагональную, объём которой, больше, чем у кубической, что приводит к растрескиванию керамического образца. С целью сближения объёмов пара- и сегнетофазы, на основе $PbTiO_3$ формируют твёрдые растворы [2, 3].

Недостатком КПМ, изготовленных из низко легированных фаз $PbTiO_3$, является их более низкая (по сравнению с $PbTiO_3$) $T_К$, а также небольшие значения продольного пьезомодуля (d_{33}) [2, 3]. Кроме этого, рабочая температура (РТП), обсуждаемых пьезоэлементов (ПЭ), значительно, ниже, чем $T_К$, а время их возможной эксплуатации при стандартных условиях (с.у), даже в составе приёмников, во много раз меньше, чем у КПМ на основе фаз системы ЦТС, принадлежащих к морфотропной области. Последний факт связан с особенностями микроструктуры таких материалов, которая характеризуется наличием микротрещин, развитию которых способствует как повышение температуры системы (особенно циклы нагревание – охлаждение), так и воздействие на них любых механических и электрических полей.

В данной работе, выбор состава твёрдого раствора для создаваемого КПМ диктовался рядом требований: а) РТП > 300°С; б) d_{33} > 150 пК/Н.

Выбор же технологии изготовления КПМ был обусловлен необходимостью синтеза ультрадисперсных порошков (УДП) фаз многокомпонентной системы, а также применением методов изготовления из них КПМ, с оптимальной микроструктурой (объём, дефектность, форма зёрен, тип связности зёрен и пор, число и протяжённость межфазных границ и т.д.), которая, в значительной степени, определяет тип и стабильность доменной структуры КПМ, значения его коэрцитивных полей и т.д., в том числе и высокую энергию активации процесса деполяризации [4 – 6].

Экспериментальная часть.

Объектами исследования были керамические образцы на основе фаз системы (1-x)$PbTiO_3$ - x$Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$ (x = 0,15 – 0,45). Выбор же второго компонента системы (фазы $Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$) обусловлен тем, что ПКМ на её основе имеют высокое значение диэлектрической проницаемости (выше 4000) и значения d_{33} > 500 пК/Н [7]. УДП порошки фаз состава (1-x)$PbTiO_3$ - x$Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$ были синтезированы в рамках метода «химической сборки» (МХС) [5,6] (рис. 1).

Для изготовления пьезокерамики, УДП синтезированных фаз прессовались в диски с диаметром 12,2 мм (плотность дисков (ρ) не менее 60% от рентгенографической). Обжиг прессзаготовок проводился в два этапа: а) нагрев, высушенных при 120°С прессзаготовок, со средней скоростью 20°С/мин до температуры 650°С (этап формирования первичных, кристаллических зародышей); б) подъём температуры (300°С/час) до 1180°С и обжиг при этой температуре в течение 3 часов (корундовые тигли, подсыпка: обожжённый порошок $PbZrO_3$ с добавкой до 3 масс. % PbO).

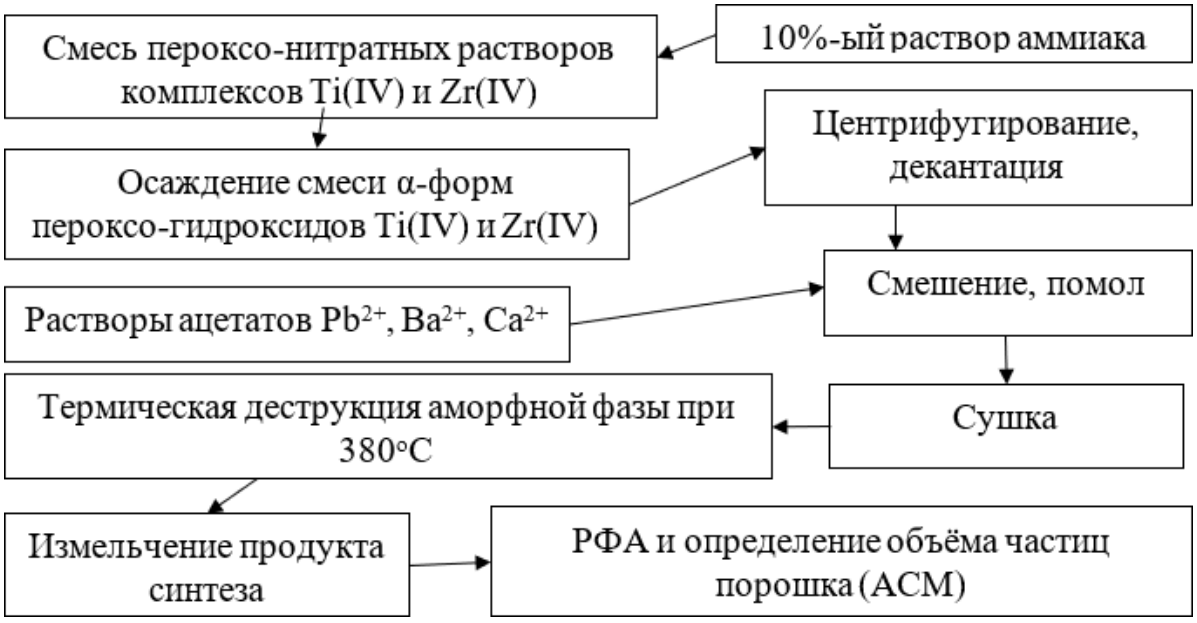
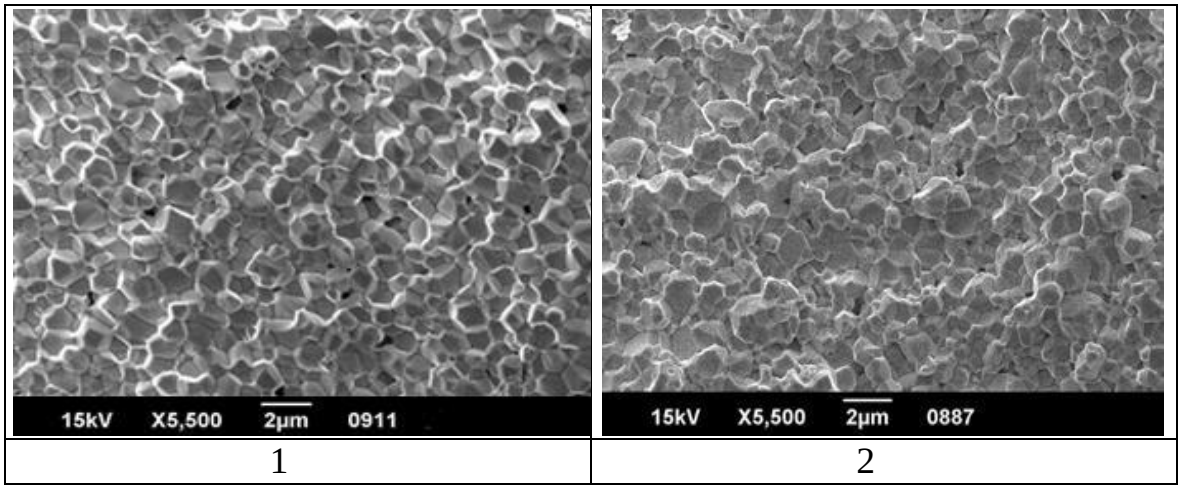


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема синтеза УДП фаз состава (1-x)PbTiO3 - xBa0.85Ca0.15Ti0.90Zr0.10O3 (x = 0,15 – 0,45) в рамках НТМ

Микроструктура образцов керамики с x = 0,2 и 0,4 представлена на рисунке 2. Из этих данных следует, что сочетание технологии синтеза, основанного на МХС, с приёмами целена-

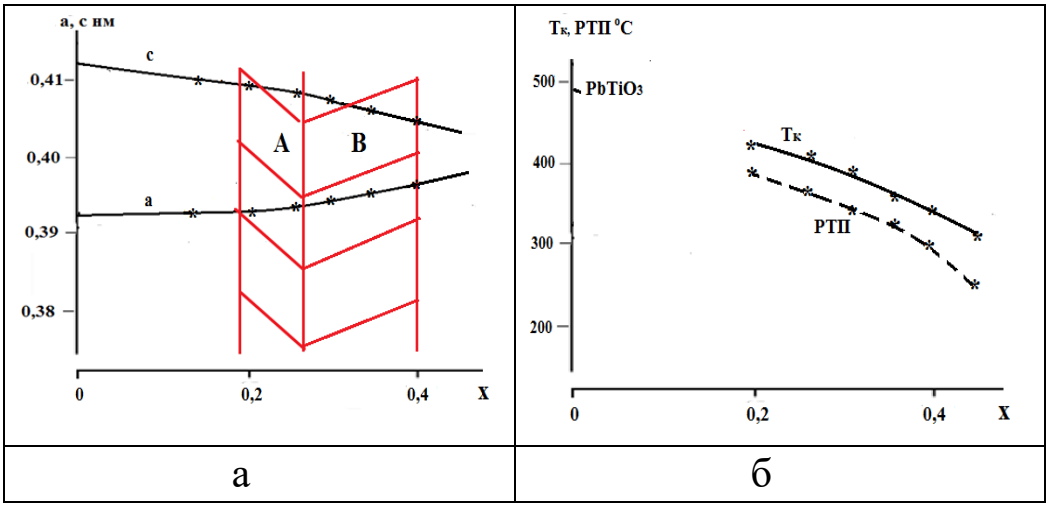
правленного формирования зерен керамики малых размеров, позволяет изготовить образцы, микроструктура которых характеризуется большой протяжённостью межзёренных границ, что создаёт условия для формирования термически стабильной доменной структуры.



1 2

Рис.2 – Микроструктура сколов керамики на основе сегнетофаз состава (1-x)PbTiO3 - xBa0.85Ca0.15Ti0.90Zr0.10O3: (1) x = 0,2; (2) x = 0,4

Определение ЭФП, из КПМ изготавливали пьезоэлементы (ПЭ) в виде дисков с серебряными электродами (d = 10 мм, h = 0,5 мм – значение h определялось высоким значением коэрцитивного поля материалов). ПЭ поляризовались полем напряжённостью (E) от 1 до 8 кВ/мм при 80 - 130ºС (полисилоксановая жидкость ПЭС-5), время от 0,25 до 1,5 ч, плотность керамики определялась методом гидростатического взвешивания (октан) [11].



а б

Рис. 3. (а) – изменение параметров (a и c) элементарной ячейки фаз системы (1-x)PbTiO3 - xBa0.85Ca0.15Ti0.90Zr0.10O3 от (x) и области составов, представляющих практический интерес; б) значения Тк и РТП исследованных КПМ.

Для ПЭ, на основе фаз рассматриваемой системы (x = 0,2 – 0,45), методом термического циклирования исследовался процесс их деполяризации. Показано, что температура деполяризации этих ПЭ снижается по мере роста мольной доли $Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.90}Zr_{0.10}O_3$ в системе. В то же время циклирование (8 циклов: 30 минутное нагревание при 350°С – охлаждение) ПЭ на основе фаз с x = 0,2 – 0,25 снижают значения их d_{33} на 6 - 8%, а $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$, в среднем, на 5%).

Как видно из рисунка 3, КМП, на основе составов с x = 0,2 – 0,25 (область А на рис.3), имеют РПД более 300°С (при с.у. значения их d_{33} выше 180 пК/Н, при $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ более 600), что отвечает задаче работы. Составы же принадлежащие области В (рис. 3а) отвечают КПМ, имеющим значения d_{33} в интервале 220 – 330 пК/Н, при $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ более 1000, что сравнимо с КПМ на основе фаз системы ЦТС, при этом РТП, созданных ПЭ, превосходит РТП большинства КПМ типа ЦТС.

Список литературы

1. Z. Ning, Y. Jiang, J. Jian, et al. Achieving both large piezoelectric constant and high Curie temperature in $BiFeO_3$-$PbTiO_3$-$BaTiO_3$ solid solution// Journal of the European Ceramic Society. 2020.V. 40, Issue 6. P. 2338-2344

2. Kitamura N., Takeuchi M. Development of modified lead titanate piezoelectric ceramics// Techn. Rep. CS News. 1985. V.44. № 2. P 35 – 39.

3. Jamamoto T., Igarashi H., Okazaki K. Mechanical properties of $(Pb,Ca)TiO_3$ family ceramics with zero planar coupling factor// Ceram. Int..1985.V.11. № 3. P. 75 – 79.

4. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. *Химия и технология твердофазных материалов//* М: Изд-во МГУ, Москва, 1985. – 306 с.

5. Нестеров А.А., Панич А.А. Современные проблемы материаловедения керамических пьезоэлектрических материалов// Ростов н/Дону - Изд-во ЮФУ, 2010. - 226 с

6. Nesterov A.A., Panich A.E., et.al. Method of ‘Chemical Assembly’ of Oxygen Octahedral Ferroelectric Phase Powders and Electrophysical Properties of Ceramics Processed on Their Base // Piezoelectric Materials and Devices. New York: Nova Science Publishers. - 2011. (P. II). - P. 145–183.

7. Xue D., Zhou Y., Bao H., et. al. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of $Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3$ -50$(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO_3$ Pb-free ceramic at the morphotropic phase boundary, J. Appl. Phys. 2011. V.109. iss. 5. 054110.

Исследование и разработка приборного обеспечения для оперативной оценки горючести газа из газовых реле силовых трансформаторов

д.т.н. Л.А. Дарьян[1], к.т.н. Р.М. Образцов[1], А.А. Арутюнян[2]*
[1]АО «Техническая инспекция ЕЭС»
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация

В статье рассматривается возможность обеспечения оперативности проведения и повышения достоверности результатов проверки газа из газовых реле силовых маслонаполненных трансформаторов, а также безопасности выполнения соответствующих мероприятий эксплуатирующим персоналом при срабатывании газовой защиты. Представлены результаты первой отечественной разработки специализированного индикатора горючих газов, удовлетворяющего современным требованиям к организации обслуживания газовой защиты силовых трансформаторов.

Ключевые слова: *горючесть газа, индикатор, газовая защита, газовое реле, силовой трансформатор, пробоотборник.*

Введение

Основными причинами появления горючего газа в газовом реле (реле Бухгольца) маслонаполненных силовых трансформаторов (СТ) является разложение масла и(или) бумажной изоляции при воздействии электрической дуги или(и) при нагреве, а также под действием частичных разрядов или кавитации, вызванных дефектами внутренней изоляции СТ. Кроме того, в газовое реле может попасть воздух при технологических процессах, таких как заливка/долив или очистка масла, а также в результате подсоса, например, через уплотнения системы охлаждения СТ. Газовое реле (рис. 1) устанавливается в трубе (маслопроводе), соединяющей основной бак СТ с расширительным баком так, чтобы через него проходили газ и поток масла, устремляющиеся в расширитель при внутренних повреждениях СТ или из расширителя, – при повреждениях основного бака СТ.

В Российской Федерации действующими нормативно-техническими документами предусмотрен ряд мероприятий, которые должны проводиться эксплуатирующим персоналом при срабатывании газовой защиты СТ. Согласно нормативно-техническим документам [1-3] при срабатывании газовой защиты на сигнал или отключение (при появлении газа в газовом реле) необходимо без промедления отобрать пробу газа из газового реле. После чего, проба газа в возможно короткий срок должна быть подвергнута анализу на горючесть для принятия обоснованного решения о возможности дальнейшей эксплуатации СТ до выявления причины срабатывания газовой защиты. При этом, в действующих нормативно-технических документах не регламентирована процедура проведения оперативной оценки в полевых условиях горючести газа, а только описан порядок проведения отбора и транспортировки проб из газовых реле с помощью громоздких и недостаточно надежных в эксплуатации приборов, разработанных более 50 лет назад.

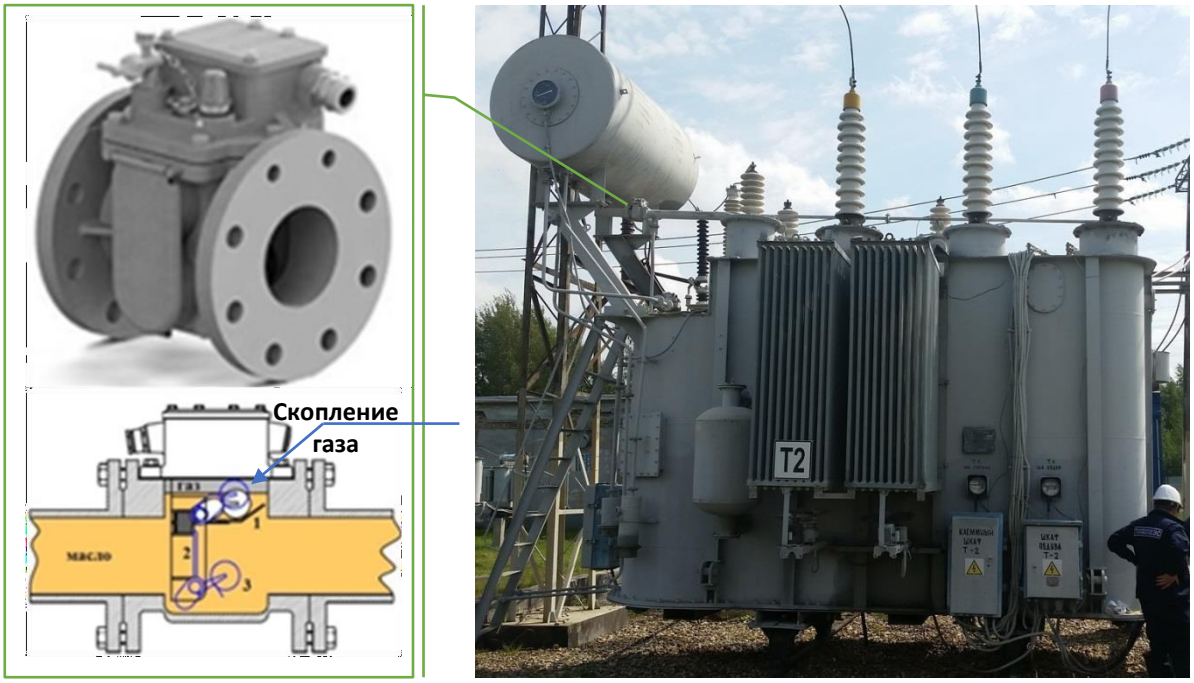


Рис. 1. Силовой маслонаполненный трансформатор

Актуальность

Рынок специализированного оборудования для индикации горючих газов в газовых реле СТ ограничен импортными изделиями, которые не получили широкого применения в отечественной

практике из-за высокой стоимости и необходимости периодического обслуживания и калибровки с использованием специальной контрольной газовой смеси на предприятии-изготовителе [4]. Кроме того, для эксплуатации такого оборудования требуется высокая квалификация обслуживающего персонала.

Следует отметить, что идея использования газоанализаторов для индикации горючих газов из газового реле не является инновационной. Так, например, еще в «Инструкции по наладке и эксплуатации газовой защиты», составленной бюро технической информации ОРГРЭС и выпущенной в 1963 году, в порядке «накопления опыта» рекомендовалось применять газоанализатор типа ПГФ-11. Этот прибор был предназначен для анализа метана в атмосферном воздухе и, к сожалению, был плохо приспособлен для выполнения оперативного анализа газа, накапливающегося в газовом реле. В дальнейшем это направление не получило развития. Несмотря на то обстоятельство, что в настоящее время, как в России, так и за рубежом, разработан и освоен выпуск некоторого количества газоанализаторов различных модификаций [5, 6], они не могут быть в полной мере применены для решения задачи индикации горючих газов в газовых реле СТ. Объясняется это конструктивными и функциональными ограничениями серийно изготавливаемых приборов [7].

Вопрос применения в эксплуатации на объектах электроэнергетики современных приборов для проведения оперативной оценки горючести скопившегося газа в газовом реле является актуальным, так как достоверное определение горючести газа в полевых условиях крайне важно для предотвращения вероятного развития аварии и принятия обоснованного решения о возможности дальнейшей эксплуатации силового трансформатора до выявления причин срабатывания газовой защиты [8].

Целью настоящей работы явилась разработка прибора для оперативной оценки в полевых условиях горючести газа (цифрового индикатора) из газового реле при срабатывании газовой защиты с возможностью автоматического документирования результатов выполненной оценки. Внедрение таких приборов в

операционную деятельность электроэнергетических компаний позволит снизить операционные затраты на отбор и оценку горючести газа за счет оптимизации этих процедур, а также обеспечить повышение достоверности результатов оценки и безопасности проведения соответствующих работ оперативным персоналом.

