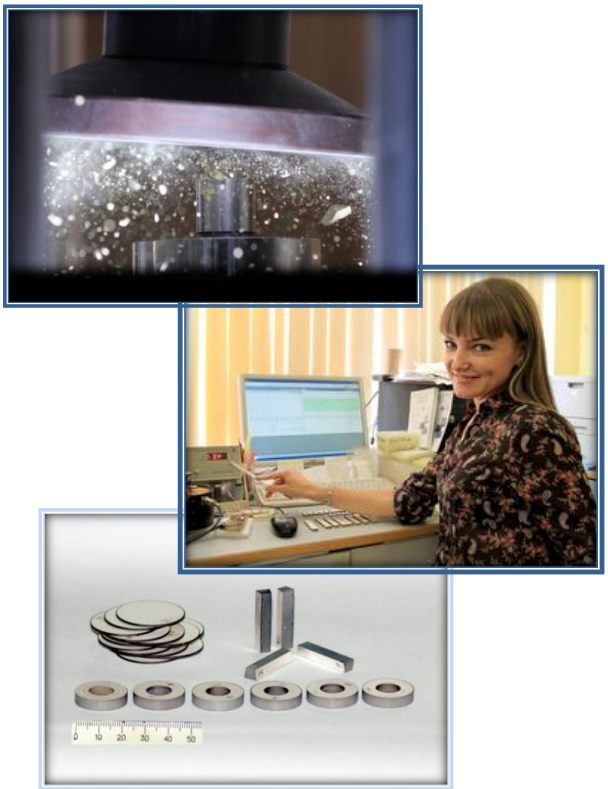
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЬЕЗОТЕХНИКИ ЮФУ
НКТБ «ПЬЕЗОПРИБОР» ЮФУ
ЦКП «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»
ОАО «КОНЦЕРН «ОКЕАНПРИБОР»

# СБОРНИК ТРУДОВ

*II международной молодежной научной конференции*



# *АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ*

*Том II*

*6 - 10 сентября 2015 г.*
*г. Ростов-на-Дону*

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЬЕЗОТЕХНИКИ ЮФУ
НКТБ «ПЬЕЗОПРИБОР» ЮФУ
ЦКП «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»
ОАО «КОНЦЕРН «ОКЕАНПРИБОР»

**Сборник трудов**

**II международной молодежной**

**научной конференции**

# *АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ*

*Том II*

*6 - 10 сентября 2015 г.*
*г. Ростов-на-Дону*

УДК 53.082.73
ББК 31.261.3
А43

А43 Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сборник трудов II международной молодежной научной конференции, г. Ростов-на-Дону, 6–10 сентября, 2015 : в 2 т. ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2015.
ISBN 978-5-9275-1649-0
Т. 2.: 2015. – 260 с.
ISBN 978-5-9275-1651-3 (Т.2)

Проведение II международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения» поддержано грантом РФФИ № 15-32-10310 «Проект организации и проведения II международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения».

Отпечатано с оригиналов статей, в авторской редакции.

ISBN 978-5-9275-1651-3 (Т. 2)
ISBN 978-5-9275-1649-0
УДК 53.082.73
ББК 31.261.3

© НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, 2015

**ОРГКОМИТЕТ**
**II международной молодежной научной конференции**
**«Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»**

**Председатель оргкомитета:**
**Панич Анатолий Евгеньевич -** директор института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, д.т.н, профессор, академик РИА, г. Ростов-на-Дону

**Сопредседатель оргкомитета:**
**Шевченко Инна Константиновна -** проректор по организации научной и проектно-инновационной деятельности ЮФУ, д.э.н., г. Ростов-на-Дону

**Программный комитет**
**Панич Александр Анатольевич -** директор НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ,д.т.н., г. Ростов-на-Дону
**Рамазанов Махаммадали Ахмед оглы –** декан физического факультета, Бакинского государственного университета, д.ф.н., Баку, Азербайджан
**Дворников Олег Владимирович–** главный научный сотрудник ОАО «МНИПИ», профессор кафедры МиНЭ БГУИР, д.т.н., Минск, Беларусь
**Нерсесов Сергей Суренович -** генеральный директор ОАО "Научно-исследовательский институт "Элпа", г. Зеленоград, Россия
**Селезнёв Игорь Александрович -** заместитель генерального директора по инновационному, стратегическому развитию и научной работе ОАО «Концерн «Океанприбор», д.т.н., с.н.с., г. Санкт-Петербург, Россия
**Сахненко Владимир Павлович –** заведующий кафедрой технической физики физического факультета ЮФУ, гл. научный сотрудник отдела кристаллофизики НИИ физики ЮФУ, д.ф.-м.н., профессор, г. Ростов-на-Дону, Россия
**Тарасов Сергей Павлович -** заведующий кафедрой ЭГА Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии ЮФУ, д.т.н., профессор, Таганрог, Россия
**Доля Владимир Константинович** – заместитель директора по науке и инновациям Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, к.т.н., г. Ростов-на-Дону, Россия
**Нестеров Алексей Анатольевич** – профессор кафедры «Общей и неорганической химии» химического факультета ЮФУ, д.т.н., профессор, г. Ростов-на-Дону, Россия
**Богуш Михаил Валерьевич** – главный специалист лаборатории датчиков НКТБ «Пьезоприбор», д.т.н., г. Ростов-на-Дону, Россия
**Земляков Виктор Леонидович** –заведующий кафедрой «Информационных и измерительных технологий» Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ , д.т.н., Г. Ростов-на-Дону, Россия
**Петраков Владимир Александрович** - заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, д.т.н., профессор, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Локальный оргкомитет**
Пономарева Н.С. , г. Ростов-на-Дону - ученый секретарь
Шевченко Л.А., г. Ростов-на-Дону
Щербань О.Г. , г. Ростов-на-Дону
Гусенко Т.Г., г. Ростов-на-Дону
Панич Е.А., г. Ростов-на-Дону
Алексюнин Е.С. , г. Ростов-на-Дону
Толмачев С.А., г. Ростов-на-Дону
Алешина Е.С., г. Ростов-на-Дону
Мараховский М.А., г. Ростов-на-Дону
Нагаенко А.В., г. Ростов-на-Дону

# СОДЕРЖАНИЕ

## ***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПЬЕЗОТЕХНИКИ***


Протонные зарядовые кластеры ядерных размеров
*В.Г. Сапогин* 8

Электрическая неустойчивость к формированию плоских электронных кластеров в двухкомпонентной плазме
*В.Г. Сапогин* 19

Электрические накопители избыточной энергии искусственной плазменной неустойчивости – энергетическая бездна человечества
*В.Г. Сапогин, Н.Н. Прокопенко, А.Е. Панич* 30

Автоматизированная установка для исследования температурных характеристик пьезоэлектрических материалов и устройств
*Д.А. Бурдин, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов* 39

Статическая деформация активного элемента в переменном управляющем поле
*Д.А. Бурдин, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов* 42

Бесконтактный магнитоэлектрический датчик тока
*Д.В. Чашин, Л.Ю. Фетисов* 47

Способ контроля работоспособности трехкомпонентного вибропреобразователя
*А.В. Орлов, В.Я. Смирнов* 51

О погрешностях определения коэффициента преобразования модуля вектора виброускорения
*В.Я. Смирнов, А.В. Орлов* 56

Устройство для определения значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических вибропреобразователей
*Д.В. Скворцов, А.Л. Блохин, В.Я. Смирнов* 61

Пьезоэлектрические преобразователи виброскорости: схемные решения, конструктивные особенности, вопросы точности измерений
*А.М. Селихов* 66

Привязка выходного сигнала пьезоэлектрического преобразователя к нулевому уровню
*А.М. Селихов* 71

Многофункциональные датчики на основе пьезокерамики
*В.Н. Костюков, А.В. Костюков, А.В. Боярников* 75

Влияние высокотемпературного отжига ферромагнетика на магнитоэлектрический эффект в структуре «пьезоэлектрик – аморфный ферромагнетик»
*Ф.А. Федулов* 80

