

## Реферат

Печатается по решению научно-технического совета НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального университета.

Р е ц е н з е н т ы:

Кручинский С.Г., доктор техн. наук, профессор ТТИ ЮФУ

Горбатенко Н.И., доктор техн. наук, профессор ЮРГПУ (НПИ).

Земляков В.Л., доктор техн. наук, ФВТ ЮФУ

Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. Изд-во Техносфера, 2014, 312 с: ил.

Работа посвящена проектированию пьезоэлектрических датчиков с использованием современных методов математического моделирования. Описаны критерии, алгоритмы и процедуры для рационального и целенаправленного выбора конструкции датчика, материалов и размеров деталей с помощью универсальных относительно геометрии изделия и способов приложения нагрузки численных пространственных электротермоупругих моделей. Это позволяет улучшить технические характеристики пьезоэлектрических датчиков за счет обоснованного выбора компромисса между информативностью и надежностью изделия в предполагаемых условиях эксплуатации.

Эффективность предложенных методов подтверждается разработкой серии пьезоэлектрических датчиков с уникальными свойствами, нашедших широкое применение в вихревых и ультразвуковых расходомерах жидкости, газа и пара для систем промышленной автоматизации.

Предназначена для специалистов, занимающихся проектированием и применением пьезоэлектрических преобразователей и датчиков в измерительных и управляющих системах, а также аспирантов и студентов технических вузов.

M.V. Bogush. Design of piezoelectric sensors based on spatial electrical and thermoelastic models. Technosfera publishing house, 2014, 312 p.: figures.

The paper deals with design of piezoelectric sensors using the contemporary methods of mathematic modeling. Criteria, algorithms and procedures are described for rational and determined selection of the structure of sensors, materials and sizes of parts with the help of numerical spatial electrical and thermoelastic models that are multi-purpose as for geometry of the product and load application modes. This allows improving technical characteristics of piezoelectric sensors, with grounded selection of compromise between information capacity and reliability of the product in intended operation conditions.

The efficiency of methods suggested is confirmed by the development of a series of piezoelectric sensors having unique properties for vortex and ultrasound flowmeters for fluids, gas and vapor that have been widely applied in industry.

The work is designed for specialists engaged in design and application of piezoelectric transducers and sensors in measurement and control systems, for post-graduate students, students of technical institutes of higher education.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ.....	11
1.1. Пьезоэлектрические материалы для измерительной техники.....	11
1.2. Пьезоэлектрические датчики давления .....	16
1.2.1. Унифицированный ряд датчиков быстропеременных давлений.....	18
1.2.2. Датчики акустических давлений .....	22
1.2.1 Датчики давления ведущих зарубежных фирм.....	25
1.3. Методы анализа пьезоэлектрических датчиков.....	31
1.3.1. Структурный анализ .....	32
1.3.2. Аналитические методы.....	40
1.3.3. Численные методы.....	42
2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ.....	46
2.1. Модель неоднородного чувствительного элемента.....	46
2.2. Распределение механических и электрических полей.....	57
2.3. Функция преобразования.....	62
2.4. Прочность при сжатии.....	65
2.5. Прочность при изменении температуры .....	70
2.6. Аддитивная погрешность при изменении температуры .....	73
3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	77
3.1. Электроупругие модули .....	77
3.1.1. Динамический метод измерения электроупругих модулей .....	77
3.1.2. Квазистатический метод измерения пьезоэлектрических модулей...	82
3.2.3. Полный набор электроупругих модулей .....	89
3.2. Изменение электроупругих модулей от температуры .....	90
3.3. Изменение пьезоэлектрических модулей от давления .....	93

3.4. Старение .....	94
3.5. Временные изменения свойств при внешних воздействиях.....	97
3.6. Тепловое расширение и пирозэффект.....	101
3.7. Прочность при сжатии и растяжении .....	110

#### 4. ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ..... 118

4.1. Методы оценки механической надежности .....	118
4.2. Оценка механической надежности при действии давления .....	118
4.2. Оценка механической надежности при действии давления и изменении температуры .....	126
4.3. Выбор материалов силопередающих элементов датчиков .....	136
4.4. Изменение коэффициента преобразования от температуры.....	139
4.5. Повышение надежности пьезоэлектрических датчиков акустических давлений.....	147

#### 5. ОБЪЕМНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ..... 153

5.1. Аномальные явления в объемночувствительных преобразователях.....	153
5.2. Изменение температуры среды при адиабатическом процессе.....	155
5.3. Модель объемночувствительного преобразователя.....	157
5.4. Экспериментальная проверка модели.....	163
5.5. Контрольные датчики давления .....	169
5.6. Виброзащищенные датчики давления .....	170
5.7. Миниатюрные датчики давления.....	173

#### 6. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ..... 178

6.1. Постановка задачи электротермоупругости .....	178
6.2. Сравнение аналитических и численных решений.....	181
6.3. Методы анализа и синтеза пьезоэлектрических датчиков .....	188

6.4. Анализ датчиков давления.....	193
6.4.1. Коэффициент преобразования.....	196
6.4.2. Собственные частоты .....	197
6.4.3. Вибрационная и деформационная чувствительности.....	200
6.4.4. Прочность в нормальных и рабочих условиях .....	201
6.4.5. Исследование путей оптимизации конструкции датчика .....	212
6.4.6. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления ...	217
6.4.7. Оценка информативности пьезоэлектрических датчиков давления с помощью обобщенного показателя качества.....	222
7. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ.....	228
7.1. Анализ температурных напряжений в гидроакустических антеннах..	228
7.2. Исследование АЧХ виброакустических датчиков.....	235
7.3. Пьезоэлектрические преобразователи для ультразвуковых расходомеров газа.....	240
7.4. Вибрационные сигнализаторы уровня.....	250.
7.5. Универсальный вибрационный плотномер жидкости и газа .....	265
7.6. Датчики изгибающего момента для вихревых расходомеров .....	269
8. ВИХРЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ.....	286
8.1. Принцип действия вихревых расходомеров и основные требования к преобразователям энергии потока .....	287
8.2.. Вихревые расходомеры жидкости .....	295
8.3. Вихревые расходомеры газа .....	283
8.4. Вихревые расходомеры пара .....	288
8.5. Вихревые расходомеры ведущих мировых фирм .....	293
8.6. Области применения вихревых расходомеров с пьезоэлектрическими датчиками.....	296

8.7. Тенденции развития вихревой расходомерии .....	.299
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	301
ЛИТЕРАТУРА.....	303
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	312