Разработка приборов для индикации горючих газов

Анализ преимуществ и недостатков применяемых видов приборов для идентификации компонентов газовых смесей (индикаторные трубки и поглотители, хроматографы, газоанализаторы) показал, что для оперативной оценки горючести газа из газового реле СТ в полевых условиях предпочтительно использование переносных газоанализаторов.

В ходе НИОКР разработан переносной цифровой индикатор (рис. 2) – прибор индикации горючих газов (ПИГГ).

Рис. 2 – ПИГГ

В приборе реализована комбинация двух газочувствительных сенсоров: электрохимического и оптического, которые работают в бескислородной среде и обеспечивают селективность по анализируемым веществам.

Принцип действия электрохимического сенсора основан на явлении протекания специфичной электрохимической реакции при появлении водорода в электрохимической ячейке, представляющей собой емкость с раствором электролита с электродами (анодом и катодом), и дополнительным вспомогательным электродом. Водород вступает в химическую реакцию с электролитом, заполняющим ячейку. В результате в растворе возникают заряженные ионы, между электродами начинает протекать элек-

трический ток, пропорциональный концентрации водорода в пробе.

Принцип действия оптического сенсора основан на избирательном поглощении инфракрасного излучения молекулами газов в области длин волн 3,3-3,4 мкм. Инфракрасное излучение светодиода проходит через измерительную газовую кювету диффузионного типа и попадает на два фотоприемника, один из которых регистрирует только излучение в диапазоне длин волн 3,3-3,4 мкм, другой – в диапазоне длин волн 3,5-3,7 мкм. Исследуемый газ, находящийся в кювете, поглощает излучение рабочей длины волны и не влияет на излучение опорной длины волны. Используемый дифференциальный двухволновой метод регистрации позволяет устранить влияние паров воды, загрязнения оптических элементов и прочих неселективных помех, одинаково влияющих на оба канала.

Прокачка анализируемого газа через кювету с установленными в ней газочувствительными сенсорами осуществляется встроенным насосом. Для проведения анализа требуется объём пробы газа ≈5-10 $см^3$.

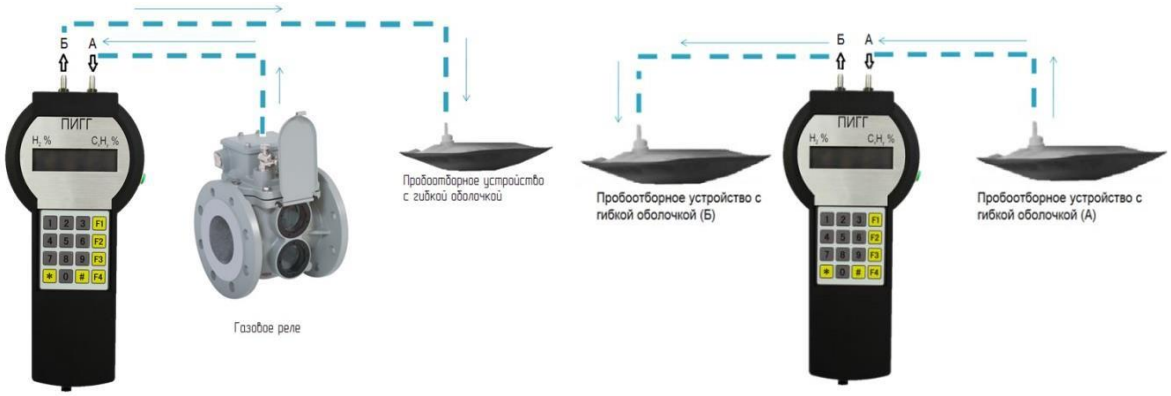
Ключевые особенности разработанного ПИГГ [9]:

- обеспечение оперативности и достоверности результатов индикации содержания водорода (H_2) и суммарной концентрации углеводородов (C_xH_y) в пробах газа, отобранных из газовых реле СТ, в том числе в бескислородной среде;
- малый расход газа для оценки его горючести;
- проведение оценки горючести газа как непосредственно из газового реле (рис. 3), так и из пробоотборных устройств с гибкой оболочкой с сохранением пробы газа для последующих лабораторных исследований (при обеспечении схемы соединения «прибор - пробоотборник с гибкой оболочкой»);
- функция автоматической проверки функционирования ПИГГ (самодиагностики) при каждом включении прибора;
- автономная работа от аккумуляторной батареи;
- компактное и эргономичное исполнение, устойчивое к воздействиям внешних факторов;

▪ применение алгоритмов расчета, обеспечивающих требуемую достоверность результатов анализа газов с учетом влияния окружающей среды;

▪ наличие пользовательского программного обеспечения;

▪ соответствие современным требованиям надежности и безопасности.



а **б**

Рис. 3. Схема проведения анализа газа из газового реле (а) и из пробоотборного устройства с гибкой оболочкой (б)

Алгоритм работы ПИГГ следующий. Анализируемый газ встроенным в прибор насосом закачивается в кювету прибора с газочувствительными сенсорами, после чего электрические сигналы от сенсоров поступают в микропроцессорный блок, где происходит обработка и оцифровка сигнала. На жидкокристаллическом дисплее отображаются концентрации содержания водорода (H_2) и суммарной концентрации углеводородов (C_xH_y). При превышении порогового значения концентрации прибор выдает световую сигнализацию.

Результаты анализа сохраняются в память прибора. При выборе функции «просмотра результатов измерения» все данные отображаются на жидкокристаллическом дисплее прибора и через интерфейс USB данные могут быть переданы на персональный компьютер. При помощи пользовательского программного обеспечения (рис. 4) можно сформировать протокол проверки газа из газового реле силового трансформатора на горючесть.

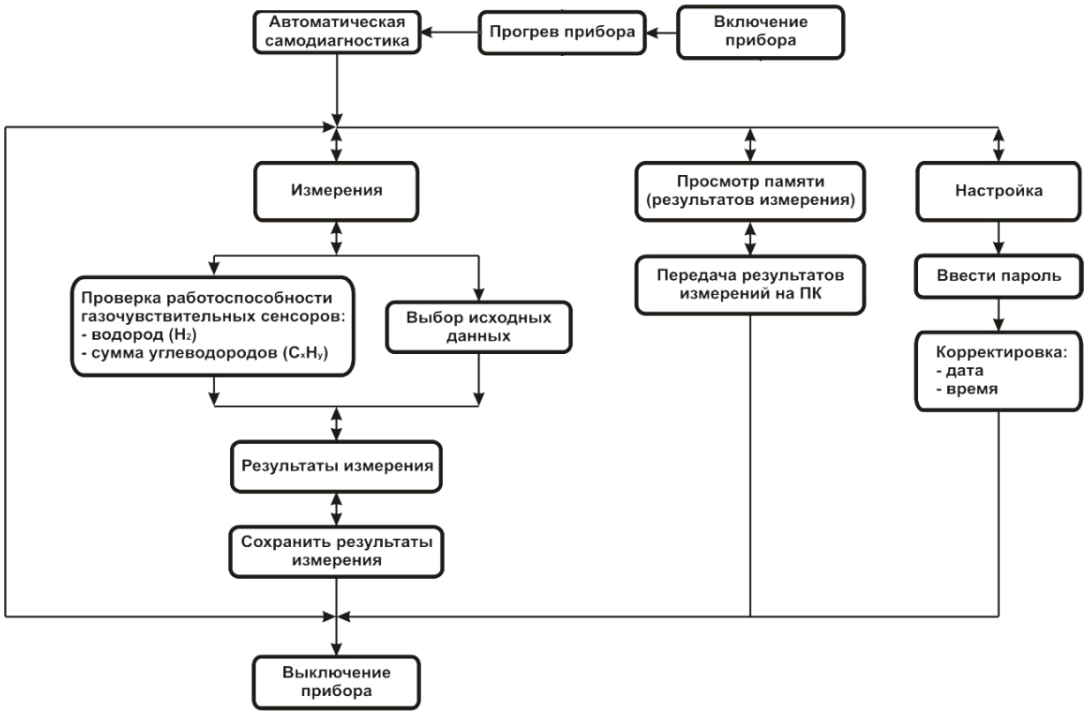


Рис. 4. Функциональная структура ПО ПИГГ

Наряду с ПИГГ для целей оценки горючести газа из ГР силовых трансформаторов разработан аналогичный, но бюджетный прибор – индикатор «ElchromDet» (рис. 5). Индикатор представляет собой портативный миниатюрный прибор для индикации содержания только углеводородных газов (C_xH_y). Прибор не имеет дисплея и управляется одной кнопкой. Индикация результатов анализа реализована световой и звуковой сигнализацией [8]. Посредством USB-интерфейса, так же как и у ПИГГ, данные из внутренней памяти прибора могут быть переданы на персональный компьютер, где при помощи пользовательского программного обеспечения можно сформировать протокол проверки горючести газа.

Рис. 5. ELCHROMDET

Следует отметить, что особое внимание уделено организации комплексного подхода к обслуживанию силовых трансформаторов при срабатывании газовой защиты, а именно, комплектация приборов предусматривает дополнительные принадлежности для проведения оперативной проверки газа на горючесть в полевых условиях, включая (рис. 5):

- многоразовые пробоотборники с гибкой многослойной оболочной;
- соединительные трубки;
- фильтр-маслоуловитель;
- транспортировочный кейс.

При данном подходе обеспечивается представительность пробы газа на всех этапах: пробоотбор, проверка горючести, транспортировка пробы в лабораторию, ввод пробы в измерительную систему в лаборатории [10].

Разработанные приборы для индикации горючих газов из газовых реле СТ в настоящее время серийно выпускаются в представленных двух модификациях. Технические характеристики «ElchromDet» и ПИГГ приведены в таблице 1. Приборы успешно прошли апробацию, в том числе, за рубежом, и с 2018 года применяются в операционной деятельности российских электроэнергетических компаний.

Табл. 1.

Технические характеристики «ElchromDet» и ПИГГ [10]

Наименование параметра, единица измерения	**ELCHROMDET**	**ПИГГ**
Индикация горючих газов: водород (H_2), % об. доли сумма углеводородов (C_xH_y), % об. доли	 – 0,2 – 5,0	 0,2 – 5,0 0,2 – 5,0
Продолжительность анализа, не более, мин	1	2
Габаритные размеры прибора, мм	110×60×35	200×96,5×40
Масса прибора, кг	0,2±0,01	0,3±0,01
Время установления рабочего режима (прогрева прибора), не более, мин	1	5
Пороговая чувствительность, не хуже, % об. доли	0,2	

Время непрерывной работы, не менее, ч	4
Потребляемая мощность, не более, Вт	5
Степень защиты оболочки прибора	IP 55
Диапазон температуры окружающей среды при эксплуатации, °С	- 30 .. 50
Интерфейс передачи данных	USB
Запись истории сообщений	Да

Выводы

1. Показана актуальность модернизации и оптимизации приборно-аналитического обеспечения для оперативного анализа газа из газовых реле СТ на горючесть за счёт применения портативного прибора.

2. Разработанные отечественные приборы обладают двумя основными конструктивными особенностями: газовый тракт, обеспечивающий анализ на малом объеме пробы газа (5-10 $см^3$), и комбинация двух сенсоров (электрохимический и оптический), позволяющих проводить анализ в бескислородной среде. При этом анализ пробы может выполняться как непосредственно из газового реле Бухгольца, так и из пробоотборных устройств с гибкой оболочкой.

3. Цифровые индикаторы обеспечивают в случае срабатывания газовой защиты силовых трансформаторов оперативное и безопасное получение данных о горючести газа из газовых реле, а также автоматическое документирование результатов выполненной оценки горючести. Применение приборов направлено на снижение операционных затрат энергопредприятий за счет сокращения трудоемкости на выяснение причин срабатывания газовой защиты при одновременном повышении достоверности результатов оценки горючести газа из газового реле силовых трансформаторов в полевых условиях.

Список литературы

1. РД 153-34.0-35.518-2001. Инструкция по эксплуатации газовой защиты. – М.:СПО ОРГРЭС, 2001. – 45 с.

2. РД 34.46.502. Инструкция по определению характера внутренних повреждений трансформаторов по анализу газа из газового реле». –

М.:Главтехуправление, 1979. – 7 с.

3. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – М.: Технорматив, 2007. – 30 с.

4. Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH – Тестер Бухгольц-газов BGT 3 Инструкция по эксплуатации. 14/01/10/05.

5. Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH – Газовый проверочный прибор ZG 3.1 Инструкция по эксплуатации. 12/01/10/05.

6. Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH – Пробоотборник для газа из реле Бухгольца BGS Инструкция по обслуживанию. 17/01/10/05.

7. Л.А. Дарьян. Комментарий «К вопросу использования газоанализаторов для индикации горючих газов из газового реле» // Энергоэксперт, № 3, 2016, с.55.

8. Голубев П.В., Дарьян Л.А., Образцов Р.М. Оценка технического состояния высоковольтного оборудования. Инновационные разработки АО «Техническая инспекция ЕЭС» // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск 48. Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики. СПб.: ПЭИПК, 2017, с. 18-30.

9. Л.А. Дарьян, Р.М. Образцов, А.М. Осипов. Разработки АО «Техническая инспекция ЕЭС» в области оценки технического состояния электроэнергетического оборудования // Материалы XXII заседания общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг» и общественного Совета специалистов по диагностике электрических установок Сибири и Дальнего Востока. Сборник докладов. г. Снежинск, 2016, с.142-153.

10. L.A. Daryan, P.V. Golubev, A.M. Osipov, A.A. Arutyunyan. Innovative solutions for flammable gases indication from Buchholz relay // 5th International Colloquium «Transformer Research and Asset Management», Opatija/Croatia, October 09 -12, 2019.

Особенности пьезоэлектрических свойств и их анизотропии в пористых материалах на основе сегнетопьезокерамики типа $PbTiO_3$ при низком уровне пористости

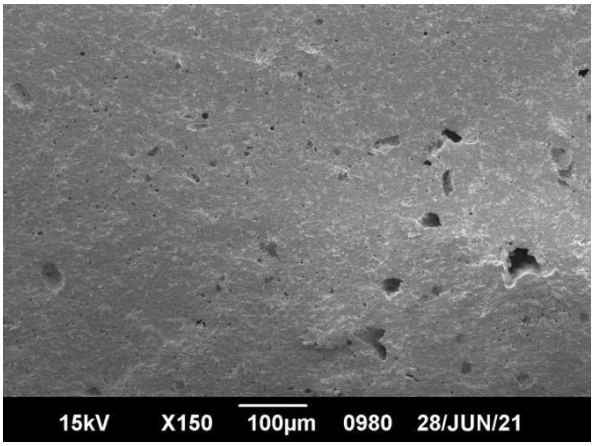
К.т.н., инженер П.А. Борзов, к.т.н., технолог С.Е. Филиппов, д.ф.-м.н., проф. В.Ю. Тополов
НКТБ «Пьезоприбор», ИВТиПТ, Южный федеральный университет, 344090, Ростов-на-Дону, Россия
Физический факультет, Южный федеральный университет, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

Получение пористых пьезоэлектрических материалов на основе высокоанизотропных сегнетопьезокерамик (СПК) модифицированного $PbTiO_3$ [1, 2] сопряжено с рядом сложностей физического и технологического характера. Во многих случаях не удается получить хорошо воспроизводимые электромеханические свойства и связанные с ними параметры, в ряде случаев проблемы возникают вследствие понижения механической прочности образцов, их микрорастрескивания и т.п. В настоящей работе приводятся данные по пористому композиту на основе СПК (Pb, Ca, Nd, Bi)(Ti, Mn)O_3. Образцы пористого композита получены в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ. В качестве порообразователя применеи аммоний щавелевокислый 1-водный (оксалат аммония). При изготовлении образцов вводили порообразователь в количестве 2,5, 5 и 10 масс. %. Соответствующие значения пористости готовых образцов составили v_p = 0.047, 0.100 и 0.207. Микрофотографии пористой структуры приведены на рис. 1.

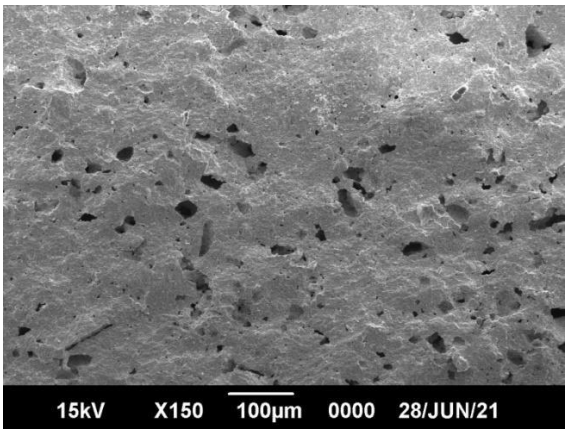
Экспериментальные исследования показывают, что при невысоком уровне пористости v_p в полученных образцах незначительно изменяется продольный пьезомодуль d_{33}^* на фоне уменьшения поперечного d_{31}^* по модулю (кривые 1 и 2 на рис. 2). Зафиксированы заметное увеличение их продольной пьезочувствительности (пьезокоэффициент g_{33}^*) и возрастание по модулю фактора пьезоэлектрической анизотропии $\zeta_d^* = d_{33}^* / d_{31}^* = g_{33}^* / g_{31}^*$ (кривые 3 и 4 на рис. 2).

Совокупность электрофизических параметров демонстрирует ста-

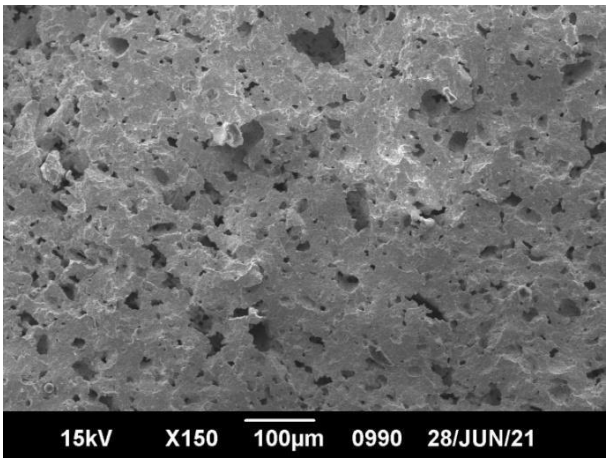
бильность и позволяет говорить о хорошей воспроизводимости полученных экспериментальных результатов.



а



б



в

Рис. 1. Микрофотографии сечений пористой структуры неполяризованных образцов на основе СПК (Pb, Ca, Nd, Bi)(Ti, Mn)O_3 при v_p = 0.047 (а), 0.100 (б) и 0.207 (в)

С учетом особенностей микрогеометрии данных образцов проведена интерпретация экспериментальных зависимостей пьезокоэффициентов d_{3j}^*, g_{3j}^* и фактора анизотропии ζ_d^* от пористости v_p в рамках следующих микромеханических моделей пьезоактивных композитов:

а) сфероидальные поры внутри монолитной СПК матрицы (связность композита 3–0) [3];

б) система СПК стержней внутри пористой сегнетокерамической матрицы (связность композита 1–3–0), при этом матрица может быть либо поляризованной по аналогии со стержнями, либо неполяризованной [4].