Входной каскад мультидифференциального операционного усилителя с повышенным ослаблением синфазного сигнала
*А.Е. Титов, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова, И.Н. Сергеенко* 85
Радиационно-стойкий биполярно-полевой операционный усилитель на основе классического каскода
*Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова, Л.А. Заякина* 90
Использование осциллятора Пуанкаре в задаче синергетического управления MEMS-гироскопом
*А.А. Кузьменко, Д.А. Колесниченко* 95
Задачи шумоподавления в системах головных телефонов
*К.С. Онищенко, Ж.Ю. Бондарева* 101
Экспериментальные исследования широкополосных составных гидроакустических антенн на основе пьезоэлектрических преобразователей
*Ж.Ю. Бондарева* 104
Экспериментальные исследования расширения полосы пропускания демпфированных пьезоэлектрических преобразователей гидроакустических антенн
*Ж.Ю. Бондарева, В.А. Обыденная* 108
Параметрический профилограф для мониторинга мелководных районов мирового океана
*М.Е. Мищукова, В.А. Обыденная, А.О. Гацев* 113
Акустические пьезоэлектрические преобразователи для многолучевых ультразвуковых расходомеров газа
*О.М. Богуш, Д.Г. Макаров, Э.М. Пикалев, С.А. Толмачев* 117
Вихревые расходомеры газа и пара
*М.В. Богуш* 126
Компенсация температурного изменения коэффициента преобразования по заряду пьезоэлектрического виброизмерительного преобразователя
*Вл.В. Янчич, Д.В. Джения, А.А. Иванов* 133
Исследование математических моделей трехкоординатных виброизмерительных преобразователей с четырехсекционными пьезоэлементами
*Вл.В. Янчич, В.Н. Митько* 139
Специализированная оснастка для испытания трехкоординатных виброизмерительных преобразователей
*В.Н. Костюков, С.Н. Ковалев, Вл. В. Янчич, А.А. Иванов, Д.В. Джения* 145
Влияние элементов конструкции на характеристику направленности высокочастотной гидроакустической антенной решётки
*С.Н. Галий, В.К. Доля, В.Н. Митько* 150
Алгоритм измерения электрических параметров микрофона с кабелем
*А.В. Боев, А.В. Фомушкин* 157

Повышение точности определения добротности по дискретным значениям частотной характеристики пьезорезонаторов
*В.Л. Земляков, С.Н. Ключников, Ю.А. Ерусалимский* 163
Использование LabVIEW для построения програмно-аппаратных комплексов измерения параметров пьезоэлементов и преобразователей
*С.Н. Ключников, Я.В. Молчанова* 167
Простой измеритель емкости
*Я.В. Молчанова, С.А. Толмачев* 172
Методика синтеза пространственно-временной модели подвижного объекта и его наблюдателя
*С.А. Толмачев* 175
Разработка датчика давления для комплекса автоматической сигнализации приводнения самолета-амфибии.
*О.В. Шатуновский* 179
Применение метода Берга в обработки данных гидроакустической антенной решетки для увеличение разрешения сканирования по углу
*К.В. Вдовюк, В.К. Доля, А.В. Коротоякский* 184
Установка для исследования температурных параметров пьезоматериалов.
Д.А. Матешов, К.В. Коренева 186
Проблемы проектирования для измерения и контроля физических параметров для ракетно-космической техники
*А.В. Гориш, Д.В. Панов, И.С. Рубцов* 189
Роль информационно-измерительной пьезоэлектрической техники для измерения, контроля и диагностики физических процессов и параметров при создании, отработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники
*А.В. Гориш* 194

## ***СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ***

Система интернет-тестирования для магистерской программы «Приборостроение»
*Ю.А. Ерусалимский* 216
Моделирование процессов обучения специалистов в сетевых средах
*Е.А. Колпаков, В.Б. Рубанчик* 218
Перспективы технологий для создания интерактивных мультимедийных моделей наукоемких процессов и систем
*В.Н. Михайличенко, Ю.Р. Ким* 223
Анализ системы контроля качества процессов металлообработки
*А.С. Козинова, Е.В. Корохова* 226
Анализ и принятие решений при внедрении CALS
*А. А. Дьяченко, В.В. Корохов* 231

Управление стратегией развития компании на основе интегральных показателей деятельности
*А.С. Санина, Е.В. Корохова* 236
Управление складским хозяйством на основе имитационного моделирования
*А.П. Постникова, Е.В. Корохова* 240
Управление внедрением и развитием системы управления качеством на основе модели результативного менеджмента
*Е.А. Студенникова, О. А. Субботина, Е.В. Корохова* 246
Мультипроектное управление с использованием пула ресурсов
*В.М. Плотников, Н.С. Пономарева* 250
Адаптация свободных параметров роя частиц на основе дробного исчисления
*И.Г. Дутова, В.А. Мохов* 256

# Протонные зарядовые кластеры ядерных размеров

***В.Г.Сапогин***

*Донской государственный технический университет,*
*г. Ростов-на-Дону, Россия*

## 1. Введение

Последние два десятилетия XX века ознаменовались открытием скоплений одноименных зарядов высокой плотности. Автономные скопления зарядов были обнаружены Шоулдерсом (США, Бодега, 1987) у поверхности острийного катода в вакууме, получили название “Electrum Validum” (EV) и были применены в технологии обработки металлических поверхностей [1]. Скопления зарядов (зарядовые кластеры), наблюдаемые Шоулдерсом, имеют малые размеры (от долей до десятков микрометров), большой отрицательный заряд (от $10^8$ до $10^{11}$ электронов в скоплении) и время высвечивания от 30 до 100 пс, которое превышает время возможного разлета зарядов за счёт кулоновского расталкивания.

В эти же годы Флейшман и Понс зафиксировали избыточное тепло при электролизе тяжёлой воды. Объяснить причины выделения тепла в этих экспериментах можно было существованием нового класса ядерных реакций, протекающих без появления нейтронов (явление было названо холодный ядерный синтез, ХЯС, [2]).

Некоторые из ядерщиков считают, что избыточное тепло, возникающее при электролизе, можно объяснить реакциями холодного ядерного синтеза, которые были теоретически предсказаны в работах Алвареца [3], Зельдовича и Сахарова [4-6].

Позже, сразу несколькими исследователями, экспериментально были обнаружены так называемые низкоэнергетические ядерные реакции (lowenergynuclearreactions, LENR), возникающие при протекании тока в тлеющем разряде (см., например, [7]). Они проявили себя появлением в материале катода новых элементов.

Вместе с трансмутацией на электродах в электрическом разряде через водород или гелий было зарегистрировано спорадически возникающее

аномальное выделение тепловой энергии, которое до сих пор не имеет под собой никаких объяснений.

Автором***в заметке выдвинута гипотеза о том, что возможными инициаторами LENR и ХЯС при электрическом разряде в водороде или гелии могут быть протонные зарядовые кластеры ядерных размеров, в которых отсутствуют нейтроны.***

## 2. Основные уравнения задачи

Последовательная теория, объясняющая возможную кратковременную локализацию одноимённых зарядов в ограниченной области пространства, развита в [8] и для систем с однородной температурой базируется на уравнениях, которые в обозначениях современного векторного анализа имеют вид (принята система CGS)

$$\rho\vec{E} + \vec{f} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho; \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi; \quad (3)$$

$$p = \rho kT / q = nkT; \quad (4)$$

$$\vec{f} = -\nabla p. \quad (5)$$

Здесь $\rho$– плотность заряда в элементарном объеме, $\vec{E}$ – напряженность макроскопического электрического поля, создаваемая коллективом зарядов в месте расположения объема, $p$– давление зарядов, $\varphi$– потенциал самосогласованного поля, $q$– одиночный заряд системы, $n$ – концентрация зарядов системы, $k$– постоянная Больцмана, $f$ – сила Бернулли.

Первое уравнение системы представляет собой условие равновесия элементарного объема системы зарядов. Второе – дифференциальная форма закона Кулона, позволяющая рассчитывать дивергентные статические поля размазанных зарядов. Уравнение (3) дает связь потенциала с напряженностью электрического поля, а (4) – уравнение состояния с однородной температурой. Уравнение (5) является определением газостатической силы Бернулли.

Покажем, что система (1–5) описывает коллективное взаимодействие между зарядами, при котором возникает обратное действие поля на заряды, порождающие это поле. Для этого выясним физический смысл

компенсирующей объемной плотности сил (далее – объемной силы) $\vec{f}$. С одной стороны, эта сила газостатическая (5) и ее введение делает замкнутой систему уравнений газостатики зарядов одного знака. С другой стороны, подставляя в (1) плотность заряда из уравнения (2), получим

$$\vec{f} = -\rho\vec{E} = -\vec{E}(\nabla \cdot \vec{E})/4\pi = -\vec{G}. \qquad (6)$$

Из (6) видно, что эта же сила создается градиентом давления самосогласованного поля $\vec{G} = \vec{E}(\nabla \cdot \vec{E})/4\pi$, противоположна ему по направлению, действует на массовую плотность зарядов, как и обычный градиент давления, и в статических равновесиях компенсирует действие объемной силы $\rho\vec{E}$, играющей роль объемной кулоновской силы.

Компенсация указывает на неизвестное ранее свойство самосогласованного электрического поля удерживать неоднородную систему одноименных зарядов в ограниченной области пространства силами неэлектромагнитного происхождения. Из (5) и (6) следуют условие и механизм удержания:

$$\vec{G} = \nabla p. \qquad (7)$$

Система коллективного взаимодействия зарядов находится в состоянии газостатического равновесия с самосогласованным полем в том случае, когда равенство градиентов давлений поля и зарядов выполняется в любом элементарном объеме системы.

Исследование решений системы уравнений (1–5) указывает на принципиальную возможность существования ограниченных в пространстве полых зарядовых кластеров. Самосогласованное поле системы формирует в них два типа атмосфер (рис. 1). В атмосфере, помещенной слева на рисунке (ее удобно назвать внешней), плотность зарядов нарастает в направлении оси *x*, а в атмосфере, помещенной справа на рисунке (ее удобно назвать внутренней), плотность зарядов убывает в направлении оси *x*.

Рассмотрим возможные направления объемных сил, удерживающих внешнюю атмосферу полого кластера, состоящего из положительных зарядов (левая часть рис. 1). Предположим, что в произвольном элементе объема сила $\rho\vec{E}$ совпадает по направлению с внешней нормалью (ось *x*). Из уравнений (1) и (5) следует, что направление градиента давления

зарядов совпадает с направлением вектора $\vec{E}$. Поскольку вектор $\vec{E}$ совпадает с направлением оси *x*, то его единственная проекция положительна. Из уравнения (2) следует, что в этом объеме дивергенция $\frac{dE}{dx} > 0$ и напряженность поля нарастает в направлении оси *x*. Это нарастание формирует градиент давления поля, имеющий такое же направление, как и градиент давления зарядов.

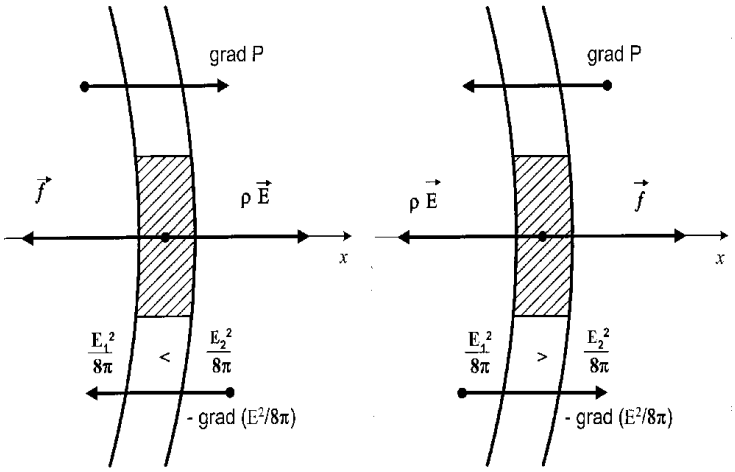



Рис. 1 - Возможные направления объёмных сил, удерживающих вравновесии квазиплоский слой положительных зарядов полого кластера

Для уравнения состояния (4) они оказываются равными друг другу, в связи с чем выполняется условие удержания (7). Сила $\vec{f}$, компенсирующая $\rho\vec{E}$, противоположна градиенту давления поля и равна ему по модулю.

Рассмотрим физику удержания в равновесии элементарного объема зарядов во внутренней атмосфере кластера (правая часть рис. 1). Как и ранее, градиент давления зарядов совпадает с направлением объемной силы $\rho\vec{E}$ и равен ей. Но теперь их направления противоположны направлению внешней нормали и единственная проекция вектора $\vec{E}$ отрицательна. Тогда из уравнения (2) следует, что в этом объеме $\frac{dE}{dx} < 0$ и напряженность поля убывает с ростом *x*. Это убывание формирует градиент давления поля, направленный против оси *x* и равный градиенту давления зарядов (7). Газостатическая сила, компенсирующая силу $\rho\vec{E}$, направлена по оси *x* и противоположна градиенту давления поля.

Если поле исследуемой системы однокомпонентное и плоское, т.е. $\vec{E} = [\,E_x(x),0,0\,]$, то равенство градиентов (7) имеет вид

$$G_x - \frac{dp}{dx} = \frac{E_x}{4\pi}\frac{dE_x}{dx} - \frac{dp}{dx} = \frac{d}{dx}\left(\frac{E_x^2}{8\pi} - p\right) = 0$$

и приводит к интегралу полного давления

$$\frac{E_x^2}{8\pi} - p = \frac{(\varphi')^2}{8\pi} - p(\varphi) = H(\varphi',\varphi) = const\,, \qquad (8)$$

который является гамильтоновой функцией системы (далее – гамильтониан). В ней роль обобщенного времени (циклическая переменная) играет координата *x*, а канонически сопряженными величинами являются обобщенный импульс $\varphi'/4\pi$ и обобщенная координата $\varphi$.

Гамильтониан (8) определяет физические свойства плоских и квазиплоских неоднородных систем зарядов. Из закона сохранения видно, что в системах одноименных зарядов реализуется спектр возможных распределений. В каждой системе существует три типа равновесий зарядов с полем, соответствующих трем значениям полного давления системы: положительному (давление поля больше давления зарядов), нулевому (давление поля равно давлению зарядов) и отрицательному (давление поля меньше давления зарядов).

## 3. Уравнение самосогласованной электростатики неизлучающих зарядови его решения

Из системы (1-5) легко получить уравнение самосогласованной электростатики неизлучающих зарядов. Для этого в системе нужно всё выразить через потенциал и получить из (5), (3), (1) и (4) скалярный интеграл, из которого последует функция распределения Больцмана. Её следует подставить в правую часть (2) и получить

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho_0\, exp\left(-\sigma e\varphi/kT\right), \qquad (9)$$

где $\sigma$ – знак одиночного заряда системы, а *e* – элементарный заряд.

В плоской симметрии уравнение (9) имеет интеграл полного давления, который является гамильтоновой функцией системы

$$\frac{(\varphi')^2}{8\pi} - p_0\, exp\left(-\frac{\sigma e\varphi}{kT}\right) = H(\varphi',\varphi) = C = const\,. \qquad (10)$$

Интегрируя (10) для граничного условия $\varphi(0)=\varphi'(0)=0$, легко найти точное решение, которое является чётной функцией

$$y=\sigma ln(cos\xi), \tag{11}$$

где введены следующие обозначения

$$\xi=x/l,\ y=\varphi/\varphi_*. \tag{12}$$

В соотношениях (12) пространственный масштаб системы

$$l=\frac{1}{e}\sqrt{\frac{kT}{2\pi n_0}}, \tag{13}$$

а масштаб потенциала

$$\varphi_*=2kT/e. \tag{14}$$

В сферически симметричном случае уравнение (9) имеет вид

$$xy''+2y'=\alpha^2 x exp(2y), \tag{15}$$

где $y(x)=-\sigma\varphi(r)/\varphi_*$, $x=r/R$, $R$– радиус сферы, на которой задаются те же самые граничные условия, $\alpha$ – параметр состояния системы

$$\alpha^2=R^2/l^2=T_*/T. \tag{16}$$

В (16) $T_*$– характеристическая температура системы

$$T_*=2\pi e^2 n_0 R^2/k. \tag{17}$$

Уравнение (15) относится к классу модифицированного $E$– уравнения Эмдена [9]. Его столетнее исследование показало, что оно не имеет точных аналитических решений в элементарных функциях. Для граничных условий $y(1)=0, y'(1)=0$ в [8] найдено его приближённое решение, которым можно пользоваться для ограниченного диапазона значений параметра состояния ($\alpha\geq 3$, полый кластер с температурой ниже характеристической). Выпишем его для потенциала

$$\frac{\varphi}{\varphi_*}=\sigma ln\left[\frac{\alpha r}{R\sqrt{\alpha^2-1}}sin(A)\right], \tag{18}$$

где

$$A=arcsin\left(\frac{\sqrt{\alpha^2-1}}{\alpha}\right)-\sqrt{\alpha^2-1}\,ln\left(\frac{r}{R}\right).$$

Нули синуса в решении (18) дают асимптоты, которые и являются границами пространства взаимодействия кластера. Граница внутренней сферы:

$$ln\frac{r_1}{R}=\left[arcsin\left(\frac{\sqrt{\alpha^2-1}}{\alpha}\right)-\pi\right]/\sqrt{\alpha^2-1}. \qquad (19)$$

Граница внешней сферы ($r_2>r_1$):

$$ln\frac{r_2}{R}=\left[arcsin\left(\frac{\sqrt{\alpha^2-1}}{\alpha}\right)\right]/\sqrt{\alpha^2-1}. \qquad (20)$$

Полученные формулы (18) – (20) позволяют получить аналитические выражения основных электростатических и кинетических характеристик зарядового кластера для случая полых состояний [8].