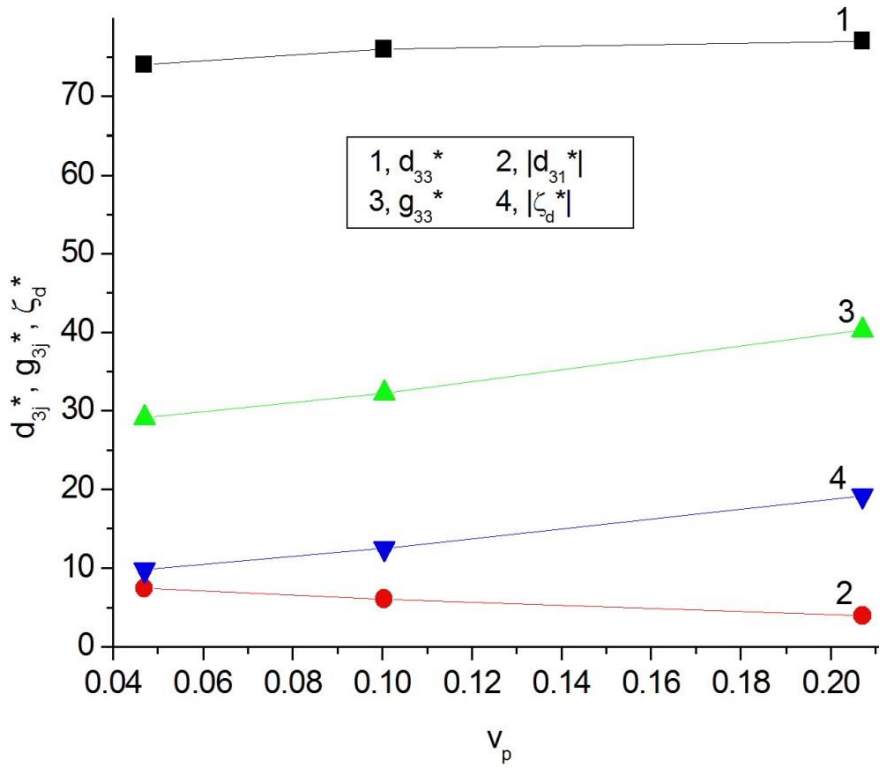


Рис. 2. Экспериментальные зависимости пьезомодулей d_{33}^*, d_{31}^* (в пКл / Н), пьезокоэффициента g_{33}^* (в мВ.м / Н) и фактора пьезоэлектрической анизотропии ζd* от пористости vp образцов на основе СПК (Pb, Ca, Nd, Bi)(Ti, Mn)O3 при комнатной температуре

В прямоугольной системе координат ($X_1X_2X_3$) форма пор в моделях (а) и (б) характеризуется уравнением $(x_1 / a_{1p})^2 + (x_2 / a_{2\,p})^2 + (x_3 / a_{3p})^2 = 1$ и аспектным отношением $\rho_p = a_{1p} / a_{3p} = a_{2p} / a_{3p}$. Ось OX_3 является осью поляризации образца в целом.

Примеры расчетных концентрационных зависимостей нормированных пьезокоэффициентов $d_{3j}^* / d_{3j}^{(1)}$, $g_{33}^* / g_{33}^{(1)}$ и фактора анизотропии ζ_d^* представлены на рис. 3. Верхний индекс "(1)" обозначает константы монолитной СПК. В расчетах использован полный набор электромеханических констант монолитной поляризованной СПК модифицированного $PbTiO_3$ из работы [5]. Показано влияние формы пор (ср. рис. 3, а и 3, б) на упомянутые выше параметры d_{3j}^*, g_{3j}^* и ζ_d^*. Кроме того, в рамках модели (б) рассмотрено влияние пористой неполяризованной матрицы на формирование пьезоэлектрических свойств материала (см. рис. 3, в).

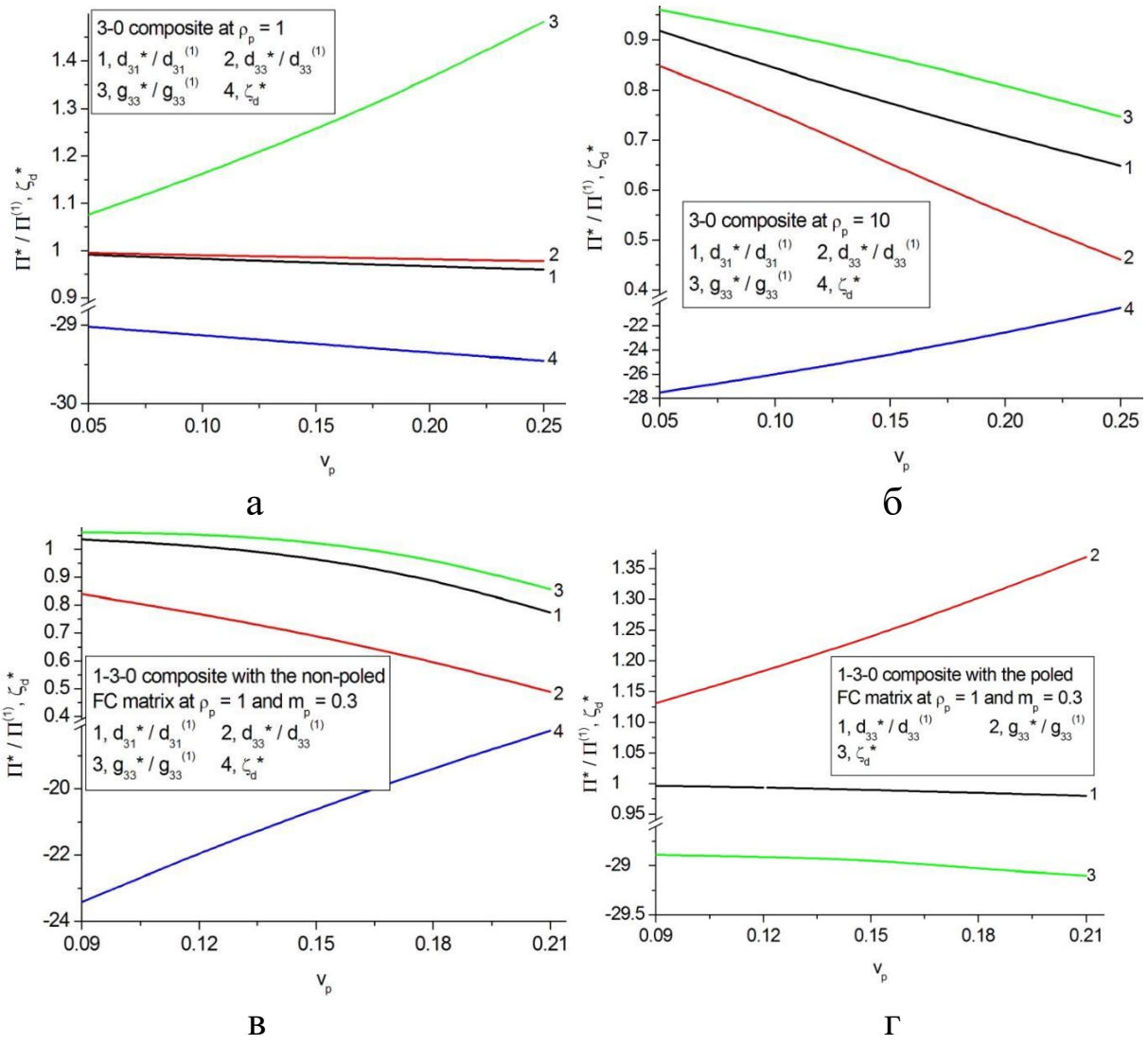


Рис. 3. Расчетные зависимости нормированных пьезокоэффициентов d3j*/ d3j (1), g33* / g33(1) и фактора пьезоэлектрической анизотропии ζd* от пористости vp композита на основе СПК типа PbTiO3. Графики а, б построены по данным, полученным в рамках модели (а). Графики в, г построены по данным, полученным в рамках модели (б), причем график в относится к случаю неполяризованной (пьезопассивной) матрицы. На графике г не показана кривая d31*/ d31(1) вследствие малых (менее 2%) различий между значениями d31*/ d31(1) и d33*/ d33(1). Кривые на графиках в, г приведены для композита, пористость матрицы которого mp = 0.3

Различия между графиками на рис. 3, а и 3, б свидетельствуют о сильном влиянии формы пор на пьезоэлектрический отклик композита даже при идеально поляризованной СПК матрице. Различия между графиками на рис. 3, в и 3, г объясняются заметным влиянием пьезоэлектрических свойств пористой матрицы на исследуемые параметры композита. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными показывает, что модели (а) и

(б) могут быть использованы для интерпретации экспериментальных результатов. Несколько завышенные значения $|\zeta_d^*|$ во всех примерах на рис. 3 обусловлены присутствием однонаправленных пор с аспектным отношением ρ_p = const.

Отметим отдельно, что малые линейные размеры пор (см. рис. 1) в полученных образцах позволяют произвести резку этих образцов на тонкие диски или пластины с высокими частотами толщинного резонанса. Это способствует применениям данных пористых пьезоматериалов в дефектоскопах и аналогичных устройствах, работающих на высоких частотах и эксплуатирующих продольную моду колебаний.

Авторы признательны д.т.н., проф. Паничу А.Е. (ИВТиПТ ЮФУ) за интерес к тематике исследований современных пьезоэлектрических материалов. Авторы благодарны Брыль О.Е. (ИВТиПТ ЮФУ) за помощь при подготовке микрофотографий сечений пористых образцов.

Список литературы

1. Dimitriu E., Bunescu C.M., Iuga A., Ramer R. // Ferroelectrics.– 2002.– Vol. 270.–

2. P. 45–50.

3. Rybjanets A.N., Razumovskaja O.N., Reznitchenko L.A. et al. // Integr. Ferroelectrics.– 2004.– Vol. 63.– P. 197–200.

4. Dunn M.L., Taya M. // J. Amer. Cer. Soc.– 1993.– Vol. 76, N 7.– P. 1697–1706.

5. Тополов В.Ю., Филиппов С.Е., Воронцов А.А. // Нано- и микросист. техника.– 2013.– N 8.– С. 26–30.

6. Nelli Silva E.C., Ono Fonseca J.S., Kikuchi N. // Computat. Mechanics.– 1997.– Vol. 19, N 5. – P. 397–410.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Разработка компьютерной модели для экспериментального исследования методов определения параметров резонансных систем в среде LabVIEW

В. Д. Белан, С.Н. Ключников
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

Вопрос о контроле параметров резонансных систем остается и по сей день очень важным и актуальным, который необходимо решать. Все существующие методы определения электрофизических свойств различных веществ основаны на изменении резонансной частоты и добротности резонатора. Достоинством этих методов является высокая точность.

Основными параметрами резонансной системы являются частота резонанса и добротность, которая может быть выражена через эквивалентные электрические параметры. Практически все применяемые методы для определения добротности являются динамическими, связанными с частотными измерениями в области резонанса.

Первый метод определения добротности, рассмотренный мной, является наиболее распространенным и заключается в том, что находится частота резонанса и резонансный промежуток контура на уровне 0,5 от максимального значения активной составляющей проводимости (рис.1). Добротность впоследствии находится по формуле 1:

$$Q_{м1} = \frac{\omega_р}{\Delta\omega} \qquad (1)$$

Этот метод позволяет определять добротность с высокой точностью, но необходимо проводить измерения в широком диапазоне частот, что приводит к невысокой скорости получения результата.

Для устранения недостатков первого метода имеется метод определения добротности по амплитудным измерениям на одной

характерной частоте. Согласно данному методу для нахождения добротности необходимо взять производную от активной составляющей проводимости. Для расчета добротности используется формула 2.

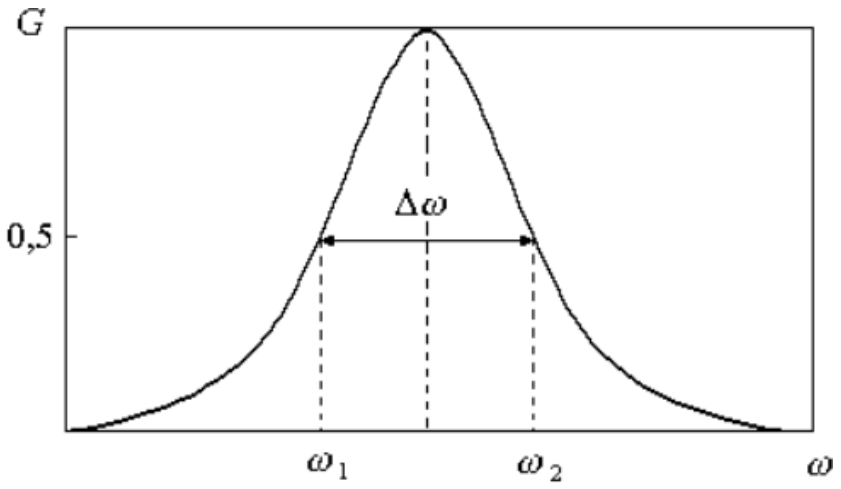


Рис. 1 – Определение добротности по частотной характеристике активной составляющей

$$Q_{м2} = 0{,}58 * \frac{\omega_{max} G'(\omega_{max})}{G(\omega_{max})} \qquad (2)$$

В среде разработки LabVIEW была реализована компьютерная модель, позволяющая определять добротность двумя методами. Визуально для пользователя прибор представлен на рис. 2:

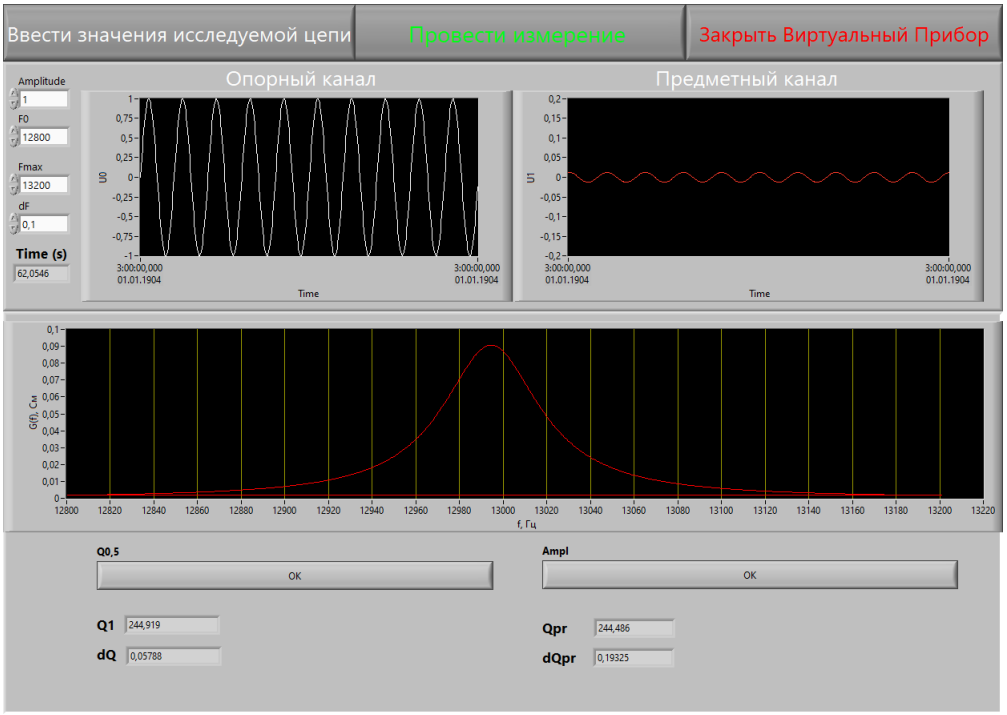


Рис. 2 – "Лицевая панель" прибора

Представленные графики позволяют в реальном времени наблюдать, как ведет себя сигнал на заданной частоте с заданными параметрами. Первый график опорного канала оказывает зависимость напряжения исходного сигнала от времени, второй – зависимость напряжения полученного сигнала после прохождения через RLC цепь от времени. На третьем нижнем графике показана зависимость огибающей активной составляющей проводимости от частоты в области резонанса. Помимо графиков на панели расположены индикаторы, показывающие полученную разными методами добротность, погрешности определения относительно исходной и время, затраченное на получение результата.

При проведении экспериментальных исследований на пяти резонансных цепях была установлена зависимость погрешности определения добротности в зависимости от исходной добротности заданного контура разными методами. На рис. 3–4 представлены графики на основе результатов исследований. Из полученных графиков видно, что с уменьшением исходной добротности погрешность определения параметра первым методом растет, при этом погрешность нахождения добротности вторым методом практически не меняется и составляет порядка 1 %. Также было установлено что положение резонанса заданной цепи на частотной оси не влияет на погрешность определения добротности.

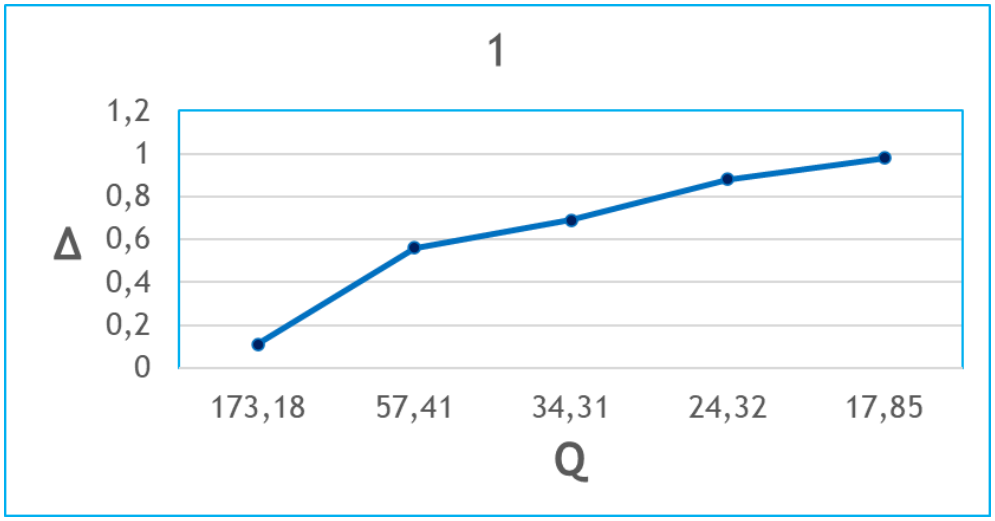


Рис. 3 – Зависимость погрешности от добротности первым методом

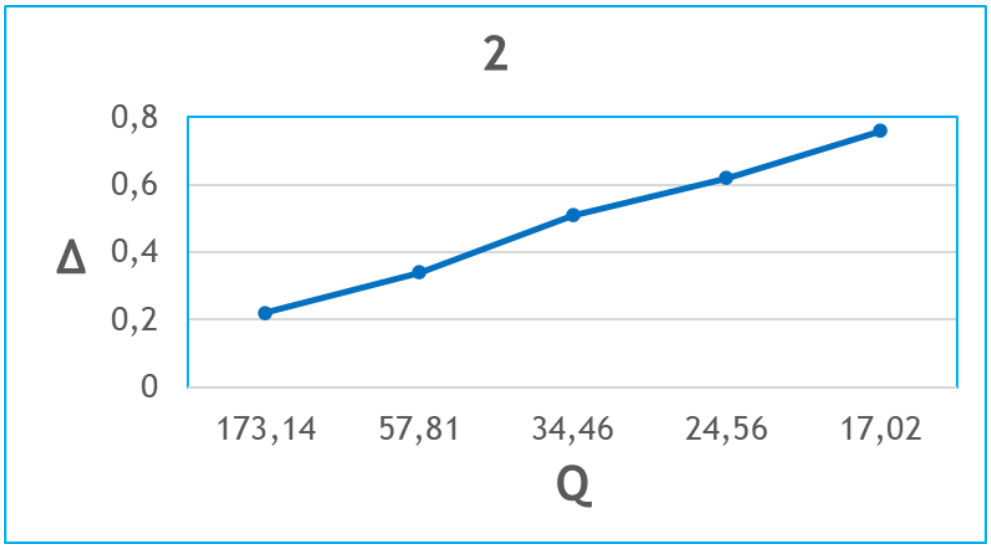


Рис. 4 – Зависимость погрешности от добротности вторым методом

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– метод нахождения добротности на одной частоте затрачивает меньшее количество времени на получение результата, что позволяет использовать данный метод при создании быстродействующих автоматов контроля резонансных систем;

– если необходимо проводить более точные исследования, то лучше использовать первый метод определения добротности.

Список литературы:

1. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям. // Измерительная техника. Ростов н/Д: Изд. ЮФУ. 2010, № 3, с. 38–40.

2. Васильев, А.С. Основы программирования в среде LabVIEW // А. С. Васильев, О.Ю. Лашманов – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 82 с.

3. Ключников С. Н. Методы определения добротности резонансных систем —Ростов н/Д. Изд. ЮФУ. 2011.

Автоматическая система климат-контроля

Карнаухов С. С., Земляков В.Л.
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

Для выращивания тех или иных растений, культур, а также разведения животных существует необходимость в строго определенных климатических условиях. Чтобы обеспечить определенный климат в помещении нужно организовать систему, которая будет поддерживать определенную температуру, влажность и количество света. И чтобы вся эта система могла функционировать нужен микроконтроллер, который сможет отслеживать показатели на датчиках, обрабатывать полученную информацию о среде, и производить действия для поддержания контроля системы.