***Исследуем поведение системы вблизи асимптот.*** Введем координату $\delta \geq 0$, направленную по радиус-вектору, начало которой приходится на радиус асимптоты $r_1$: $r=r_1+\delta$ . Разлагая в (18) sin(A) в точке $r_1$ (внутренняя асимптота) по малому параметру $\delta/r_1$ получим, что потенциал в тонком слое, прилежащем к полости, обладает логарифмической особенностью

$$\frac{\varphi}{\varphi_*}\approx\sigma ln\left(\frac{\alpha\delta}{R}\right), \qquad (21)$$

а зависимость концентрации от координаты $\delta$ следует из функции распределения Больцмана и имеет особенность $\sim\delta^2$

$$\frac{n}{n_0}\approx\frac{R^2}{\alpha^2\delta^2}. \qquad (22)$$

Как видно из (22), распределение зарядов в сферическом кластере оказывается таким, что самосогласованное поле сваливает их основную часть в потенциальные бесконечно глубокие щели, которые до конца не заполнены.

Если ввести координату $\delta \geq 0$, направленную против радиус-вектора, начало которой приходится на радиус внешней асимптоты $r_2$, то асимптотические представления (21) и (22) останутся теми же. Основной вклад в число частиц зарядового кластера вносят особенности концентрации на асимптотах. Оценим вклад в число частиц у внутренней асимптоты. Для этого интегрирование в несобственном интеграле проведём

в интервале $r_1+\delta<r<R$ при $\delta \to 0$. Получим для внутренней асимптоты кластера

$$N_1 = \int_V n(r)dV = \frac{4\pi n_0 R^2}{\alpha^2} \int_{r_1+\delta}^{R} \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 dr \sim \frac{4\pi n_0 R^2 r_1^2}{\alpha^2 \delta}, \qquad (23)$$

а для внешней асимптоты кластера (интегрирование в несобственном интеграле проведём в интервале $R<r<r_2-\delta$ при $\delta \to 0$)

$$N_2 \sim \frac{4\pi n_0 R^2 r_2^2}{\alpha^2 \delta}. \qquad (24)$$

Окончательная оценка числа частиц, удерживаемых зарядовым кластером, может быть представлена в виде

$$\frac{N}{N_*} = \frac{N_1 + N_2}{N_*} \sim \frac{\alpha}{2\beta}\left[\left(\frac{r_1}{R}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{R}\right)^2\right], \qquad (25)$$

где введены обозначения

$$N_* = 8\pi n_0 l^3 \qquad (26)$$

– масштаб числа частиц,

$$\beta = \delta / R << 1 \qquad (27)$$

– параметр относительной пустоты заполнения потенциальной щели зарядами кластера.

Полученные соотношения были использованы для оценок числа зарядов, удерживаемых в электронном кластере микронных размеров Шоулдерса [1], и дали хорошее совпадение при $\beta=10^{-6}$. Распространим полученные результаты на пространственные размеры порядка ядерных (1 ферми=$10^{-13}$ см). В таблицах представлено (выделено жирным) количество протонов, удерживаемых зарядовым кластером с минимальной концентрацией $n_0$(см$^{-3}$) (взято на сфере нулевого давления поля), для диапазона температур, изменяющихся от 500 К до 2000 К. В расчётах для табл. 1 принято: параметр состояния $\alpha$=3, а параметр относительной пустоты заполнения щели $\beta=10^{-7}$. В этой же таблице, после вертикальной черточки проставлены радиусы $r_2$ получившихся протонных ядер в ферми. Известно, что радиус ядра никеля около 5 ферми.

## 4.Выводы

Таблица 1. Количество протонов в кластере и его радиус для $\alpha$=3.

| $T$(К)\$n_0$ | $2\cdot10^{30}$ | $4\cdot10^{30}$ | $6\cdot10^{30}$ | $8\cdot10^{30}$ | $10\cdot10^{30}$ | $12\cdot10^{30}$ | $14\cdot10^{30}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | **7**/7,2 | **5**/5,1 | **4**/4,1 | **3**/3,6 | **3**/3,2 | **3**/2,9 | **2**/2,7 |
| 750 | **13**/8,8 | **9**/6,2 | **7**/5,1 | **6**/4,4 | **6**/3,9 | **5**/3,6 | **5**/3,3 |
| 1000 | **20**/10,1 | **14**/7,2 | **12**/5,9 | **10**/5,1 | **9**/4,5 | **8**/4,1 | **7**/3,8 |
| 1250 | **29**/11,3 | **20**/8,0 | **16**/6,5 | **14**/5,7 | **12**/5,1 | **11**/4,6 | **10**/4,3 |
| 1500 | **38**/12,4 | **27**/8,8 | **22**/7,2 | **19**/6,2 | **17**/5,6 | **15**/5,1 | **14**/4,7 |
| 1750 | **48**/13,4 | **34**/9,5 | **27**/7,7 | **24**/6,7 | **21**/6,0 | **19**/5,5 | **18**/5,1 |
| 2000 | **58**/14,3 | **41**/10,1 | **33**/8,3 | **29**/7,2 | **26**/6,4 | **24**/5,9 | **22**/5,4 |

В таблице 2 те же расчёты выполнены для параметра состояния $\alpha$=10.

Таблица 2. Количество протонов в кластере и его радиус для $\alpha$=10.

| $T$(К)\$n_0$ | $2\cdot10^{30}$ | $4\cdot10^{30}$ | $6\cdot10^{30}$ | $8\cdot10^{30}$ | $10\cdot10^{30}$ | $12\cdot10^{30}$ | $14\cdot10^{30}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | **19**/18 | **13**/13 | **11**/10 | **9**/9 | **8**/8 | **7**/7 | **7**/7 |
| 750 | **35**/22 | **24**/16 | **20**/13 | **17**/11 | **15**/10 | **14**/9 | **13**/8 |
| 1000 | **53**/25 | **38**/18 | **31**/15 | **26**/13 | **24**/11 | **22**/10 | **20**/10 |
| 1250 | **75**/28 | **53**/20 | **43**/16 | **37**/14 | **33**/13 | **30**/12 | **28**/11 |
| 1500 | **99**/31 | **70**/22 | **57**/18 | **49**/16 | **44**/14 | **40**/13 | **37**/12 |
| 1750 | **124**/34 | **88**/24 | **72**/20 | **62**/17 | **55**/15 | **50**/14 | **47**/13 |
| 2000 | **152**/36 | **107**/25 | **88**/21 | **76**/18 | **68**/16 | **62**/15 | **57**/14 |

Предлагаемая в [8] последовательная теория скоплений одноименных зарядов, кратковременно удерживаемых в ограниченной области пространства, основана на следующих фундаментальных положениях:

- существует такой класс коллективного взаимодействия между одноименными зарядами динамической системы, в котором возникает обратное действие макроскопического самосогласованного поля на заряды, порождающие это поле;
- обратное действие поля на заряды при таком взаимодействии всегда приводит к появлению удерживающей объемной плотности газостатических сил полевого происхождения, которая связана с градиентом давления самосогласованного поля, совпадает с ним по величине и противоположна ему по направлению;
- в этом классе взаимодействия динамическая система зарядов находится в состоянии газостатического равновесия с самосогласованным полем в том случае, если градиенты давлений поля и зарядов равны друг

другу в любом элементарном объеме скопления;

- равенство градиентов давлений поля и зарядов в плоских динамических скоплениях обусловливает закон сохранения скалярной функции системы – интеграл полного давления, который состоит из разности давлений поля и зарядов и играет роль гамильтониана взаимодействия;
- двухпараметрическая теория оказывается универсальной и предсказывает существование полых зарядовых кластеров с радиусами от сантиметровых масштабов до ядерных;
- распределение зарядов в кластере сферической симметрии оказывается таким, что поле сваливает их основную часть в потенциальные бесконечно глубокие щели, которые до конца не заполнены;
- показано, что число протонов в кластерах без нейтронов с параметром состояния $\alpha$=3 и $\alpha$=10 при значении параметра относительной пустоты заполнения щели $\beta=10^{-7}$ может изменяться от 2 до 152 при радиусах кластера, изменяющихся от 2,7 ферми до 36 ферми;
- поскольку протонные зарядовые кластеры имеют радиусы порядка ферми, то и время их высвечивания должно значительно превышать времена жизни микронных кластеров Шоулдерса;
- существование протонных кластеров ядерных размеров в электрическом разряде водорода, гелия или их смеси может инициировать большое количество неизвестных безнейтронных ядерных реакций, которые могут вызывать трансмутации как в самой плазме, так и внутри материала катода.
- изложенный механизм инициализации неизвестных реакций протонными зарядовыми кластерами ядерных размеров может объяснить наблюдаемое в газовом разряде спорадическое аномальное выделение тепловой энергии.

**Списоклитературы**

1. Shoulders K. EV: A Tale of Discovery. 1987, Jupiter Technology, Austin TX; Shoulders Ken and Shoulders Steve, “Observation on the Role of Charge Clusters in Nuclear Cluster Reaction”, Journal of New Energy. 1996. Vol. 1. No. 3. P. 111–121; Shoulders Ken and Shoulders Steve, “Charge clusters in action”, Bodega, CA, 1999. P.12.