Основной целью работы являлась разработка надежной не дорогой системы климат-контроля внутри небольшого пространства для дальнейшего выращивания растений или разведения животных в домашних условиях.

Для реализации собственной системы климат контроля, было решено реализовать собственную структурную схему.

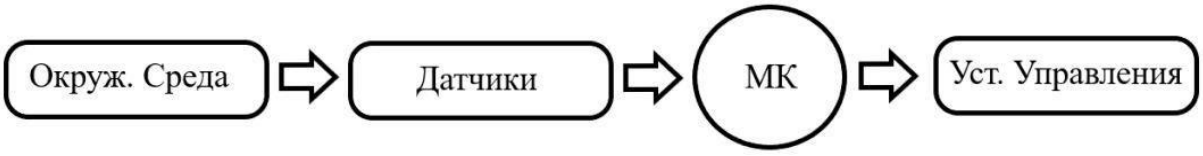


Рис. 1 – Структурная схема

Работа системы заключается в постоянном опросе датчика микроконтроллером, после получения информации об окружающей среде, МК посылает сигнал на определенные устройства управления, такие как нагревательный элемент, увлажнитель воздуха, свет, для корректировки показаний внутри парника. После идет подбор компонентов для бедующей системы.

После подбора компонентов, следующим этапом следует разработка структурной схемы.

По структурной схеме, изображенной на рис. 2 видно, что OLED-дисплей и датчик воздуха используют протокол данных по шине I2C и подключаются к контактам A4(SDA) и A5(SCL). Дат-

чик света, для управления подачи света в зависимости от состояния дня, подключен на аналоговый пин A2. Два модуля транзисторных ключей, подключенных соответственно на цифровые пины D7 и D9 отвечают за поддержания тепла и вентиляции в мини парнике. На вход цифрового пина D8 подключено реле, предназначенное для управления увлажнителя воздуха.

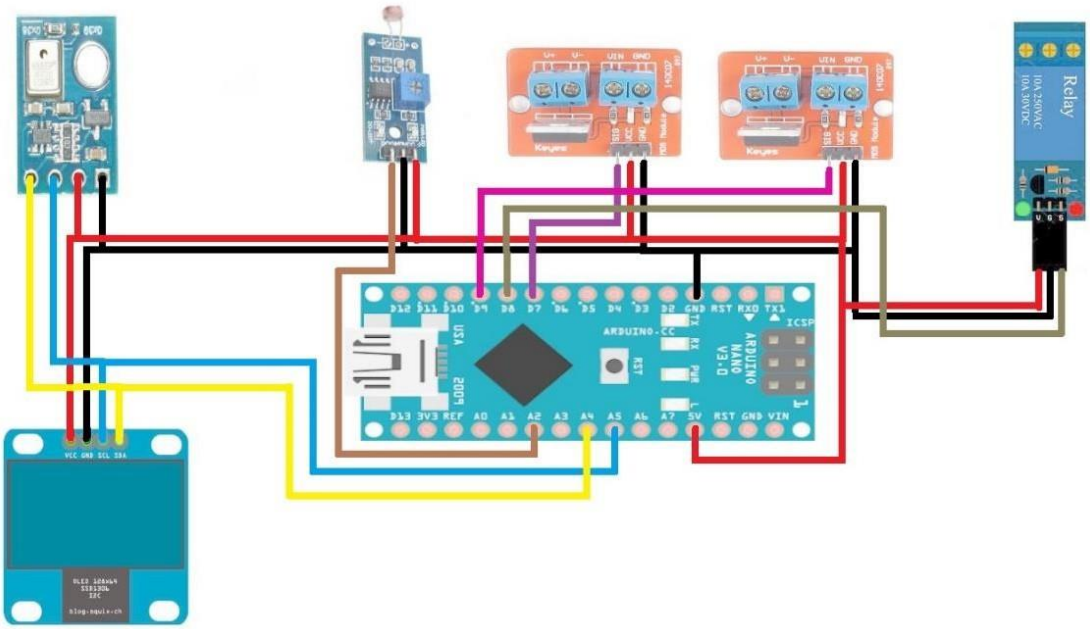


Рис. 2 – Структурная схема

Следующим этапом, после создания структурной схемы идет написание программного кода, для взаимодействия всех элементов с МК.

Главным устройством, на котором будут происходить, все операции является микроконтроллер Arduino Nano.

После разработки структурной схемы, а также написания программного кода, следует сборка системы. Первым делом осуществляется конструирование основного блока управления. Данный блок содержит в себе непосредственно плату Arduino nano, OLED дисплей для отображения информации, кнопки управления, для удобного осуществления настроек параметров системы, а также потенциометр, обеспечивающий регулировку оборотов вентилятора.

После завершения этапа сборки системы идет этап исследования полученной системы.

После установки параметров среды микроконтроллер начинает автоматически сравнивать параметры окружающей среды и передавать соответствующие действия на устройства управления.

Для мониторинга установки значений заданных показателей был использован последовательный порт в среде Arduino, информация с которого передавалась в мониторинг порта, после чего благодаря полученным показателям, были построены графики установки заданных климатических условий, показанные на рис. 3–4.

Из графиков видно, что для установки заданной температуры данной сборке необходимо примерно 8 минут, что можно считать хорошим показателем. Исходя из графика установки заданной влажности, видно, что заданное значение влажности устанавливается за 8,5 минут и держится п пределах 5% от нормы. Погрешность исходит из следующих проблемы:

Используемый увлажнитель воздуха подает пар мощной струей, и изменение влажности изменяется скачкообразно, поэтому микроконтроллер не успевает вовремя выключить увлажнитель. Данную проблему можно решить несколькими способами:

1) В увлажнителе предусмотрена настройка мощности пара, благодаря которой можно подобрать такой поток пара, при котором изменение показания влажности будет минимальным.

2) Установить порог срабатывания отключения увлажнителя меньшим, чем установленная влажность, подобрав определенный порог при отключении влажность сама подберется к установленному значению.

Рис. 3 – График установки заданной температуры

Рис. 4 – График установки заданной влажности

Список литературы:

1. Алексеев, К.Б. Микроконтроллерное управление электроприводом / К.Б. Алексеев, К.А. Палагута. - М.: МГИУ, 2008. - 298 с.

2. Баранов, В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов. - М.: Додэка-XXI, 2006. - 288 с.

3. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino / У. Соммер. - СПб.: BHV, 2016. - 256 с.

4. Э. Р. Хуснутдинов, Электронное пособие «Системы климат-контроля в помещении» / Э. Р. Хуснутдинов - Екатеринбург, 2018. — 49 с

Разработка программно-аппаратного комплекса для определения параметров пьезоэлементов при импульсном воздействии средствами LabVIEW

А.К. Пастухова, С.Н. Ключников
Южный федеральный университет, Институт высоких технологий и пьезотехники, Россия, г. Ростов-на-Дону

Пьезоэлектрическое приборостроение - это одно из современных направлений приборостроения, в котором создаются эффективные и конкурентоспособные приборы и системы, широко применяемые в различных областях науки и техники - радиоэлектронике, виброметрии, гидроакустике и ультразвуковой технике и т.д. Важным этапом при производстве пьезоэлементов является выходной контроль - визуальный осмотр на соответствие чертежу и техническим условиям, контроль поляризации, набор параметров характеризующих диэлектрические и электро-механические свойства изделия[1].

В настоящее время самым распространенным методом контроля параметров является метод измерения амплитудно – частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) пьезоэлемента. Однако данный метод обладает недостатком-низкая скорость контроля, что приводит к потере эффективности при входном или выходном контроле. Рассматриваемый в данной работе метод позволяет решить данную проблему. Основное преимущество импульсного воздействия заключается в высокой скорости измерений, что позволяет создавать эффективные средства контроля изделий пьезотехники в процессе серийного контроля.

Одним из распространенных методов импульсного воздействия на пьезоэлемент является воздействие радиоимпульсом с прямоугольной огибающей и частотой синусоидального заполнения, совпадающей с частотой механического резонанса ПКЭ на определенной моде колебаний [1].

Схема измерений и примерная осциллограмма тока представлены на рис.1.

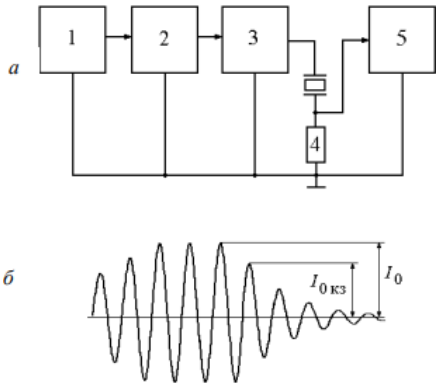


Рис. 1 - Схема измерений при возбуждении ПКЭ радиоимпульсом

Совпадение частоты заполнения радиоимпульса частоте ω_p определяют либо по наибольшей длительности переходного процесса, либо по максимальному значению амплитуды сигнала в начале переходного процесса.

Для создания программно-аппаратного комплекса на основе рассмотренного метода использовалась среда разработки LabVIEW - это среда разработки лабораторных виртуальных приборов, в которой используется особый язык графического программирования, существенно упрощающий проектирование систем любой степени сложности для промышленности, образования и научных лабораторий [2].

С помощью среды LabVIEW был реализован программно-аппаратный комплекс для определения параметров пьезоэлементов при импульсном воздействии, лицевая панель которого представлена на рис. 2.

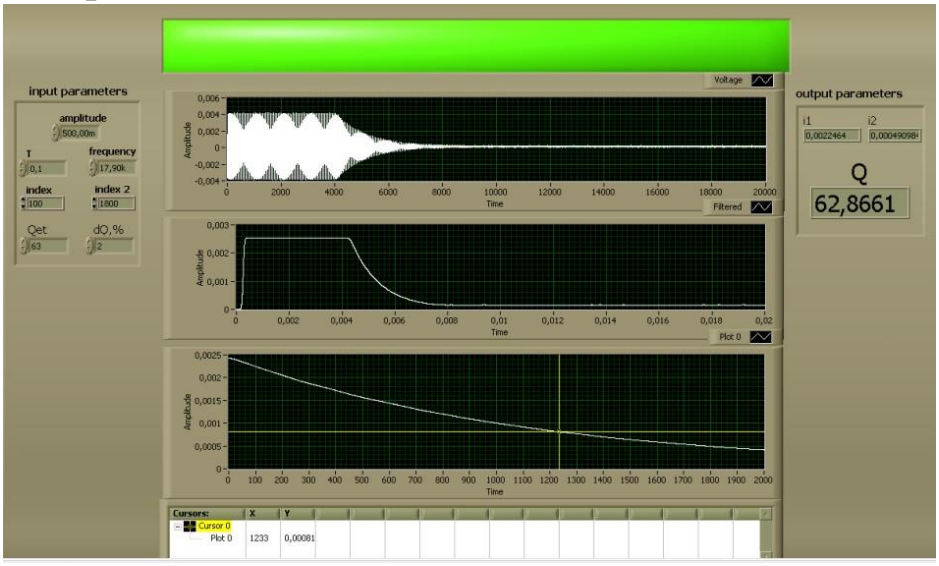


Рис. 2 – Лицевая панель программно–аппаратного комплекса

На лицевой панели расположены контролы для ввода данных, такие как: амплитуда, длительность, частота радиоимпульса. Также имеется возможность задавать положение точек переходного процесса, на основании которых ведется расчет добротности. В установке реализована возможность задавать эталонную добротность и погрешность выходного контроля. Выводными данными являются значения амплитуды и добротности. Так же на лицевой панели добавлен индикатор, с помощью которого можно определить, удовлетворяет ли полученная добротность пьезокерамического элемента заданным граничным условиям [3].

С помощью разработанного программно-аппаратного комплекса, были проведены экспериментальные исследования 4 образцов пьезокерамических элементов различной формы, размеров и материалов.

Для проведения метрологической оценки результатов измерений разработанным прибором, были проведены эталонные исследования на «Impedance Analyzer HIOKI IM 3570».

Результаты измерений образца с частотой резонанса 17,9 кГц представлены на рис. 3.

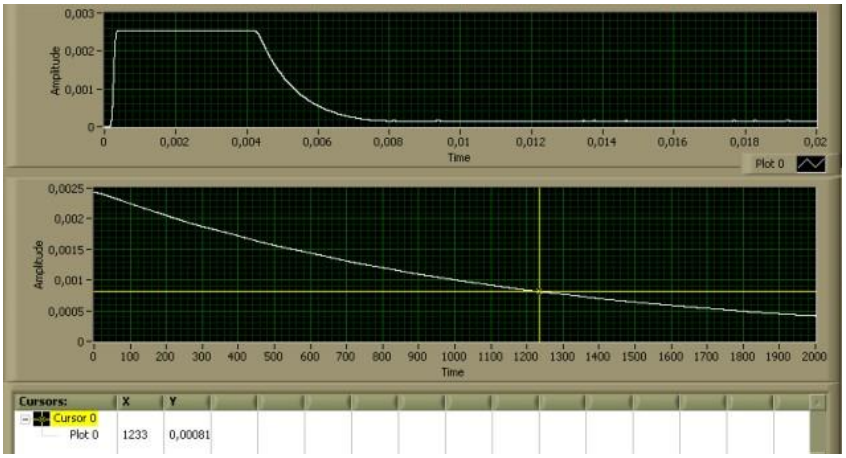


Рис. 3 - Измеренный переходной процесс

По результатам сравнения с эталонными измерениями можно сделать вывод, что разработанный прибор имеет допустимые для серийного контроля метрологические характеристики и позволяет быстро и эффективно определить добротность с погрешностью в пределах 2%. Также были проведены исследования за-

висимости погрешности нахождения добротности от величины исходной добротности исследуемого образца. Было установлено, что с ростом исходной величины добротности, погрешность определения добротности разработанным прибором тоже возрастает. Проанализировав полученные результаты, установлено, что повышение погрешности обусловлено тем фактом, что сопротивление дополнительного резистора сопоставимо с сопротивлением исследуемого элемента.

Таким образом разработан эффективный программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить разбраковку пьезокерамических элементов в процессе серийного производства или входного контроля по величине добротности. Прибор работает корректно и готов к эксплуатации, его удобно использовать для проведения исследований различных пьезоэлементов в широком диапазоне частот.

Список литературы

1. Земляков, В.Л. О контроле параметров пьезоэлектрического преобразователя-излучателя. // Пьезоэлектрические материалы и преобразователи [текст] / Земляков В.Л., Милославский Ю.К. – Ростов н/Д: РГУ вып. 8, 1989, с. 136−142.

2. "Использование виртуальных инструментов LabVIEW" [текст]/ Жарков Ф., Каратаев В., Никифоров В. – Издательство: Радио и связь, Горячая Линия - Телеком, СОЛОН,1999.

3. Васильев, А.С. Основы программирования в среде LabVIEW[текст] / А.С. Васильев, О.Ю. Лашманов – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 82 с.

Компьютерное моделирование измерительных задач в пьезоэлектрическом приборостроении

В.Л. Земляков, С.Н. Ключников
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

На начальных этапах изготовления пьезокерамического элемента (ПКЭ) или пьезопреобразователя часто возникает необходимость компьютерного моделирования его параметров. При этом в качестве исходных данных выступают частотные характеристики ПКЭ в области резонанса.

В предлагаемой работе описана простая компьютерная модель для оценки качества ПКЭ, построенная в среде Matlab+Simulink, в которой определение различных параметров ПКЭ производится по частотной характеристике активной составляющей проводимости. В зависимости от заложенного алгоритма определение параметров ПКЭ проводится различными методами. Например, по измерениям в характерных точках частотной характеристики или методом, основанным на интегрировании частотной зависимости активной составляющей проводимости в области механического резонанса [1].

На рис. 1 показана разработанная Simulink-модель.

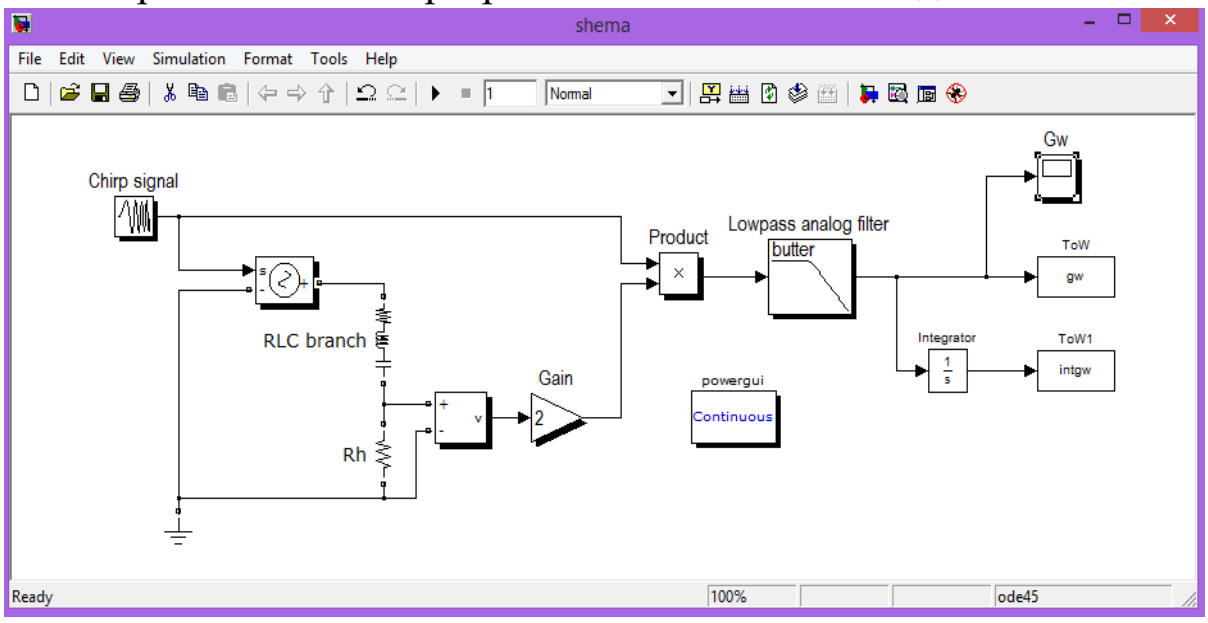


Рис. 1 – Simulink-модель

В блоке ЛЧМ сигнала (ChirpSignal) будут задаваться диапазон изменения частот ЛЧМ сигнала (от начальной до конечной) и время, через которое величина начальной частоты сигнала линейно измениться до значения конечной. От этого блока два идентичных синфазных сигнала будут поступать на перемножитель. Первый сигнал сразу пойдет на перемножитель, а второй будет проходить через резонансную *RLC* цепочку, являющуюся динамической ветвью параллельной $RLCC_0$ цепи электрической эквивалентной схемы ПКЭ, и характеризующую активную составляющую проводимости.

После прохождения резонансной *RLC* цепи амплитуда второго сигнала будет усиливаться ОУ, коэффициент усиления которого равен 2. Необходимость усиления амплитуды сигнала вызвана тем, что при перемножении двух синусоидальных сигналов будет появляться коэффициент 0.5, который необходимо компенсировать.

После перемножителя сигналов необходимо установить фильтр низких частот (ФНЧ). Перемножитель сигналов и ФНЧ в совокупности представляют собой синхронный детектор, которой позволяет выделить активную составляющую проводимости эквивалентной электрической схемы ПКЭ. Сигнал на выходе ФНЧ необходимо разделить на две части: первая часть будет подключена к осциллографу, для получения частотной зависимости активной составляющей проводимости в графическом виде, а вторая – будет подключена к интегратору, для определения с точностью до константы $\pi/2$ обратной величины динамической индуктивности L.

Далее нам необходимо связать Simulink модель с графическим интерфейсом GUI для наглядности и простоты проведения исследования. Один из вариантов интерфейса программы представлен на рис. 2.

Эталонные параметры – это известные параметры элементов эквивалентной схемы ПКЭ. Диапазон частот – это крайние значения частот, внутри которых производится расчет и обработка данных.