2. Fleishmann M., Pons S. And Hawkins M. Electrochemical Induced Nuclear Fusion of Deuterium//J.Electroanal. Chem., **261**, p.301-308 (1989).

3. Alvarez L.W., Bradner H., Crawford F.S. Jr., Crawford J.A., Falk-Vairant P., Good M.L., Gow J.D., Rosenfeld A.H., Solmitz F., Stevenson M.L., Ticho H.K. and Tripp R.D., Phys. Rev. 105, 1127 (1957).

4. Зельдович Я.Б. Реакции, вызываемые μ-мезонами в водороде.//ДАН 95(1954) с.493. 5. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. Ядерные реакции в холодном водороде. УФН, 71, вып. 4 (1960), с.581-630.

6. Сахаров А.Д. Пассивные мезоны. Отчёт ФИАН (1948).

7. Савватимова И.Б., Карабут А.Б. Радиоактивность палладиевых электродов после облучения в тлеющем разряде.//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №1, 1996. С. 4-11.

8. Сапогин В.Г. Механизмы удержания вещества самосогласованным полем. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. С. 254.

9. EmdenR. Gaskugeln. LeipzigundBerlin. 1907. – p. 497.

# Электрическая неустойчивость к формированию плоских электронных кластеров в двухкомпонентной плазме

***В.Г.Сапогин***

*Донской государственный технический университет,*

*г. Ростов-на-Дону,Россия*

## 1. Введение

Последние тридцать лет в физических лабораториях многих стран проводились эксперименты по протеканию мощных коротких электрических импульсов в различных проводящих средах. Так, группой Голубничего П.И. наблюдались долгоживущие светящиеся объекты (ДСО) миллиметровых радиусов в очищенной воде [1]. Шабанов Г.Д. зафиксировал светящийся поверхностный разряд в водопроводной воде, формирующий разнообразные по форме светящиеся воздушные плёнки, имеющие сантиметровые размеры [2].

Уменьшение объёмов сред, в которые кратковременно вводится большая электрическая мощность приводит к уменьшению геометрических размеров светящихся образований вплоть до микронных. Во всех опытах поведение светящихся объектов очень похоже на проявления, которые отмечены у шаровой молнии. Светящийся объект возникает как локализованное в пространстве образование очень быстро (по-видимому, микросекунды). В течение времени жизни объект высвечивает накопленную электрическую энергию (миллисекунды и секунды) и исчезает.

Исследователи отмечают возникающее внутри объекта макроскопическое разделение зарядов. Экспериментально выяснено, что он может пребывать в различных электрических состояниях: электронейтральном, положительно заряженном и отрицательно заряженном. Перечисленные свойства объекта позволяют отнести его к классу плазмоидов и микроплазмоидов с высокой температурой.

В заметке ***делается попытка построить приближённую физико-математическую модель генерации таких плазмоидов в двухкомпонентной плазме, которая бы адекватно описывала их наблюдаемые электрические свойства.***

## 2. Математическая модель

На наш взгляд, процесс формирования плазмоида коллективным электрическим полем в двухкомпонентной плазме с однородной температурой описывается системой трёх дифференциальных уравнений в частных производных:

$$en\vec{E} + kT\nabla n + mn\nu\vec{\upsilon} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{\upsilon}) = 0; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi e(n_0 - n). \quad (3)$$

В системе уравнений (1) – (3): уравнение (1) – уравнение равновесия элементарного объёма нестатической плазмы, уравнение (2) – уравнение непрерывности, уравнение (3) – уравнение Пуассона (в СГС). Принятые в (1) – (3) обозначения: $\vec{E}$ – вектор напряжённости коллективного электрического поля, $n_0$ – концентрация фона положительных зарядов, $n$ – концентрация электронов, которые могут дрейфовать в коллективном поле, e – элементарный заряд системы, $T$ – абсолютная температура, $m$ – масса электрона, $\upsilon$ – скорость дрейфа электронов, $\nu$ – частота столкновений электронов с положительными зарядами фона, $k$ – постоянная Больцмана.

Следует заметить, что похожая задача была поставлена в [3]. Но поскольку в ней дополнительно учитывается наличие плотности постоянного тока в направлении оси $x$ системы, то полученные там результаты с результатами, полученными ниже, практически не соприкасаются.

При каких предположениях решается поставленная нами задача? Они следующие: 1) система (1) – (3) описывает статическое и нестатическое поведение плазмы внутри плазмоида; 2) коллективное поле формирует плоский плазмоид; 3) после формирования плазмоид переходит в возможное статическое состояние плазмы и живёт бесконечно долго; 4) сформированный плазмоид имеет однородную температуру и не излучает; 5) при формировании плазмоида электроны увлекаются переменным коллективным полем относительно неподвижного в лабораторной системе положительного фона зарядов; 6) возможное ускоренное движение электронов в коллективном поле компенсируется вязкой силой,

пропорциональной частоте столкновений электронов с положительными зарядами фона.

Для решения плоской задачи $\vec{E}(\vec{r},t)=(E_x(x,t),0,0)$ вводятся безразмерные функции и переменные: $y(\xi,\tau)=E_x/E_*$ – приведённая проекция напряжённости коллективного поля; $E_*$ – масштаб напряжённости коллективного поля; $z(\xi,\tau)=n/n_0$ – приведённая концентрация электронов; $u(\xi,\tau)=\upsilon_x/\upsilon_*$ – приведённая проекция скорости электронов, участвующих в развитии неустойчивости; $\xi=x/l$ – приведённая координата системы; $l=2kT/(eE_*)$ – пространственный масштаб системы; $\upsilon_*=eE_*/(m\nu)$ – масштаб скорости; $\tau=t/t_*$ – приведённое время системы; $t_*=l/\upsilon_*$ – масштаб времени.

Система уравнений (1) – (3) относительно безразмерных функций $y(\xi,\tau),z(\xi,\tau),u(\xi,\tau)$ имеет вид

$$\frac{\partial z}{\partial \xi}=-2(y+u)z, \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi}=-\frac{1}{z}\left(\frac{\partial z}{\partial \tau}+u\frac{\partial z}{\partial \xi}\right), \tag{5}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \xi}=\frac{\beta^2}{2}(1-z), \tag{6}$$

где $\beta^2=2n_0kT/(E_*^2/8\pi)=T/T_*$ - параметр состояния системы ($T_*$ – характеристическая температура) определяет три возможных состояния плазмы: случай холодной плазмы $0<\beta^2<1$; случай равенства температуры плазмы характеристической (сепаратрисса) $\beta^2=1$; случай горячей плазмы $\beta^2>1$. Система уравнений (4) – (6) при любых $\beta$ имеет решение, которое описывает случай однородной плазмы ($z$=1), в которой отсутствует коллективное поле ($y$=0) и отсутствует направленное движение электронов ($u$=0). Это решение следует отнести к случаю электронейтрального плазмоида.

Нестатическая система (4) – (6) может быть сведена к одному уравнению относительно функции y(ξ,τ)

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} - y\frac{\partial y}{\partial \xi} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - \frac{\beta^2}{2}y. \qquad (7)$$

При $\beta^2$=0 уравнение (7) по структуре напоминает уравнение Бюргерса для значения кинематической вязкости $\upsilon = 1/2$. Его отличие от уравнения Бюргерса очевидно по следующим причинам: 1) перед нелинейным слагаемым $y\frac{\partial y}{\partial \xi}$ стоит другой знак; 2) параметр $\beta^2$ в исходной системе уравнений (4) – (6) не может быть равен нулю, поскольку при этом вырождается исследуемая система; 3) функция $y(\xi,\tau)$ представляет собой приведённую проекцию напряжённости коллективного электрического поля плазмы и не имеет никакого отношения к скорости течения жидкости. Более общий вид уравнения (7) был получен В.И.Пустовойтом в [3].

Статические состояния плазмы $(\partial/\partial\tau = 0)$ описываются уравнением

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} + 2y\frac{dy}{d\xi} - \beta^2 y = 0. \qquad (8)$$

Уравнение (8) точных решений в элементарных функциях не имеет. Найдём приближённые решения. Для этого в (8) понизим порядок уравнения введением функции $p(y) = \frac{dy}{d\xi}$:

$$\frac{dp}{dy} = y\left(\frac{\beta^2}{p} - 2\right). \qquad (9)$$

Мы приходим к уравнению с разделяющимися переменными, которое имеет решения в неявных функциях. Решения не помогают найти физически осмысленный результат. Из (9) видно, что при $y = 0, \frac{dp}{dy} = 0.$ В связи с этим будем искать приближённые решения (9) для класса функций в виде ряда, состоящего из двух слагаемых

$$p \approx p_0 + \alpha y^2, \qquad (10)$$

где $\alpha > 0 \, и \, p_0 > 0$ - постоянные.

Подставляя (10) в (9), сохраним слагаемые пропорциональные *y*. Тогда из требования

$$y\left(2p_0\alpha + 2p_0 - \beta^2\right) = 0 \qquad (11)$$

найдём связь между $\alpha$ и $p_0$

$$p_0 = \beta^2 / 2(1+\alpha); \quad \alpha = \beta^2 / 2p_0 - 1. \tag{12}$$

Требование $\alpha$>0 определяет диапазон изменения $p_0$: $0 < p_0 < \beta^2/2$. Интегрируя (10), получаем приближённое решение в классе периодических функций для начальных условий $y(0)=0; y'(0)=p_0$, справедливое в области $|y|<1$

$$y \approx \frac{\beta}{\sqrt{2\alpha(1+\alpha)}} tg\left(\sqrt{\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}}\beta\xi\right). \tag{13}$$

Приближённое решение (13) даёт распределение напряжённости статического коллективного поля плазмы в области $|\xi| < \xi_0$, где $\xi_0$ определено соотношением

$$\xi_0 = \frac{1}{\beta}\sqrt{\frac{2(1+\alpha)}{\alpha}} arctg\left(\frac{\sqrt{2\alpha(1+\alpha)}}{\beta}\right). \tag{14}$$

Как видно из (13) в плоскости $\xi$=0 напряжённость обращается в нуль, а скорость её нарастания в пространстве зависит от параметра состояния системы $\beta$. Вектор напряжённости коллективного электрического поля направлен в обе стороны внешнего пространства от плоскости $\xi$=0.

Такая ориентация напряжённости приводит к тому, что электроны плазмы перераспределяются коллективным полем так, что вблизи плоскости нулевого давления поля (там, где $y^2$=0 или $\xi$=0) они образуют области с высокой концентрацией. Приближённый закон распределения концентрации находится из (6) и имеет вид

$$z = 1 - \frac{2}{\beta^2}\frac{dy}{d\xi} \approx 1 - (1+\alpha)^{-1} cos^{-2}\left(\sqrt{\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}}\beta\xi\right). \tag{15}$$

Из (15) видно, что максимум распределения концентрации электронов в плазмоиде приходится на плоскость $\xi$=0 и зависит только от параметра $\alpha$:

$$z_M = 1 - 1/(1+\alpha). \tag{16}$$

Поскольку максимальное значение концентрации электронов (16) всегда меньше, чем концентрация положительных зарядов фона, то полученное решение описывает ограниченный в пространстве плазмоид в виде электронного кластера в дырочной плазме.

Ещё один класс приближённых периодических решений уравнения (9) существует для функции $p \approx -p_0 - \alpha y^2$ с начальными условиями $y(0)=0;\ y'(0)=-p_0$. Связь между параметрами $\alpha$>1 и $p_0$>0 изменяется: $p_0 = \beta^2 / 2(\alpha-1);\quad \alpha = \beta^2/(2p_0)+1.$ Для них распределение напряжённости поля имеет вид

$$y_2 \approx -\frac{\beta}{\sqrt{2\alpha(\alpha-1)}} tg\left(\sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha-1)}}\beta\xi\right), \qquad (17)$$

а распределение концентрации

$$z_2 = 1-\frac{2}{\beta^2}\frac{dy}{d\xi} \approx 1+(\alpha-1)^{-1} cos^{-2}\left(\sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha-1)}}\beta\xi\right). \qquad (18)$$

Соотношения (17) и (18) дают распределение физических параметров кластера в области $|\xi| < \xi_0$, где $\xi_0$ определено соотношением

$$\xi_0 = \frac{1}{\beta}\sqrt{\frac{2(\alpha-1)}{\alpha}} arctg\left(\frac{\sqrt{2\alpha(\alpha-1)}}{\beta}\right). \qquad (19)$$

Приближённый класс решений (17) описывает распределение коллективного электрического поля в плазме. В плоскости $\xi$=0 напряжённость обращается в нуль, а скорость её нарастания в пространстве зависит от параметра состояния системы $\beta$. Вектор напряжённости коллективного электрического поля направлен из внешнего пространства к плоскости $\xi$=0.

Это приводит к тому, что электроны плазмы перераспределяются коллективным полем так, что они образуют плазмоид, ограниченный в пространстве, в виде электронного кластера в электронной плазме с минимальной концентрацией в плоскости $\xi$=0, большей, чем концентрация положительных зарядов фона

$$z_m = 1+(\alpha-1)^{-1} > 1.$$

Состояния (18) очень похожи на состояния типа зарядовых кластеров, удерживаемых плоским коллективным полем [4].

Найденные приближённые решения (13) и (17) позволяют провести численное моделирование точного уравнения (8) с корректными начальными условиями.

Процесс протекания электрической неустойчивости, формирующей различные плазмоиды на её начальной стадии, следует из уравнения (7). Для его решения применим метод встречных плоских волн. Приведем уравнение (7) к паре автомодельных уравнений для двух фаз плоских волн $\theta = \xi + \sigma\gamma\tau$ и $\psi = \xi - \sigma\gamma\tau$, где $\gamma = \upsilon_f / \upsilon_*$ – приведённая фазовая скорость, а $\sigma = \pm 1$ – знаковый множитель, отличающий два возможных направления фазовой скорости распространения волн:

а) для фазы $\theta$ (штрихи означают дифференцирование по θ)

$$y_1'' + 2y_1y_1' - \beta^2 y_1 - 2\sigma\gamma y_1' = 0 \qquad (20)$$

б) для фазы $\psi$ (штрихи означают дифференцирование по $\psi$)

$$y_2'' + 2y_2y_2' - \beta^2 y_2 + 2\sigma\gamma y_2' = 0 \qquad (21)$$

При $\gamma$=0 уравнения (20) и (21) переходят в уравнение статики (8). Уравнения (20) и (21) не интегрируются в элементарных функциях. Найдём приближенные решения таким же способом, каким искались решения уравнения (8). Понизим порядок уравнения (20). Для начальных условий $y(0) = 0;\ y'(0) = p_0 = \beta^2/2$ при выполнении условия $|y| < 1$ из уравнения (20) следует два вида приближённых решений (приближённые решения ищем в виде $p \approx p_0 + 2\sigma\gamma y$)

$$y_1 \approx \frac{\beta^2}{4\sigma\gamma}\left[exp(2\sigma\gamma\theta) - 1\right]; \qquad (22)$$

Аналогично, для начальных условий $y(0) = 0;\ y'(0) = p_0 = -\beta^2/2$ при выполнении условия $|y| < 1$ из уравнения (21) следует ещё два вида приближённых решений (приближённые решения ищем в виде $p \approx p_0 - 2\sigma\gamma y$)

$$y_2 \approx -\frac{\beta^2}{4\sigma\gamma}\left[1 - exp(-2\sigma\gamma\psi)\right]. \qquad (23)$$

Сумма двух решений (22) и (23) даёт постороннее решение. Два разностных решения $y = \pm(y_1 - y_2)$ не зависят от знака σ и дают физически осмысленный результат. Распределение затравочного коллективного поля в плазмоидах имеет вид

$$y \approx \pm \frac{\beta^2}{2\gamma} exp(2\gamma^2\tau) sh(2\gamma\xi), \quad (24)$$

распределение концентрации электронов в плазмоидах

$$z \approx 1 \mp 2 exp(2\gamma^2\tau) ch(2\gamma\xi), \quad (25)$$

а распределения скорости электронов в плазмоидах имеет вид

$$u \approx y\left(\frac{4\gamma^2}{\beta^2 z} - 1\right). \quad (26)$$

Полученные приближённые решения (24) – (26) дают картину протекания линейной стадии неустойчивости при выполнении пространственно-временных неравенств

$$-\infty < \tau < \tau_0 \text{ и } |\xi| < \xi_0, \quad (27)$$

Где величины $\xi_0$ и $\tau_0$ связаны соотношением

$$2\gamma = \beta^2 exp(2\gamma^2\tau_0) |sh(2\gamma\xi_0)|.$$

Из решений (24) – (26) видно, что при $\tau \to -\infty$ плазмоид для любых $\beta$, $\gamma$ однороден ($z$=1) и электронейтрален, коллективное поле отсутствует ($y$=0) и нет направленного движения электронов ($u$=0). На начальной стадии развития неустойчивости её инкремент $2\gamma^2$ существенно зависит от приведённой скорости $\gamma$ продольных волн, реализующих неустойчивость.

Из круглых скобок в (26) видно, что возможны два вида протекания неустойчивости: неустойчивость, которая реализуется на медленных волнах $\gamma < \gamma_s$, где $\gamma_s = \beta\sqrt{z}/2$ и неустойчивость, реализуемая на быстрых волнах $\gamma > \gamma_s$, (похожа на взрывную неустойчивость Пустовойта В.И., не определённую в [3] количественно).