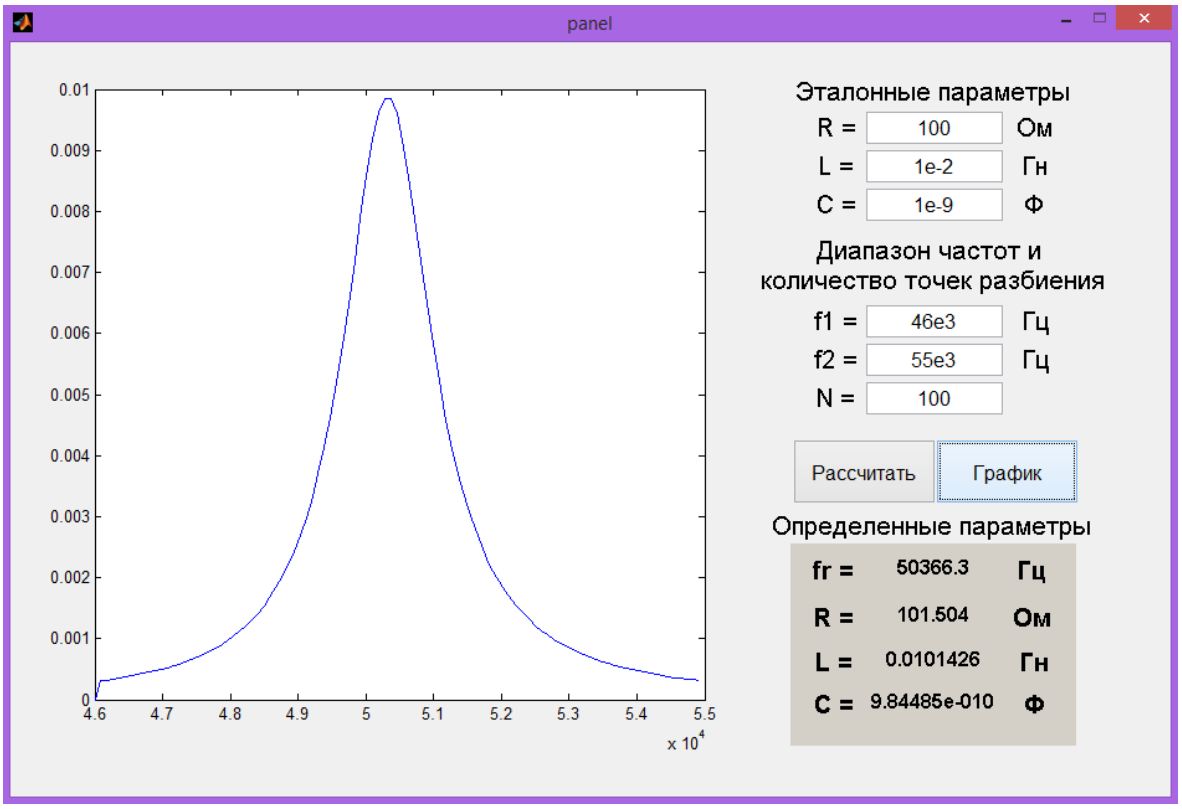


Рис. 2 – Интерфейс программы

Диапазон частот выбирается исходя из рекомендаций для того, или иного метода обработки. В данном примере диапазон частот проведения измерений выбран с учетом рекомендаций к методу, основанному на интегрировании частотной зависимости активной составляющей проводимости в области механического резонанса: частоты f_1 и f_2 удовлетворяют условию $(f_1 f_2)^{1/2} \approx f_p$, а диапазон измерений в 4 – 5 раз превышает ширину резонансной кривой активной составляющей проводимости на уровне 0,5 от максимального значения.

В качестве примера использования описанной компьютерной модели определим, как количество точек измерений влияет на точность определения параметров эквивалентной электрической схемы ПКЭ. Для этого найдем зависимость относительной погрешности Δ от количества точек измерений для каждого из определяемых параметров. Для наглядности полученных результатов запишем полученные данные в документ Microsoft Excel и построим график искомой зависимости (рис. 3)

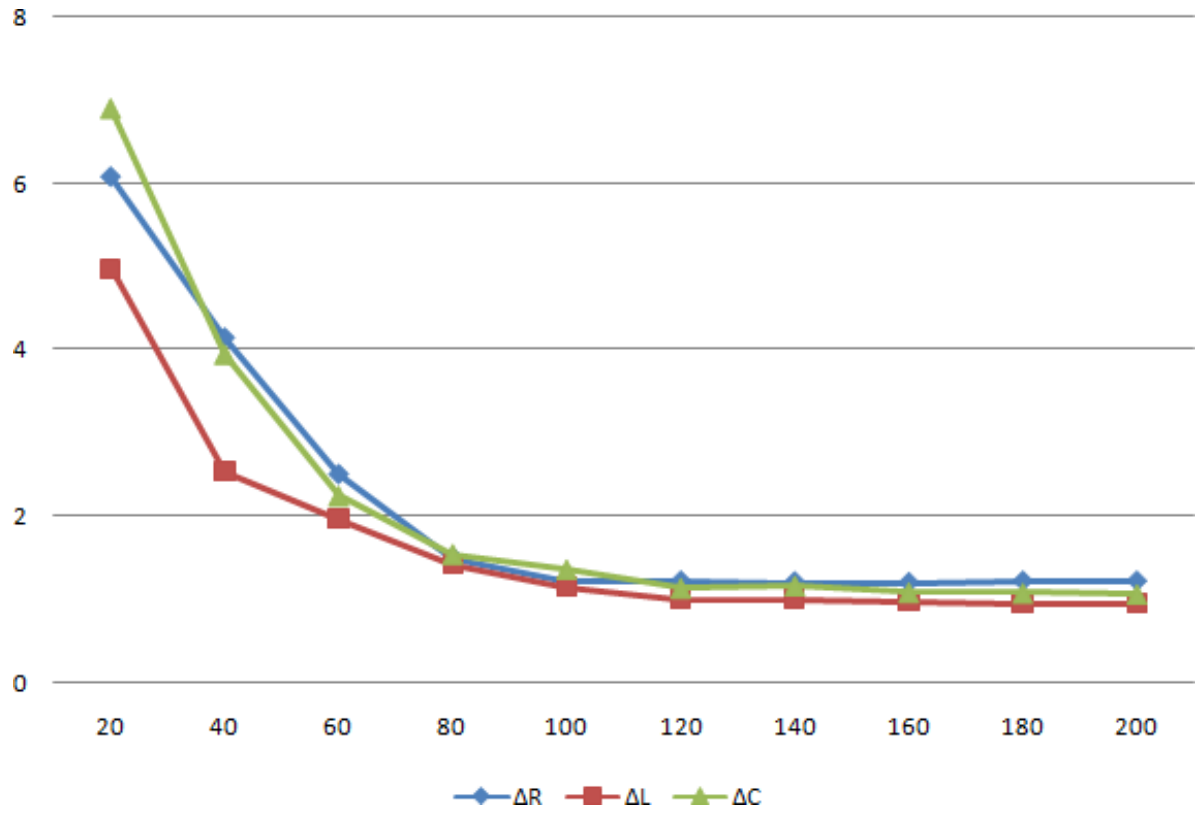


Рис. 3 – Зависимость относительной погрешности определения параметров от количества точек разбиения

Можно сделать вывод, что, при малом количестве точек измерения, величина относительной погрешности определения параметров эквивалентной электрической схемы ПКЭ будет высокой. Для достаточно высокой точности определения параметров необходимо порядка 100 точек измерения. Дальнейшее увеличение количества точек не будет существенно влиять на точность измерения.

Список литературы

1. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).

Исследование методов определения пьезомодуля на нестандартных пьезоэлементах

А. М. Васильев, В.Л. Земляков
Южный Федеральный Университет Ростов-на-Дону

Метод «резонанса-антирезонанса» является наиболее распространенным. Данный метод используют для определения таких параметров как коэффициент электромеханической трансформации, пьезомодуль, коэффициент электромеханической связи и т.д.

Однако метод «резонанса–антирезонанса» имеет ряд недостатков несмотря на то, что он прост в реализации и широко распространен. В частности, он применим только для образцов пьезокерамических элементов (ПКЭ) стандартной формы (стержень, столбик, диск), и неприменим для ПКЭ произвольной формы.

Поэтому актуальной является задача разработки метода измерений пьезомодуля для ПКЭ произвольной формы.

Подход к определению пьезомодулей d_{ij} по различным модам колебаний ПКЭ в динамическом режиме, использующий решение электромеханической задачи, основан на взаимозависимости d_{ij} и коэффициента электромеханической связи материала k_{ij}. Необходимые расчетные соотношения приведены, например, в [2]. В частности, для ПКЭ в форме:

- стержня

$$d_{31} = k_{31}\left(\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} S_{11}^{E}\right)^{1/2}, \qquad (1)$$

- столбика

$$d_{33} = k_{33}\left(\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} S_{33}^{E}\right)^{1/2}, \qquad (2)$$

- диска

$$d_{31} = k_{p}\left(\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}} S_{11}^{E}\left(1-\sigma\right)/2\right)^{1/2}. \qquad (3)$$

Беря во внимание зависимость коэффициента электромеханической связи материала от частот резонанса и антирезонанса, можно определять пьезомодуль материала по результатам изме-

рений ω_p и ω_a, и измерений емкости ПКЭ известных размеров на низкой частоте.

Исходя из решения электромеханической задачи, в [4] представлена обобщенная формула для определения пьезомодуля ПКЭ различной формы:

$$d_{ij} = \frac{A*10^{-6}}{\sqrt{\rho} f_p D} \sqrt{\left(\frac{s^T}{s_0}\right)} \frac{\delta_r}{1+B\delta_r}, \qquad (4)$$

где $\delta_r = \frac{f_a - f_p}{f_p}$ – относительный резонансный промежуток, A, B – некоторые коэффициенты, D – частотозадающий размер (таблица 1).

Таблица 1.

Коэффициенты для определения пьезомодуля

d_{ij}	Форма ПКЭ	A	B	D
d_{31}	диск	1,91	1,45	диаметр
	пластина	1,60		сторона
	брусок	2,34	1,47	длина
d_{33}	столбик		1,53	
d_{15}	пластина			толщина

Рассмотрим другой подход к определению пьезомодулей [3].

За основу будет взята связь пьезомодуля с коэффициентом электромеханической трансформации n_e, который характеризует пьезоэлектрические свойства. Данный параметр используется, когда реальный ПКЭ заменяется обобщенной эквивалентной электромеханической схемой.

На определённой моде колебаний коэффициент электромеханической трансформации связан с пьезомодулем линейной следующим образом $n_e = \alpha_{ij} d_{ij}$. Значение коэффициента пропорциональности α_{ij} зависит от формы, геометрических размеров и упругой податливости материала ПКЭ.

Учитывая связь параметров эквивалентной электрической схемы ПКЭ с коэффициентом электромеханической трансформации, а именно, с динамической индуктивностью и емкостью, в [1] получена формула:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{1}{\omega_p^2 L} = \beta_{ij} C, \qquad (5)$$

Таким образом, для ПКЭ заданной формы и размеров можно определить пьезомодуль материала, как следует из (5), если измерить каким-либо методом один из динамических параметров (L или C) его эквивалентной электрической схемы.

Используя полученное выше соотношение, для определения пьезомодуля можно применять метод, который является аналогом метода «резонанса–антирезонанса». Проведем несложные преобразования.

В результате, измеряя частоты резонанса, антирезонанса и емкости ПКЭ на низкой частоте, можно определить динамическую емкость и пьезомодуль по формуле:

$$C = C^{\text{т}} \left(\omega_a^2 - \omega_p^2\right) / \omega_a^2 .$$

То есть

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{C^{\text{т}} (\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2}, \qquad (6)$$

Данный метод с применением формулы (6) для определения пьезомодуля представляет собой аналог метода «резонанса-антирезонанса», т.к. для расчетов нужны те же исходные данные: частота резонанса, частота антирезонанса и емкость ПКЭ на низкой частоте. Отличие в том, что расчеты проводятся по разным формулам.

Сравним методы определения пьезомодуля на образцах ПКЭ изготовленных из материала ЦТБС-3.

Для образца ПКЭ в виде стержня:

Метод «резонанса-антирезонанса»

$$k_{31}^2 = 0{,}084, \qquad \varepsilon_{33}^T = 16{,}69 * 10^{-9}, \qquad S_{11}^E = 10{,}5 * 10^{-12},$$

$$d_{31}^2 = 0{,}084 * 16{,}69 * 10^{-9} * 10{,}5 * 10^{-12} = 14686 * 10^{24},$$

$$d_{31} = 121{,}2 * 10^{-12}.$$

Аналог метода «резонанса-антирезонанса»

Константа метода:

$$\beta_{31}^C = \frac{\pi^2}{8} \frac{t}{wl} S_{11}^E = \frac{3{,}14^2 * 6 * 10{,}5 * 10^{-12}}{8 * 7 * 34 * 10^{-3}} = 3{,}26 * 10^{-10}$$

$$d_{31}^2 = \beta_{31}^C C^T \frac{(\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2} = 3{,}26 * 10^{-10} * 662 * 10^{-12} * 0{,}068$$
$$= 14675 * 10^{-24},$$
$$d_{31} = 119{,}71 * 10^{-12}.$$

Для образца ПКЭ в виде кольца:

Аналог метода «резонанса-антирезонанса»

Константа метода:

$$\beta_{31}^k = \frac{t}{\pi(R + r)W} S_{11}^E = \frac{2{,}7 * 11{,}05 * 10^{-12}}{3{,}14 * 30{,}3 * 10 * 10^{-3}} = 0{,}31 * 10^{-10}$$
$$d_{31}^2 = \beta_{31}^k C^T \frac{(\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2} = 0{,}31 * 10^{-10} * 6659 * 10^{-12} * 0{,}068$$
$$= 13736 * 10^{-24},$$
$$d_{31} = 117{,}2 * 10^{-12}.$$

Для образца ПКЭ в виде шайбы:

Аналог метода «резонанса-антирезонанса»

Константа метода:

$$\beta_{31}^{\text{ш}} = \frac{t}{\pi(R^2 - r^2)} S_{11}^E = \frac{3{,}2 * 10{,}29 * 10^{-12}}{3{,}14(81 - 25) * 10^{-3}} = 1{,}87 * 10^{-10}$$
$$d_{31}^2 = \beta_{31}^{\text{ш}} C^T \frac{(\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2} = 1{,}87 * 10^{-10} * 848 * 10^{-12} * 0{,}094$$
$$= 14906 * 10^{-24},$$
$$d_{31} = 120{,}77 * 10^{-12}.$$

В результате проведения исследования можно сделать следующие выводы: метод аналогичен методу «резонанса-антирезонанса» поскольку для его реализации требуются те же исходные данные; новый метод определения пьезомодуля даёт одинаковый результат в пределах относительной погрешности 3%.

Список литературы

1. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.

2. IRE Standards on Piezoelectric Crystals: measurements of piezoelectric ceramics // Proc. IRE. 1961. V. 49. P. 1161–1169.

3. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).

4. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ

Разработка моделей бизнес-процессов цеха утилизации автомобильных покрышек

С.Д. Данельянц, доцент, к.т.н. Н.С. Ксенз
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Утилизация автомобильных покрышек на данный момент является актуальной деятельностью, так как количество автомобилей в городе Ростов-на-Дону и иных субъектах РФ ежегодно увеличивается, а шины зачастую сжигаются или закапываются. Данный вид утилизации вреден для окружающей среды и не выгоден для компании.

Автомобильные покрышки являются одним из лучших ресурсом для вторичной переработки, так как резина, используемая для автомобилей, обладает самыми высокими показателями прочности и долговечности. Товарные продукты, полученные из переработанных автомобильных покрышек, сохраняют свойства исходного материала. Но в то же время, они являются куда более дешевыми как для производства, так и для клиентов.

Перед запуском цеха утилизации автомобильных покрышек необходимо проектирование бизнес-процессов его функционирования. Для разработки и внедрения линии по утилизации автомобильных покрышек разработаны модели бизнес-процессов с использованием различных нотаций функционального моделипрования. Для фиксации целей и стратегии компании, разработана стратегическая карта, контекстная диаграмма, построена в нотации IDEF0. Декомпозиция контекстной диаграммы описывает последовательность процессов цеха утилизации: согласование заказа, утилизация ртутных ламп, утилизация автомобильных покрышек, контроль качества.

Декомпозиция блока «Утилизация автомобильных покрышек» в нотации IDEF3 представлена на рис. 1.

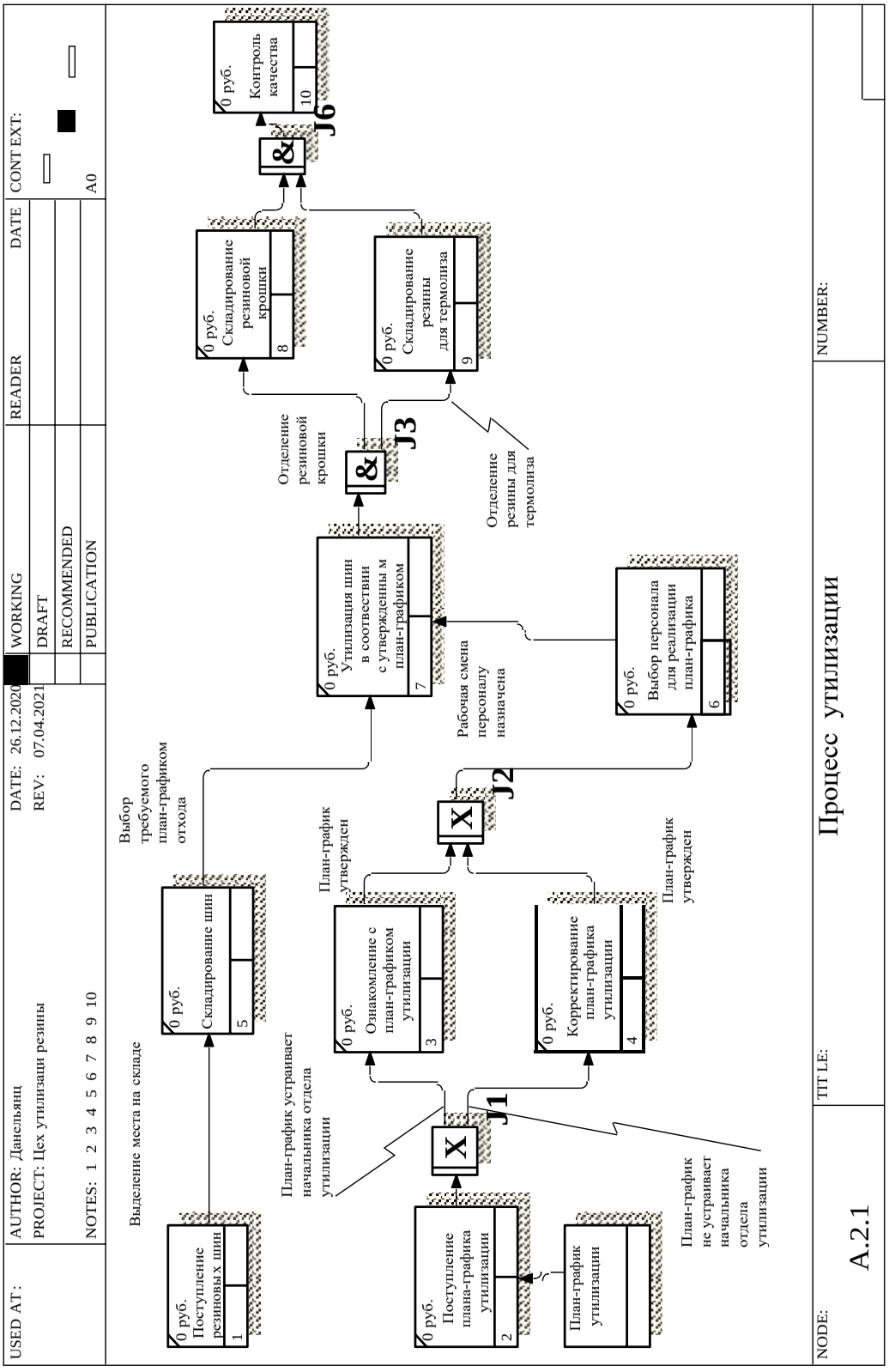


Рис. 1 – Утилизация автомобильных покрышек

Так как ООО «ППФ Техноэколог» следует внедрить линию по переработке автомобильных покрышек не только для утилизации, но и для продажи резиновой крошки, то необходимо построить диаграмму процесса «Резервирование резиновой крош-

ки» в нотации BPMN. На ней определены события, исполнители, материальные и документальные потоки, сопровождающие выполнение процесса.

При анализе результатов имитационного эксперимента процесса выявлено, что изначально поступило 26 заявок от клиентов, из которых 3 были отклонены, и от 3 клиенты отказались. Полностью оформить заявки и получить счет на оплату смогли 16 клиентов, причем ни один платежеспособный клиент не отказался от заказа, так как все процессы выполнены в требуемый срок. Наличие нового оборудования для обработки заявок и интернет-база ресурсов позволит повысить скорость резервирования резиновой крошки. Это значит, что предложения по улучшению процесса позволят достичь лучшего результата, они целесообразны и эффективны.

Внедрение линии по переработки автомобильных покрышек позволит ООО ППФ «Техноэколог» предложить клиентам новые услуги и продукт в виде товарной резиновой крошки. Повторное использование резины позволяет создавать высококачественные товарные продукты по низкой себестоимости, и продавать их по выгодной для обеих сторон цене. Внедрение линии по утилизации автомобильных покрышек позволит ООО «ППФ Техноэколог» оказывать платные услуги по утилизации автомобильных покрышек, а также продавать конечный продукт, полученный из переработанных шин.

Список литературы

1. Нотации моделирования бизнес-процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.businessstudio.ru/products/business_studio/ notations/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 26.05.2021)

2. Шулдякова, К. А. Утилизация изношенных автомобильных шин в России – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://moluch. ru/archive/130/35973, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 26.05.2021)

Анализ процессов оказания ремонтных услуг на основе имитационного моделирования

Н.Д. Медведев, доцент, к.т.н. Н.С. Ксенз
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Большую роль играет уверенность покупателей техники беспроблемной эксплуатации. Производители уделяют особое внимание гарантийному и постгарантийному обслуживанию и ремонту, поскольку любые отклонения от гарантийных обязательств могут отрицательно повлиять на репутацию предприятия и снизить доверие к бренду у клиентов – покупателей и владельцев техники. Процесс оказания ремонтных услуг АО ОКБ «Ростов-Миль» начинается с подачи заявки клиентом в которой он описывает все неисправности авиационной техники. В данной работе рассмотрено поступление заявки на устранение дефектов работы фары вертолета Ми-2. Для начала заявка обрабатывается в отделе по работе с клиентами, в заявке клиент описывает все дефекты и неисправности работы фары. Затем осуществляется прием АТ в цех с передачей гарантийного талона и паспорта механизма. Далее осуществляется осмотр фары и диагностика неисправностей на борту вертолета без демонтажа. Если неисправность вызвана неправильной эксплуатацией, то клиенту направляется соответствующее письмо. При обнаружении неисправности работы механизма производится ее демонтаж, полная разборка и определяется характер неисправности. Типовыми причинами поломки могут выступать: перегорание световой колбы, стирание щеток и нарушение изоляционного покрытия. После устранения причин поломки, фару собирают и монтируют на борт вертолета, где осуществляется контрольная проверка ее работоспособности. Если дефект не устранен, мастера начинают поиск неисправности заново. По результатам устранения всех дефектов фары, заказчику предоставляют информацию об успешном проведение ремонтных работ, делается пометка в ПКД и гарантийном талоне. Заказ в таком случае считается выполненным.

С целью анализа процессов оказания ремонтных услуг построена имитационная модель процесса ремонта фары в среде Business Studio в нотации BPMN. В результате анализа полученной имитации выявлено, что изначально поступило 27 заявок от клиентов, из которых 11 отклонены в связи с неправильной эксплуатацией. Показатель ремонта световой колбы равен 3, показатель восстановления щеточного узла равен 6.

Затем проведена модернизация процесса ремонта фары. На рис. 1 представлена ход имитации модернизированного процесса ремонта фары.В модели «То-Ве» для данного процесса проведены мероприятия по улучшению бизнес-процесса, а именно:

1) в целях более точного тестирования дефекта механизма решено включить стенд по проверке электрооборудования, взятый из преддипломной практики (отсутствие данного стенда в первоначальной модели объясняется тем, что ранее, ввиду высокой стоимости, считался нерентабельным и также его использование позволит увеличить в несколько раз процесс определения дефектов механизмов, что в дальнейшем приведет к сокращению срока ремонтных работ на предприятие);

2) основной проблемой предприятия является несоблюдением сроков выполнения заказа, в целях более структурированного приема заказов введена база данных отчетов с неправильной эксплуатацией (отсутствие данной БД в первоначальной модели объясняется тем, что на предприятие не достаточного количества персонала владеющим знаниями в этой сфере, а также ее использование позволит начальнику цеха отслеживать случаи, когда некорректная работа механизма, вызвана отсутствием знаний клиента по эксплуатации АТ, что поспособствует сдаче авиационной техники в срок);

3) введение базы данных готовых заказов является шагом навстречу клиенту (в дистанционном режиме заказчики смогут просматривать отчеты о проведение ремонтных работ, что в свою очередь повысит уровень обращений в нашу компанию, а в долгосрочной перспективе это приведет к росту новых заказов).

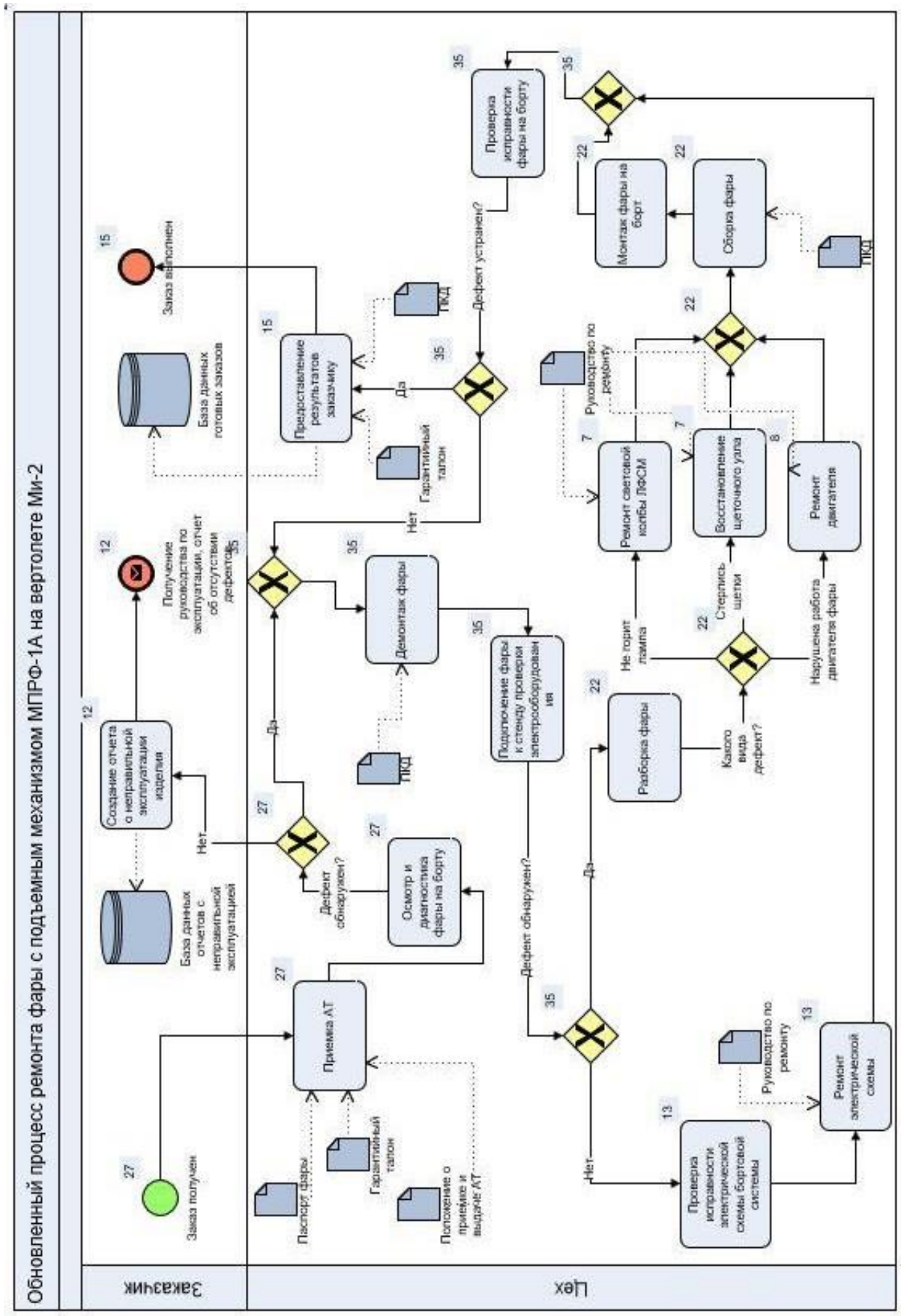


Рис. 1 - Имитационная модель ремонта фары с подъемным механизмом МПРФ-1А в нотации BPMN

По резудьтатоам имитационного эксперемента модернизированного процесса выявлено, что изначально поступило 27 заявок от клиентов, из которых 15 отклонены. Показатель ремонта световой колбы равен 4, показатель восстановления щеточного узла равен 1 и показатель ремонта изоляционного покрытия равен 10. Это означит, что введенные предложения по улучшения процесса позволили в быстрый срок решить проблему с некорректной эксплуатацией авиатехники клиентами, а также повысить скорость выявления дефектов механизмов, а предложенные изменения целесообразны и эффективны.

Список литературы

1. Оптимизация бизнес-процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://proza.ru/2020/01/16/1023 свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 10.04.2020)

2. Моделирование бизнес-процессов в Business studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://businessarchitecture.ru/modeling-business-studio/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 07.04.2021)

Применение технологий Data Science и решений на основе анализа больших данных и машинного обучения в производственной деятельности инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД»

Е.А. Дармина, О.В. Граецкая
Институт высоких технологийи пьезотехники
Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия

Железнодорожные сети одни из крупнейших капиталоемких активов в России. Даже небольшое улучшение в управлении активами принесет большую пользу. Мотивация к управлению состоянием активов и движение к техническому обслуживанию на основе их состояния служат толчком к внедрению технологий науки о данных, больших данных и машинного обучения. Это распространяется не только на инфраструктуру, но и на активы всех классов, включая транспортные системы, операции, подвижной состав, услуги и безопасность.

Цифровая трансформация коренным образом изменит способ работы в отрасли, особенно в том, что касается оценки рисков и безопасности. Из-за современных мощных вычислений и стремительного роста доступности данных и расширенной аналитики есть возможности использования подхода больших данных для выявления сценариев высокого риска на железной дороге. Также есть возможности для снижения затрат и повышения устойчивости за счет использования машинного обучения на протяжении всего жизненного цикла системы, включая, определение требований, проектирование системы, анализ рисков, производство, тестирование и эксплуатацию.

Проведенный анализ показал, что основными направлениями внедрения технологии Data Science в деятельность ОАО «РЖД» могут быть:

- контроль дислокации и состояния подвижного состава;
- контроль перевозимых грузов;
- контроль инфраструктуры;

– контроль и учет потребления тепла, воды и электроснабжения;

– контроль производственных операций.

В качестве примера реализации данных направлений может быть внедрение системы управления поездами «Ласточка» без машиниста в кабине (рис.1), которая предусматривает:

– управление поездами из единого ЦУПа;

– один оператор-машинист контролирует до десяти поездов;

– автоматическое управление поездом при движении и остановка поезда;

– действия при внештатных ситуациях выполняет проводник.

Рис. 1 - Система управления поездами «Ласточка» без машиниста в кабине

Таким образом, проведенный анализ позволил определить возможные направления применения технологий Data Science и решения на основе анализа больших данных и машинного обучения в производственной деятельности инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», внедрение которых улучшит процессы управления активами.

Модель управления высокотехнологичным проектом

Заведующий кафедрой прикладной информатики и инноватики
Южного федерального университета к.т.н., доцент О.Д. Глод
Институт высоких технологий и пьезотехники
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Моделирование высокотехнологичных проектов представляет собой трудную задачу. Любой параметр высокотехнологичного проекта характеризуется большой степенью неопределенности и риска. Выбор модели также представляет собой проблему. Для формализации таких задач важным является учет мнений специалистов-экспертов. Учет мнений экспертов задается с использованием математического аппарата нечеткой логики. В работе предложена сетевая модель выполнения работ по управлению технологичным проектом, учитывающая мнения экспертов.

Точного определения понятия высокотехнологичный проект не существует, но определения относят к таким проектам все те, которые отличаются наукоемкостью, финансовыми затратами, использованию новых технологий при планировании и реализации проекта, повышенными степенями риска при реализации проекта [1]. Такие проекты требуют от участников знаний современных технологий, способностей участвовать в командной работе.

В работе [1] предложен адаптивный подход управления высокотехнологичным плохоструктурированным процессом, основанный на достижении определенных функций цели. Под целями здесь принимают стоимость время, качество. Ресурсами достижения цели принимаются инвестиции, профессиональные компетенции, программные продукты и другие ресурсы.

Высокотехнологические проекты традиционно реализуются в таких областях, как объекты оборонного комплекса, космических исследований, робототехника, медицина, наноматериалы, энергетический комплекс. В настоящее время актуально внедрение высоких технологий в агропромышленный комплекс и защиту окружающей среды. Развитие средств вычислительной техни-

ки, компьютеризация и цифровизация экономики подразумевают очень активное использование средств вычислительной техники, гаджетов во всех сферах человеческой деятельности. Возросло количество пользователей мобильных телефонов, для которых создаются всевозможные приложения. Разработками мобильных приложений заняты не только ведущие IT- компании, но и многие другие компании. Можно сказать, что разработка мобильного приложения сегодня – это высокотехнологичный проект.

Мобильное приложение – это программное обеспечение, которое разрабатывается под конкретную платформу, к примеру, на iOS, Android, Windows Phone и т. д Приложения предназначены для использования на различных гаджетах. Использование мобильных приложений открыло множество возможностей для разработчиков. Например, со временем, разрабатывались мобильные приложения, которые расширяя свой функционал, так же могли использовать дополнительные устройства, встроенные в гаджеты, такие как фотокамеры, микрофоны и другие. В том числе стали использовать интернет для создания различных онлайн мобильных приложений.

При разработке современных мобильных приложений большое внимание обращается на следующие характеристики: время запуска, отклик устройств, фокусировка внимания на отдельных задачах, надежность взаимодействия с внешними источниками информации.

Кроме перечисленных технических характеристик, измеряемых количественно, современный интерфейс должен обладать некими качественными характеристиками, не поддающимися количественному описанию, но имеющими огромное значение для пользователя. Одной из таких характеристик является единообразие стиля интерфейса.

Для того чтобы разработать мобильное приложение, необходимо выполнить следующие основные задачи:

1. Анализ предметной области.
2. Анализ существующих мобильных приложений в данном направлении.

3. Анализ предъявляемых требований к современным мобильным приложениям.

4. Анализ существующих технологий для создания мобильных приложений.

5. Разработка технического задания и последующее ее согласование с заказчиком.

6. Определение основных функций мобильного приложения.

7. Проектирование и построение UML диаграмм.

8. Выбор технологий и средств для разработки приложения.

9. Построение макета и проектирование пользовательского интерфейса.

10. Разработка алгоритмов обработки информации.

11. Разработка и описание методик тестирования мобильного приложения.

12. Тестирование готового приложения.

Планирование и управление комплексом работ представляет собой сложную и, как правило, противоречивую задачу. Если принять за один из критериев достижения цели управления высокотехнологичным проектом время, в течение которого реализуется проект, и стоимость выполнения этапов проектных работ, то можно воспользоваться для этого методом сетевого планирования и управления (СПУ).

Основным плановым документом в системе СПУ является сетевой график, представляющий собой информационно – динамическую модель, в которой отражаются взаимосвязи и результаты всех работ, необходимых для достижения конечной цели разработки.

Простейшая одноцелевая сетевая модель показана на рис.1.

Сетевая модель изображается в виде графика (сети), состоящего из стрелок и кружков.

Стрелками сети изображаются отдельные работы, а кружками – события. Над стрелками указывается ожидаемое время выполнения работ.

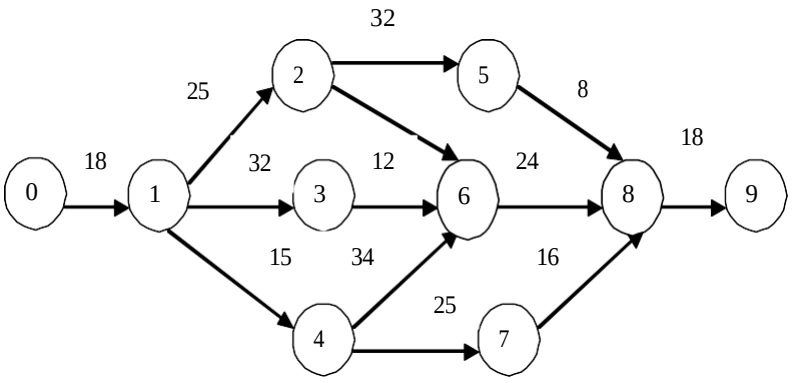


Рис.1. Сетевая модель

Этапы разработки и управления ходом работ с помощью сетевого графика имеют следующую последовательность основных операций:

1) составление перечня всех действий и промежуточных результатов (событий) при выполнении комплекса работ и графическому их отражению;

2) оценка времени выполнения каждой работы, а затем расчет сетевого графика для определения срока достижения поставленной цели;

3) оптимизация рассчитанных сроков и необходимых затрат;

4) оперативное управление ходом работ путем периодического контроля и анализа получаемой информации о выполнении заданий и выработки корректирующих решений.

К основным параметрам сетевой модели относятся [2]:

а) критический путь;

б) резерв времени событий;

в) резервы времени путей и работ.

При разработке моделей высокотехнологических проектов, для целей исследования этих проектов, необходимо, как правило, учитывать очень большое количество разнообразных факторов, которые к тому же подчас имеют различную природу. Одним из эффективных путей решения подобных задач является привлечение теории нечетких множеств, нечеткой логики, теории возможностей, методов ситуационного анализа и методов обработки знаний экспертов.

Что касается рассматриваемого метода сетевого планирования и управления, то здесь также существуют меры неопределенности и неточности. Понятие работа, включающая затраты времени и ресурсов, содержит достаточно неточностей, чтобы при ее описании применять аппарат теории нечетких множеств, нечеткой логики и т.п. То же самое можно сказать и о таких понятиях как событие, резерв времени событий и резервы времени путей и работ. Видно, что невозможно достаточно полно и четко описать модель высокотехнологичной системы, представив параметры, описывающие сетевую модель, в виде четких, определенных чисел. В связи с этим целесообразно представить параметры модели сетевого планирования в виде нечетких интервальных оценок.

В работе [3] приведен пример задания нечетких интервальных оценок. Для задания их используются знания экспертов. Построение такой модели можно считать одним из способов описания проекта высокотехнологичной системы. Применяя математический аппарат нечетких интервалов, можно рассчитать критический путь, резервы времени выполнения работ высокотехнологического проекта.

Список литературы

1. Петраков В.А. Адаптивное управление высокотехнологичным проектом. Известия ЮФУ, Технические науки, 2012г. С.254-258.

2. Непомнящий Е.Г. Экономика и управление предприятием. Таганрог, ТРТУ, 1998г. -160с.

3. Глод О.Д. Модель сетевого планирования и управления в нечетких интервальных оценках. Труды Международных конференций «Искусственные интеллектуальные системы» (IEEE AIS’05) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2005). С.22-28.

Разработка моделей и алгоритмов автоматизированной системы учета оправок непрерывного стана

студент 1 курса магистратуры Гузиев А. С., к.ф.-м.-н., доцент Шабаршина И.С., к.т.н., доцент Корохова Е.В.
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Повышение эффективности работы металлургических предприятий в условиях глобального рынка является важной задачей как для самих предприятий, так и для экономики страны в целом. Одним из источников роста эффективности для предприятий отрасли может быть сокращение издержек, в том числе на технологическую оснастку. При решении подобных задач должен применяться системный подход, позволяющий рассматривать проблему комплексно, учитывать требования к обеспечению высокого уровня качества, технологические ограничения, влияние внешних и внутренних факторов производства, экономические оценки и стратегические цели развития предприятия.