Из (24) – (26) видно, что все электроны, участвующие в формировании неустойчивости, разделены на четыре класса. К первому классу относятся электроны, которые расположены вблизи плоскости $\xi$=0. Они практически неподвижны для любого момента времени. Второй класс представляют электроны, у которых $u$=0 в определённой области пространства и в определённый момент времени. Состояние покоя этих электронов в динамической системе объясняется равенством сил, удерживающих рассматриваемый объём в равновесии для данного момента времени. Как видно из (1), для них векторная сумма силы Бернулли $\vec{f}_b = -kT\nabla n$ и

градиента давления поля $\vec{f} = -en\vec{E}$, действующего на электроны равна нулю. Третий класс электронов движется в направлении напряжённости поля. Их движение обеспечивает сила Бернулли, которая в этих областях плазмы оказывается больше градиента давления поля. Четвёртый класс электронов перемещается против напряжённости коллективного поля. Их движение обеспечивает градиент давления поля, который в этих областях плазмы оказывается больше силы Бернулли.

При формировании одного и того же плазмоида существуют различные варианты движения электронов плазмы для двух видов неустойчивости. Так, если образование электронного кластера в дырочной плазме происходит при наличии затравочного поля в виде $y \sim +sh(2\gamma\xi)$, то при неустойчивости на медленных волнах основная часть электронов начинает движение к плоскости $\xi$=0, а при реализации неустойчивости на быстрых волнах основная часть электронов начинает уходить на периферию.

Образование плазмоида в виде электронного кластера в электронной плазме для затравочного поля $y \sim -sh(2\gamma\xi)$ при неустойчивости на медленных волнах основная часть электронов уходит на периферию, а при реализации неустойчивости на быстрых волнах основная часть электронов начинает движение к плоскости $\xi$=0.

### 3. Оценки физических параметров плазмоидов

Приведём оценки физических параметров плазмоидов с пространственным масштабом $l = 10^{-3}$ см для температуры $T$=1000 К. Будем считать, что плазмоид находится при температуре, совпадающей с характеристической (параметр состояния $\beta$=1). Тогда масштаб напряжённости коллективного поля $E_* = 170$ В/см, газокинетическое давление положительных и отрицательных зарядов в плазмоиде $2p_0=1{,}3\cdot10^{-4}$ дин/см$^2$, а концентрация положительных зарядов фона $n_0=4{,}7\cdot10^{10}$ см$^{-3}$. Масштаб скорости $\upsilon_*=3\cdot10^8$ см/с для частоты столкновений $\nu=10^9$ с$^{-1}$. Характерный масштаб времени нарастания неустойчивости $t_*$=3 пс.

Оценки для шаровой молнии, которая может существовать в вакууме, приведены в [5]. Если в атмосфере она представляет собой плазмоид, то для пространственного масштаба $l$ = 10 см и температуры $T$=1000 К, масштаб напряжённости коллективного поля $E_* = 1{,}7\ 10^{-2}$ В/см,

газокинетическое давление положительных и отрицательных зарядов в плазмоиде $2p_0=1{,}3\cdot10^{-12}$ дин/см$^2$, а концентрация положительных зарядов фона $n_0=4{,}7\cdot10^2$ см$^{-3}$. Масштаб скорости $\upsilon_*=3\cdot10^4$ см/с для частоты столкновений $\nu=10^9$ с$^{-1}$. Характерный масштаб времени нарастания неустойчивости при формировании плазмоида шаровой молнии $t_*$=300 мкс.

## 4.Выводы

Предложена приближённая физико-математическая модель генерации плазмоидов в двухкомпонентной плазме, которая адекватно описывает их наблюдаемые электрические свойства.

Исследование статических решений модели указывает на возможность существования трёх видов плазмоидов: электронейтрального и заряженного положительно (электронный кластер в дырочной плазме), либо отрицательно (электронный кластер в электронной плазме).

Исследование нестатических решений модели на начальной стадии указывает на возможность существования двух видов электрической неустойчивости: неустойчивости на медленных волнах и неустойчивости на быстрых волнах.

Образование электронного кластера в дырочной плазме происходит при наличии затравочного поля $y \sim +sh(2\gamma\xi)$. При неустойчивости на медленных волнах основная часть электронов начинает движение к плоскости $\xi$=0, а при реализации неустойчивости на быстрых волнах основная часть электронов начинает уходить на периферию.

Образование плазмоида в виде электронного кластера в электронной плазме происходит для затравочного поля $y \sim -sh(2\gamma\xi)$. При развитии неустойчивости на медленных волнах основная доля электронов уходит на периферию, а при реализации неустойчивости на быстрых волнах основная доля электронов начинает движение к плоскости $\xi$=0.

Следующие из модели оценки для микроплазмоида и десятисантиметрового плазмоида типа шаровой молнии дают приемлемые значения физических величин, которые могут реализоваться в природе и в лабораторных экспериментах.

**Список литературы**

1. GolubnichiyP.I., GromenkoV.M. etal. “The Investigation of the Mechanism of Energy Accumulation in Long-Living Lightning Objects, Found after a Powerful Impulse Energy Release in Water”, Cold Fusion Source Book. ISCF a. AES. 1994. Minsk. PP. 221–225; “Long-Living Lightning Objects Iside the Pulsating Cavern, Initiated by the Powerful Energy Emission in Water.” Dokl. An SSSR. 1990. V. 311. No. 2. PP. 356–360; “Formation of Long-Living Lightning Objects after the Collaps of Dens Low Temperature Water Plasma.” Zhurnal Techn. Fiziki. 1990. V.60. No. 1. PP. 183–186; “Fomation and Dinamics of Long-Living Lightning Objects – Lightning Ball, Summary Report”. Moscow: Inst. Vysokih Temp. 1991. No. 2. PP. 73–75; “Dinamics of Long-Living Lightning Objects Throw-out, Initiated by the Powerful Spark Energy Emission in Water. High velocity photography, photonics and metrology of fast-occuring processes. Summary of Reports at the 15th All–Union conference.” 1991. Moscow: VNIIOFI. P.113.

2. Шабанов Г.Д. Оптические свойства долгоживущих светящихся образований// Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. №. 4. С. 81.; Шабанов Г.Д., Соколовский Б.Ю. Макроскопическое разделение зарядов в импульсном электрическом разряде. //Физика плазмы. 2005. Т. 31. №6. С. 560-566.

3.Пустовойт В.И. О механизме возникновения молнии. //Радиотехника и электроника.– 2006. –Т. 51, №8. – С. 996 – 1002.

4.Сапогин В.Г. Механизмы удержания вещества самосогласованным полем. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. С. 254.

5.Сапогин В.Г. О модели шаровой молнии из одноименных зарядов//Изв. высш. учеб. зав. Северо–Кавказский регион. Сер. Естественные науки. 1999. №3. С.67–70; О частоте излучения зарядового кластера шаровой молнии//Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. – 2007. –Т. XV, вып. 1 (43). – С.56 – 62.

**Электрические накопители избыточной энергииискусственной плазменной неустойчивости – энергетическая бездна человечества**

***В.Г.Сапогин[1], Н.Н.Прокопенко[1], А.Е.Панич[2]***

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

*[2]Институт высоких технологий и пьезотехники Южного Федерального университета г. Ростов-на-Дону, Россия*

Современная энергетика весьма разнообразна как по способам извлечения энергии, так и по затратам людских ресурсов и денежных средств. Даже добывание примитивной энергии каменного угля требует многочисленных человеческих жертв, не говоря уже о высокой стоимости одного гигаватта атомной энергии, выраженной в утерянных человеческих жизнях.

Привычная энергетика строится по цепочке: сначала нужно взять или запасти энергию какого-либо физического процесса, преобразовать её в тепло, либо в механическое движение. На следующем шаге тепло или движение можно либо сразу использовать, либо преобразовать их в электричество и пьезоэлектричество.

Примерно 40 лет тому назад швейцарские инженеры прорубили окно в новое направление энергетики. Они просто разорвали упомянутую выше энергетическую цепочку и предложили новый способ извлечения электрической энергии, который казался чем-то невообразимым и непонятным. Им удалось построить небольших размеров установку, очень похожую на электрофорную машину, но в которой отсутствовали щётки, снимающие заряд. В начальный момент нужно закрутить диск (диски) установки и она сразу начинает вырабатывать электрическую энергию, как-будто бы из ничего. Чтобы прекратить её работу необходимо механически остановить вращение дисков.

Изобретатель Пауль Бауман (Paul Baumann) свои устройства называет Testatik MachineM/LConverter from religious group “Methernitha” (адрес: Methernitha, CH-3517 Linden, Switzerland, phone: ++41 31 97 11 24) далее Тестатика. Его община по религиозным соображениям не берёт на эти устройства патента, ничего не платит электрическим компаниям, снабжающим городок Линден, и не хочет продавать эти устройства в Швейцарии и на рынке. В настоящее время ею построены несколько

различных установок на мощность 100 Вт, 300 Вт, 3 кВт и 10 кВт, которые используются общиной для своего производства.