Бесшовные трубы по сравнению с аналогами, произведенными другими способами, обладают лучшими эксплуатационными характеристиками, однако их производство сложнее и дороже. Применение в производстве непрерывного стана позволяет повысить производительность линии, обеспечить более компактное расположение оборудования, снизить долю отходов, а также изготавливать трубы с высокой точность геометрических размеров и большей длины, что оказывает положительное влияние на надежность трубопроводов.

Для производства бесшовных труб используются оправки, рабочая часть которых подвергается значительным механическим и тепловым нагрузкам. В процессе работы оправка изнашивается. Основными видами износа длинных оправок являются: сетка разгара, уменьшение диаметра, вмятины рабочей поверхности, трещины, «кометы» (рис. 1) и обрывы. Проявление дефектов возрастает с увеличением количества циклов эксплуатации оправок в непрерывном стане. Трещины проникают вглубь металла оправ-

ки, окисляются и развиваются более активно. По длине оправки изнашиваются неравномерно. Этому способствует неравномерный разогрев оправок. Наиболее интенсивный разогрев соответствует средней части, хотя и с некоторым смещением к переднему концу. Этот разогрев распространяется на небольшую глубину и уже через несколько секунд после извлечения оправки из трубы температура по ее сечению выравнивается. Неравномерность температуры по длине остается значительной и достигает от 100 до 150 °С. Износ оправок контролируют в их средней части, и если он достигает 0,1 мм, то такие оправки заменяют. Обычно на каждой оправке можно раскатать от 400 до 2000 гильз, причем, как подтверждают исследования, стойкость оправок несколько выше при прокатке труб с более толстой стенкой. Если в процессе эксплуатации обнаруживаются дефекты оправок, то оправки отправляются на переточку на меньший размер.

а)

б)

Рис. 1 Характерные дефекты оправок непрерывного стана:
а – трещина; б – «кометы»

Анализ существующего технологического процесса выявил следующие проблемы, связанные с эксплуатацией оправок:

- согласно литературным источникам стойкость рабочей части оправки составляет от 400 до 2000 прокатанных труб; это достаточно широкий диапазон, который зависит от условий эксплуатации на конкретном предприятии, может быть различным для разных диаметров оправок. Отправка на переточку оправки, не использовавшей весь свой ресурс снижает эффективность производства, однако, если дефект вовремя не обнаружен, то раскатка

может расколоться, что приведет к браку трубы, и возникнет необходимость остановки стана, извлечению оправки, отбраковки трубы и длительному простою производственной линии;

- учет ресурса оправок затруднен ввиду отсутствия технологии маркировки и идентификации оправок, а также отсутствия регламента этого учета;

- для ведения учета ресурса, контроля качества и предиктивного анализа состояния оправок необходима разработка моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения.

Для решения указанных проблем на первом этапе разработан контрольный листок для сбора данных о состоянии оправок (толщина стенок, наличие дефектов), осуществляемого в процессе контроля качества. На основании собранных статистических данных для оправки диаметром 81 мм в результате регрессионного анализа определена зависимость глубины дефектов от количества циклов эксплуатации оправки (рис.2). На основе аналогичных моделей для каждого типа оправок определяется критическое количество циклов проката.

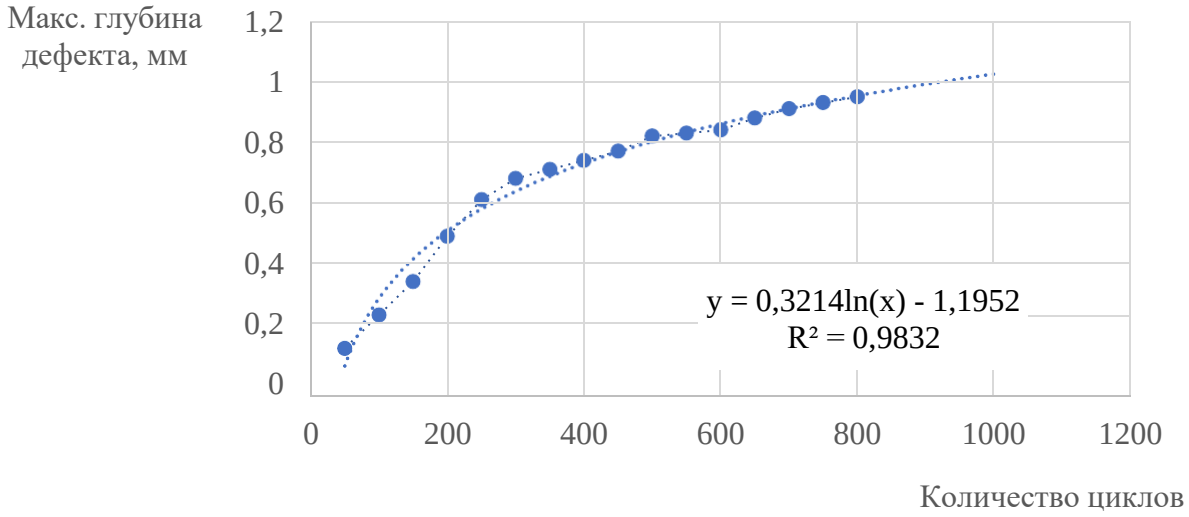


Рис. 2 Зависимость глубины дефекта от количества циклов эксплуатации оправки диаметром 81 мм

Разработана структура автоматизированной системы учета оправок непрерывного стана, включающая сканер идентификатора оправки (штрих-код, который может наноситься производителем оправок), рабочую станцию, сервер, базу данных.

Разработан регламент работы с оправками, предложены изменения в организации процесса производства труб с учетом внедрения автоматизированной системы учета оправок (рис. 3). Перед установкой оправки с помощью сканера считывается ее номер, по которому в базе данных ставится отметка об использовании оправки. Еженедельно технолог на основе отчетов вносит информацию о количестве циклов, отработанных каждой оправкой. При обнаружении дефектов оправки или ее поломки сведения также вносятся в базу данных. Все изменения состояния оправки (извлечение, отправка на переточку, утилизация и др.) также отмечаются в базе данных. Плановый контроль качества оправок с сохранением результатов в базе данных проводится технологом ежемесячно (рис. 4).

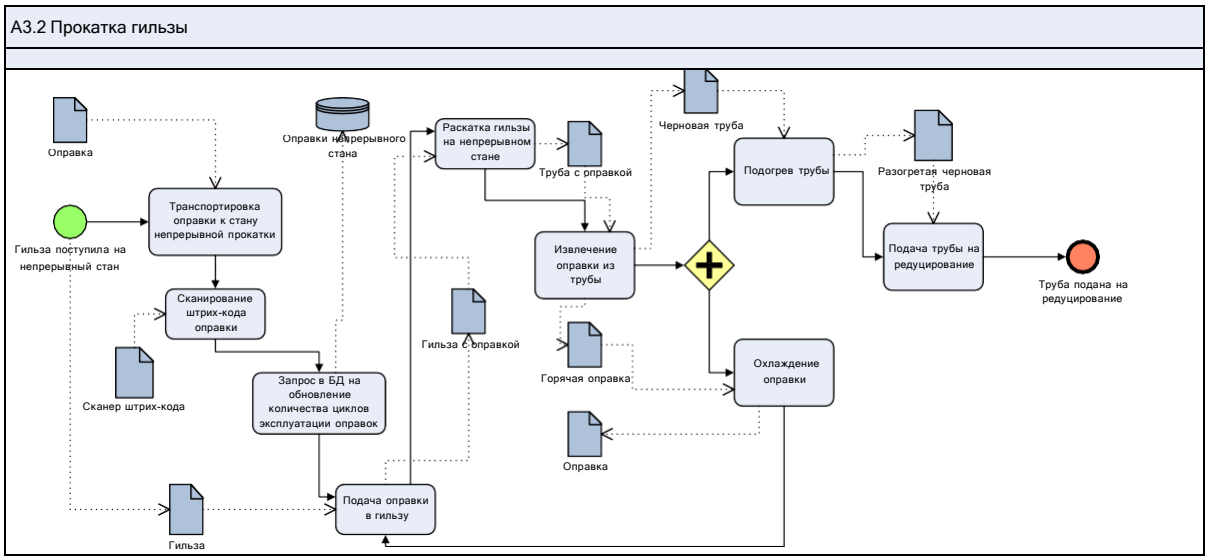


Рис. 3 Модель технологического процесса производства бесшовных труб с учетом изменений

На основе фактических данных об эксплуатации оправок и построенной модели прогнозируется состояние оправок (обобщенный алгоритм приведен на рис. 5) и при приближении количества отработанных циклов к критическому значению автоматизированная система оповещает технолога о необходимости внепланового осмотра оправки.

Предложенная автоматизированная система учета оправок непрерывного стана позволяет повысить эффективность процесса производства за счет: упорядочения работы с оправками, сокращения потерь от недоиспользования ресурса, снижения вероят-

ности поломок и простоев благодаря организации систематического контроля качества, прогнозирования состояния оправок на основе фактических данных об их эксплуатации и оповещения о необходимости планово-предупредительных мероприятий.

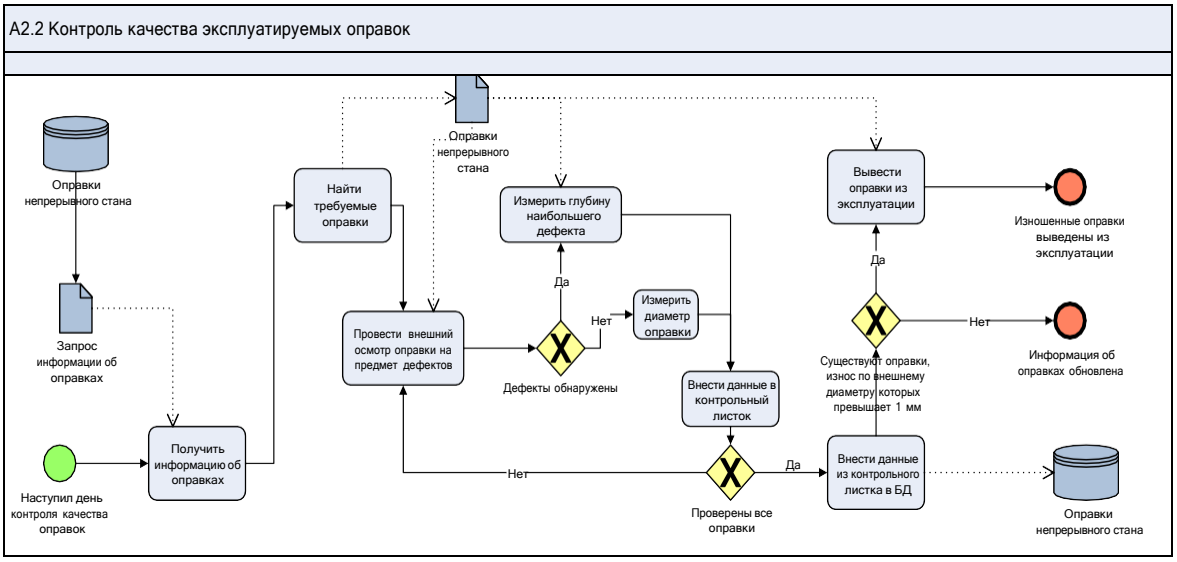


Рис. 4 Модель технологического процесса производства бесшовных труб с учетом изменений

Рис. 5 Модель технологического процесса производства бесшовных труб с учетом изменений

Модели совершенствования производственной системы ООО «ПК «НЭВЗ»

студент 1 курса магистратуры Родов Д. Д., к.т.н., доцент Корохова Е.В., к.ф.-м.-н., доцент Шабаршина И.С.
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Отечественные машиностроительные предприятия вынуждены выдерживать жесткую конкуренцию со стороны иностранных компаний, предлагающих свою продукцию на территории РФ. Несмотря на то, что область машиностроения не так сильно подвержена влиянию мировых финансовых кризисов, как, например, нефтеперерабатывающая промышленность, она, тем не менее, остро ощущает на себе их последствия. В современных реалиях состояние российской экономики далеко не всегда позволяет правительству оказывать помощь или давать льготы данным предприятиям, поэтому не только возможность развития, но и сама выживаемость машиностроительного предприятия зависит от того, насколько хорошо оно может выдержать конкурентную борьбу в условиях современного рынка. Это достигается путем оптимизации издержек, уменьшения требуемого на удовлетворение заказа времени, а также повышения качества и эффективности выполнения работы.

ООО «ПК «НЭВЗ» является крупным российским производителем магистральных и промышленных электровозов, а также их комплектующих. Продукция предприятия пользуется повышенным спросом в таких сферах промышленности, как горно-обогатительные, металлургические и лесозаготовительные комбинаты, а также другие предприятия, вынужденные прибегать к транспортировке крупногабаритной продукции по железной дороге.

Задачей предприятия на ближайшую перспективу является реализация и расширение программы импортозамещения, развитие системы сервисного обслуживания выпущенной предприятием продукции, развитие и расширение продуктовой линейки и разработка современных моделей подвижного состава, расшире-

ние научного и конструкторского сотрудничества с ведущими машиностроительными предприятиями Европы, а также поиск новых потребителей как на рынке стран СНГ, так и на рынке азиатских и западных стран. Кроме того, перед предприятием стоит серьезная задача по преодолению последствий кризиса 2015 года, сильно ударившего по предприятию, повсеместное снижение издержек и повышение производительности путем всеобъемлющей модернизации предприятия, его цифровизации и организации бережливого производства.

Целью исследования является повышение эффективности деятельности ООО «ПК «НЭВЗ» путем совершенствования его производственной системы на основе концепции бережливого производства, позволяющей снизить издержки, повысить производительность труда и качества продукции.

Достижение поставленной цели невозможно без постоянного осуществления всестороннего анализа производства, проведения работ по его оптимизации и модернизации. Для этого необходимо задействовать современные методы и инструменты теории управления, математического и информационного моделирования, менеджмента качества. Работа по постоянному улучшению качества производства должна основываться на применении цикла Деминга-Шухарта (PDCA).

В ООО ПК «НЭВЗ», как и во многих машиностроительных предприятиях, сборочные работы имеют первостепенное значение. Объем данных работ при этом очень значителен: в среднем, трудоемкость сборки готовых изделий составляет около 50—60°% от общей трудоемкости производства.

Деятельность сборочного цеха на предприятии имеет важную особенность - вследствие работы по реформированию производственной структуры предприятия, сборочному цеху делегирована обязанность по выпуску ряда деталей, задействованных в процессе окончательной сборки изделий. В первую очередь это детали, изготовляемые методом штамповки, не требующие использования специальных методов обработки или оборудования.

К основным деталям из данного перечня относятся: втулки осевого вращения; защитные экраны; элементы крепежа.

Ввиду того, что реформирование производственного процесса (в частности, перенос производства штамповочного производства заготовок на мощностях сборочного цеха) производилось в спешном порядке, обусловленном кризисной обстановкой на предприятии, наладить и отрегулировать данные производственные процессы на местах руководству цеха удалось лишь отчасти.

Система бережливого производства – это концепция управления предприятием, предполагающая организацию непрерывного процесса оптимизации деятельности и минимизации потерь и издержек, при которой используются различные методы, например метод Кайдзен, 5S, карты потока создания ценности продукта, TQM (Total Quality Management, всеобщее управление качеством), TPM (Total Productive Maintenance, всеобщее производительное обслуживание), JIT (Just-In-Time, метод «точно-в-срок»), метод визуализации и многие другие.

Рассмотрим решение задачи совершенствования производственной системы завода на примере процесса производства втулок осевого вращения. Для выявления и анализа проблем в процессе производства втулок осевого вращения построена имитационная модель, структура которой представлена на рис. 1.

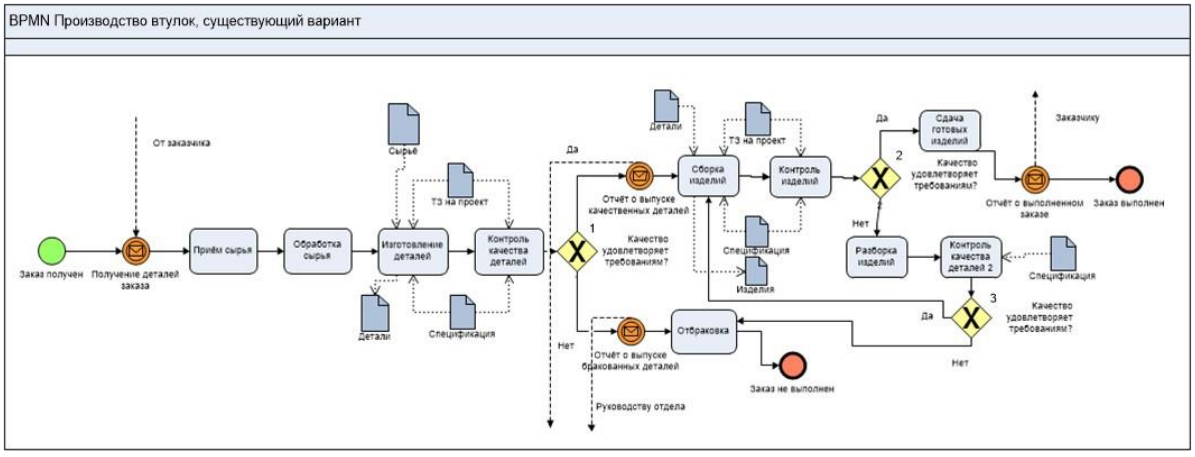


Рис. 1 Структура имитационной модели существующего процесса производства бронзовых втулок осевого вращения

Для получения количественных оценок процесса проведен эксперимент с имитационной моделью. Целевым показателем для оценки эффективности производственного процесса было выбра-

но количество изделий, успевших пройти за рабочую смену (с 8:00 до 18:00) все участки производственной линии. Дополнительным показателем является величина затрат денежных средств (в тыс. руб.) на осуществление производственных процессов.

В результате проведения хронометража рабочего времени получены статистические данные о длительности операций. Исходные данные подверглись статистической обработке, в результате которой выявлены и исключены грубые ошибки и выбросы, определен закон распределения (все данные подчиняются нормальному закону) и параметры распределения для каждой операции. В результате анализа статистических данных о результатах контроля качества за март 2021 года определены вероятности прохождения деталей и изделий через шлюзы.

В результате проведения имитационного эксперимента определено: количество произведенных за рабочую смен изделий - 14. Отбраковано 11 деталей, сумма издержек на сырье, потраченное на изготовление отбракованных деталей, составляет 33 тысячи рублей.

На каждом из этапов производства существует риск возникновения потенциальных проблем и несоответствий. Для того чтобы устранить имеющиеся проблемы, проведен анализ их причины и оценка тяжести последствий. В ходе экспертного обсуждения путей по рационализации производственной линии решено внести в нее несколько существенных изменений.

В целях сокращения расхода сырья «вхолостую» решено запустить цикл переработки бракованных деталей в возвратно-технологические отходы с дальнейшей подачей его на этап приема сырья в начале производственного цикла. Отсутствие данного цикла в модели существующего процесса объясняется тем, что ранее, ввиду высокой стоимости оборудования для измельчения и переплавки деталей, переработка бракованных деталей представлялась нерентабельной. В настоящее время стоимость данного оборудования существенно снизилась, что сделало возможным его приобретение. Его использование позволит практически свести к нулю неэффективный расход сырья.

Кроме того, в целях снижения себестоимости и времени на производство изделий решено упразднить цикл разборки некачественно собранных изделий на составные части с дальнейшим их повторным контролем. В виду того, что детали уже прошли контроль единожды, повторный контроль приведет только к лишним тратам времени и средств.

Вместо этого следует сконцентрироваться на ужесточении первой стадии контроля качества деталей, а также ввести операцию по устранению недостатков сборки на месте без их предварительной разборки. Также следует предусмотреть возможность повреждения деталей в процессе сборки и их дальнейшей переработки. В соответствии с данными предложениями разработана имитационная модель улучшенного варианта технологического процесса, представленная на рисунке 10.

Результат проведения имитационного эксперимента с учетом изменений процесса производства, представленный на рис. 2, показал, что количество произведенных за рабочую смен изделий увеличилось до 26. Кроме того, были оптимизированы финансовые затраты на обеспечение повторного контроля качества деталей без ущерба для качества.

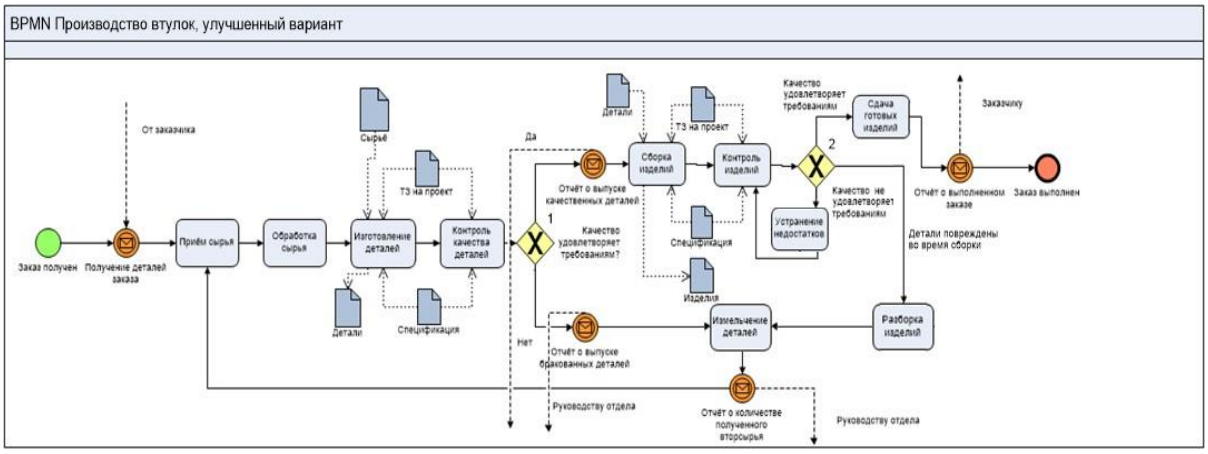


Рис. 2 Структура имитационной модели с учетом улучшений

В ходе многократных запусков имитационной модели как в первоначальном, так и в оптимизированном вариантах было выяснено, что в среднем за рабочую смену через операцию отбраковки или измельчения проходят от восьми до десяти деталей. Учитывая стоимость материалов, затрачиваемых на изготовление

одной детали, составляющую три тысячи рублей, можно прийти к выводу, что внесенные в технологический процесс изменения позволяют экономить до 24-30 тысяч рублей лишь за одну рабочую смену.

Рассмотренные изменения, а также внедрение модели вытягивающего производства, TPM-системы, Канбан позволят сократить издержки, повысить качество выпускаемой продукции и реализовать стратегическую цель – построение первого в РФ цифрового завода.

Моделирование системы обучения авиационного персонала с использованием технологий виртуальной реальности

Е.А. Перепелицина, О.В. Граецкая
Институт высоких технологий и пьезотехники, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Технологии виртуальной реальности (VR-технологии) – ключ к принципиально новому уровню взаимодействия человека с цифровым миром. В настоящее время VR-технологии получили серьезное развитие на рынках развлечений и маркетинга. Наиболее перспективными с точки зрения экономического эффекта являются продукты на основе VR-технологий в сфере промышленного производства, образования и здравоохранения.

Внедрение VR в образовательном сегменте позволит обеспечить доступные инструменты для пользователей и дополнить обучающие программы интерактивным визуальным VR-контентом в размере до 30% всех образовательных материалов [1].

В современных условиях есть большая потребность в образовательном VR-контенте для авиаперсонала, например, для пилотов. Особое внимание при этом стоит обратить на имитацию чрезвычайных ситуаций, вызванных погодными явлениями или техническими неполадками. Тренажеры дополненной реальности не могут в полной мере создать симуляцию катастрофы, в то время как технология виртуальной реальности заставляет в полной мере прочувствовать обстановку максимально приближенную к реальным условиям, что позволит сделать обучение более эффективным.

Одной из главных проблем является недостаточное количество качественного VR-контента и доступных пользовательских устройств. Поэтому актуальной задачей является разработка системы обучения авиационного персонала с использованием технологий виртуальной реальности, для чего нужно провести моделирование этой системы, разработать ПО, а также обучить персонал учебного центра использованию VR-тренажеров и разрабо-

тать методики обучения авиационного персонала при помощи технологии виртуальной реальности.

В рамках моделирования системы обучения (повышения квалификации) разработаны функциональные требования к системе (рис. 1), ее концептуальная структура (рис. 2), алгоритмы работы системы и т.д. в на языке UML [2-3].

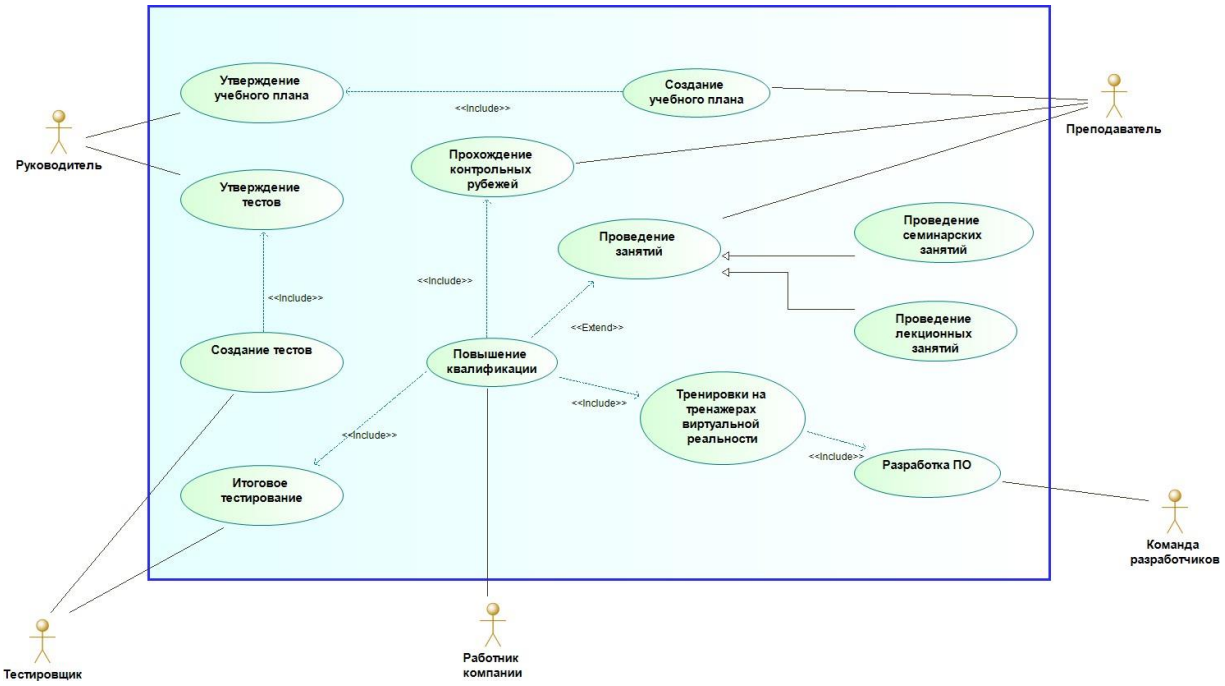


Рис. 1 – Диаграмма вариантов использования «Повышение квалификации сотрудников компании».

На первом этапе разработаны функциональные требовании: создание и утверждение учебного плана и тестов, повышение квалификации включает в себя проведение лекционных и семинарских занятий, тестирование, тренировки на тренажерах виртуальной реальности, для которых разрабатывается программное обеспечение.

На рис. 2 отражена концептуальная структура системы, которая показывает направления и возможности использования VR-тренажеров при повышении квалификации сотрудников компании.

Далее разработаны алгоритмы работы системы. На рис.3 приведен обобщенный алгоритм создания и функционирования системы обучения авиационного персонала с использованием технологий виртуальной реальности.

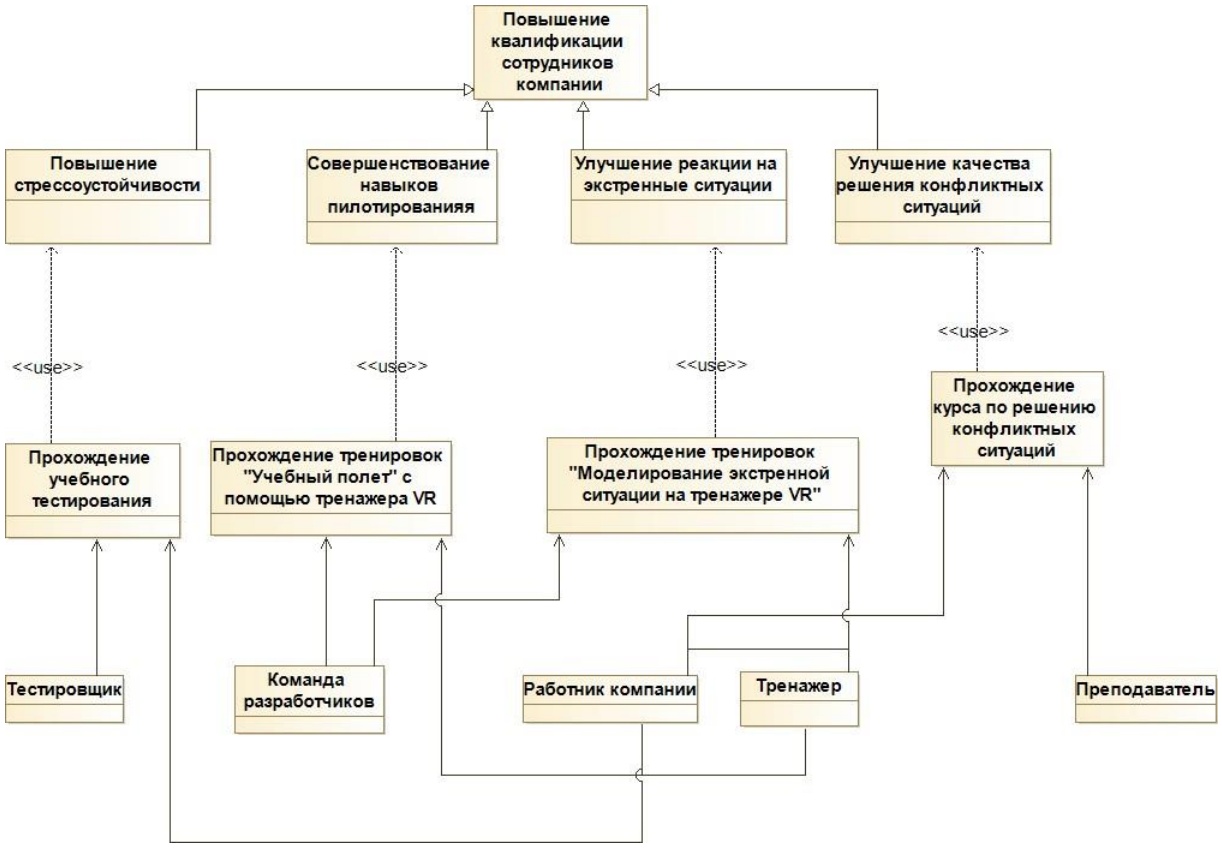


Рис. 2 – Взаимосвязь целей, функциональных и реализующих классов

VR-технологии имеют ряд преимуществ при использовании в сфере образования. Если говорить об обучении авиационного персонала (в данном случае обучение/переобучение, а также повышение квалификации пилотов), то технологии виртуальной реальности, позволят существенно повысить эффективность обучения. Для симуляции сценария с чрезвычайной ситуацией наиболее правильным будет использование полного погружения. Кроме того, VR-тренажеры более легки в обслуживании, стоимость (в сравнении с тренажерами дополненной реальности) меньше, что говорит о большей их доступности. Количество сценариев у VR-тренажеров неограниченно, в то время как технология дополненной реальности базируется на заранее предусмотренных производителем аспектах. Таким образом, VR-технологии имеют широкие перспективы использования при обучении авиационного персонала.

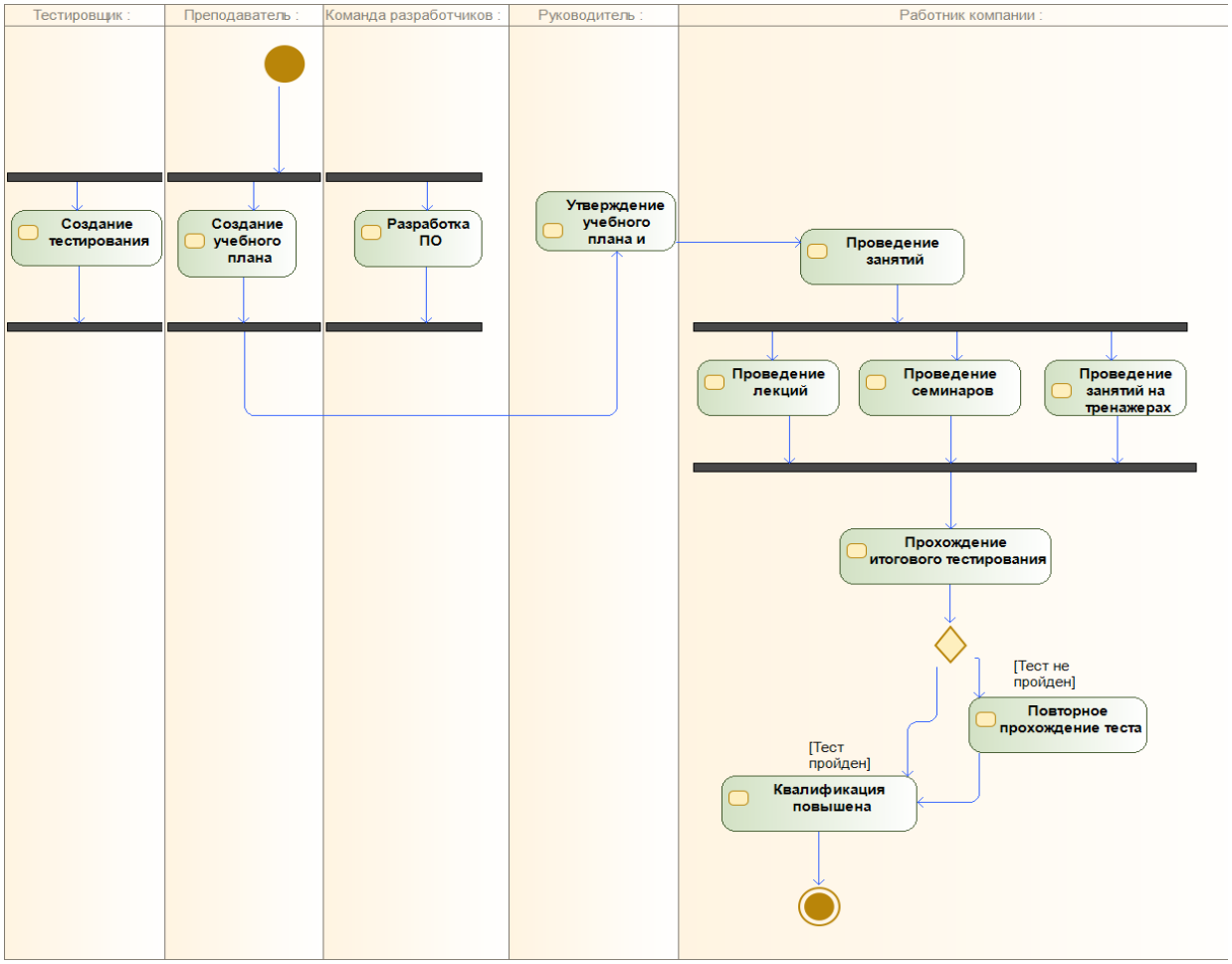


Рис. 3 – Обобщенный алгоритм создания и функционирования системы обучения авиационного персонала

Список литературы

1. Вместо обычных учебников: виртуальная реальность в образовании [Электронный ресурс] - Режим доступа URL: https://sk.ru/news/vmesto-obychnyh-uchebnikov-virtualnaya-realnost-v-obrazovanii/ Дата обращения 04.04.2021.

2. Крэг Ларман. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования = Applying UML and Patterns : An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development. — 3-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — 736 с. Дата обращения 15.04.2021.

3. Буч Г., Якобсон А., Рамбо Дж. UML. Классика CS / С. Орлов. — 2-е изд.. — СПб.: Питер, 2006. — 736 с. Дата обращения 15.04.2021.

Алфавитный указатель

П.А Абрамов 205
Г.М. Акбаева 191
Е.С. Алексюнин 195
К.П. Андрюшин 157
И.Н. Андрюшина 157
А.А. Арутюнян 229
П.А. Астафьев 167
Р.А. Байдаров 79, 118, 143
В.А. Бардин 143
В. Д. Белан 244
А.В. Боев 28
Н.А. Болдырев 163
П.А. Борзов 239
О.Е. Брыль 118
А.И. Бурханов 191
А.М. Васильев 260
А.Н. Величко 151
И.А. Вербенко 151, 163
Д.В. Волков 163
С.Н. Галий 28
Н.А. Гирагосова 113, 126, 186
Е.В. Глазунова 151
О.Д. Глод 273
М.А. Гончаров 130, 177, 191
К.А. Гореленко 79, 195
О.В. Граецкая 271, 289
Р.Э. Гусейнов 200
А.С. Гузиев 278
Е.А. Дармина 271
Л.А. Дарьян 229
С.Г. Джабаров 200
С.Д. Данельянц 264
В.К. Доля 28
М.В. Драганчук 108
С.И. Дудкина 157
Л.А. Дыкина 118, 143, 177, 195
К.М. Жидель 172
О.В. Зацерклянный 90
В.Л. Земляков. 248, 256, 260
Ю.Д. Ивакин 100
А.Н. Исаева 95, 205, 210
А.В. Казакова 105
С.С. Карнаухов 248
Е.В. Карюков 186
С.Н. Ключников 244, 252, 256
М.В. Корнюшин 100
Е.В. Корохова 278, 283
В.В. Коловоротний 113
Н.С. Ксенз 264, 267
Е.Е. Куликов 126
А.В. Криворучко 95
И.А. Лигостаев 151
А.Ю. Малыхин 79, 186, 191, 195
А.И. Маммадов 200
М.А. Мараховский 118
В.А. Мараховский 118
Н.Д. Медведев 267
С.С. Медведев 177, 186
Р.З. Мехдиева 200
Н.А. Мишин 56
М.О. Мойса 157
А.В. Нагаенко 108, 113, 122, 126, 130
А.В. Нагаенко 122
А.А. Нестеров 105, 214, 219, 232
Ю.М. Нойкин 167

В.В. Немыкин 79
Р.М. Образцов 229
А.В. Орлов 41
А.А. Павелко 172
А.Е. Панич 10
А.А. Панич 28, 79, 186, 195
Е.А Панич 143, 214
А.К. Пастухова 252
А.А. Павелко 167
А.В. Павленко 172
А.А. Парфёнов 177, 186
Е.А. Перепелицина 289
П.П. Пивнев 64
Б.О. Проценко 210
Л.А. Резниченко 151, 157
Д. Д. Родов 283
С.Г. Сафарянц 56
В.Н. Седалищев 37
Н.И. Серопян 151
Е.И. Ситало 151
А.В Скрылёв 79
А.В. Смирнов 100
В.Я. Смирнов 41
А.В. Сопит 191
С.П Тарасов 64
М.В. Терещенко 56
М.И. Толстунов 105
В.Ю. Тополов 95, 205, 210, 239
А.С. Турлюн 108
С.Е. Филиппов 239
П.А. Харченко 122
А.С. Черевков 151
И.С. Шабаршина 278, 283
Л.А. Шилкина 151
В.В. Янчич 46, 51

Все опубликованные в данном сборнике статьи находятся
в авторской редакции

Благодарим авторов за участие в III молодежной всероссийской
с международным участием научной конференции
**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»**,
посвященной 20-летию факультета высоких технологий!

Постоянный адрес конференции в сети интернет:
https://piezoconf.ivtipt.ru

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Сборник трудов
III молодежной всероссийской
с международным участием научной конференции

Сдано в набор 24.09.2021. Подписано в печать 25.10.2021.
Выход в свет 25.10.2021.
Печать цифровая, гарнитура Times New Roman.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 10,75.
Тираж 550 экз. Заказ № 195.

Отпечатано в типографии
ООО «Фонд науки и образования»
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 111
тел. 8-918-570-30-30.