Первые сведения о том, как устроены установки, появились в Австрии в 1989 году. Их описание можно найти в книге профессора Стефана Маринова [1]. Исследования маломощных устройств, проведённые профессором (ему поручила это сделать община), настолько его изумили, что он стал сомневаться в фундаментальности любых законов сохранения, известных в физике.

Эти сомнения удивляют, поскольку в природе существуют множество физических систем, в которых закон сохранения энергии выполняется достаточно точно (возьмите хотя бы небесную механику). Но это совсем не означает, что в природе не существует систем, в которых законы сохранения не выполняются. Таких систем существует достаточно много, особенно с диссипацией. Наличие диссипации не позволило человечеству построить вечный двигатель, использующий механическое движение.

Новая электромеханическая физическая система соединяет в себе одновременно вращающийся мотор и генератор, разъединяющий заряды. Пока диск крутится, она непрерывно выделяет энергию, то есть система имеет положительный энергетический инкремент. Вырабатываемой избыточной энергии за период движения системы оказывается достаточным, чтобы перекрыть все диссипативные потери, существующие в установке за тот же период.

К сожалению, ни сами изобретатели, ни профессор Маринов не смогли дать убедительного объяснения цепочке физических явлений, происходящих в Тестатике. Насколько нам известно, подобную установку не удалось пока повторить никому, не смотря на то, что её подробные цветные чертежи выложены в Интернет российской лабораторией *Faradey-Lab* уже на протяжении последних 15 лет. В монографии [2,3] можно найти дополнительные технические подробности и некоторые идеипо реализации установки Тестатика, основанные на унитарной квантовой теории осциллирующего заряда.

Но, такая ли она новая электромеханическая система, предложенная в Швейцарии? Как видно из чертежа установки [1], её основной узел представляет собой колебательный контур, в котором в качестве электроёмкости используются неподвижные П-образные пластины

конденсатора. Внутри пластин П-образного конденсатора вращается один или два акрилловых диска, с набором радиально наклеенных на них из тонкой фольги проводящих секторов (см. фиг. 11 на с. 28 в [1]). Вращение диска с проводящими секторами периодически изменяет электрическую ёмкость П-образного конденсатора в определённых пределах. Изменение ёмкости П-образного конденсатора и приводило к увеличению избыточной энергии в Тестатике.

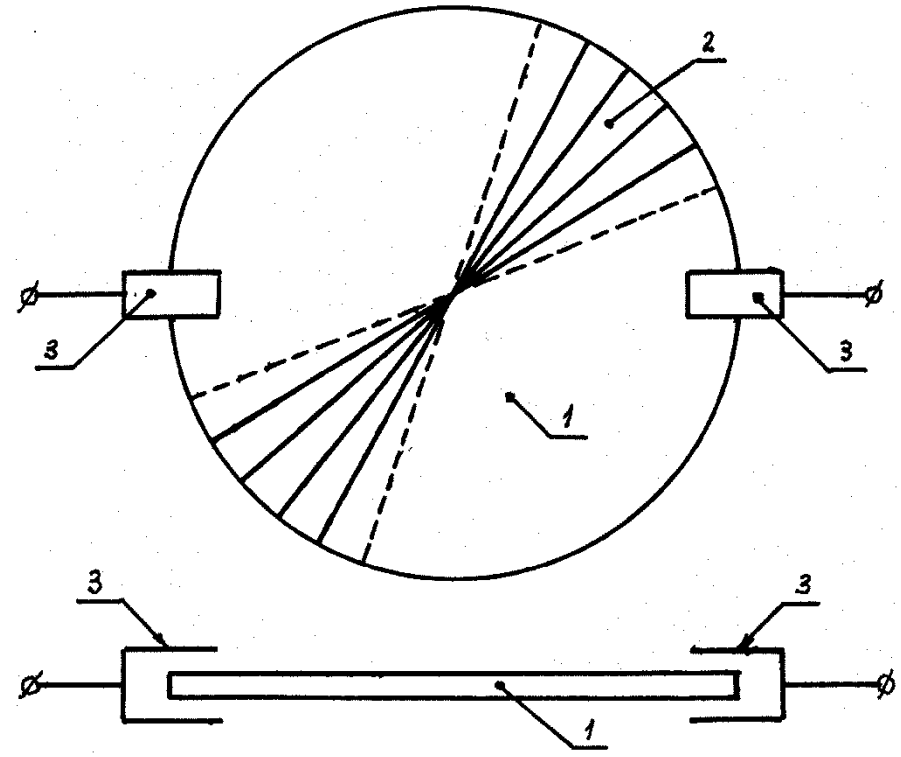



Рис. 1 - Фрагмент машины «Тестатика»

На рис. 1 представлен схематично фрагмент акриллового диска с П-образным конденсатором. На рис. 1 помечены: 1 – акрилловый диск с накленными на него проводящими секторами, 2 – один проводящий сектор (электрическая стрелка), 3 – пластины П-образного конденсатора. Верхняя часть рисунка – вид фрагмента спереди, а нижняя – вид сверху.

Физические свойства такой системы впервые исследовали в 30-х годах прошлого века в России Мандельштам и Папалекси [4]. Первые свои опыты они проводили на колебательных контурах, в которых применялся воздушный конденсатор. У него одна из обкладок была неподвижна, а вторая вращалась с постоянной угловой скоростью электродвигателем, частоту вращения которого можно было изменять.

Что же они обнаружили? Механическое вращение одной из пластин конденсатора всегда приводило к тому, что на обкладках конденсатора накапливался электрический заряд до тех пор, пока воздушный конденсатор не пробивался. На лицо тот же эффект, что и в Тестатике и электрофорной машине. ***Они обнаружили прямое преобразование механической энергии в электрическую энергию с положительным энергетическим инкрементом.***

Но попробуйте объяснить, что же происходит с энергией периодически изменяющейся емкости, включённой в колебательный контур, находящийся под постоянным напряжением? Почему она нарастает? И нет ли случаев, когда нарастания энергии на ёмкости не происходит?

Современный физик-теоретик, прекрасно владеющий знаниями фундаментальных законов электростатики, объяснит, что никакого дополнительного выделения энергии в таком колебательном контуре быть не может. Причина этого в том, что все статические заряды, накопленные на обкладках конденсатора, неподвижны, а при вращении движутся по замкнутым траекториям. Все распределённые заряды, накопленные подвижной пластиной конденсатора, можно представить как атмосферу, состоящую из неподвижных относительно пластины точечных зарядов. Движение точечного заряда в неоднородном электростатическом поле по одному и тому же замкнутому контуру не изменяет его энергии за полный оборот и никакой работы не совершает. (теорема о циркуляции напряженности статического электрического поля). Теоретик абсолютно прав. Но эксперимент указывает на нечто неожиданное: ***механическое вращение в рассмотренной системе может быть преобразовано в электрическую энергию, которая затем накапливается до пробоя конденсатора.*** Тогда теоретик, не знающий как объяснить эксперимент, объявляет всё происходящее лженаукой.

Может быть, мы чего-нибудь в этой ситуации не знаем или не понимаем? Может быть, объясняя эти эксперименты, нельзя применять фундаментальные теоремы, справедливые для электростатических полей?

Мандельштам и Папалекси так же не нашли удовлетворительного объяснения возникающему нарастанию энергии, закопали непонятное в термин «параметрический резонанс» и предложилиновое научное

направление по созданию параметрических генераторов переменного тока, которые в настоящее время реализованы в радиотехнике и СВЧ - технике. ***А направление исследований, интереснейшее для будущей энергетики, осталось незамеченным.***

Последние 30 лет в физических лабораториях многих стран проводились эксперименты по протеканию мощных, коротких электрических импульсов в различных проводящих средах (см., например [5-6]). Были зафиксированы светящиеся объекты, локализованные в пространстве и имеющие размеры от миллиметров до сантиметров. Время высвечивания объекта увеличивалось с увеличением его объёма.

Исследователи отмечали возникающие внутри объекта макроскопическое разделение зарядов, удерживаемое в ограниченной области пространства самосогласованным электрическим полем. Экспериментально выяснено, что он может пребывать в трёх различных состояниях электризации: электронейтральном, положительно заряженном и отрицательно заряженном. Перечисленные свойства объекта позволяют его отнести к классу плазмоидов и микроплазмоидов.

Впервые временной процесс формирования цепочки плазмоидов (чёточная молния), при наличии внешнего постоянного тока, был предложен в [7]. Построенная в [7] математическая модель была нами упрощена на случай отсутствия внешнего тока и исследовано явление протекания плазменной неустойчивости при формировании одиночных плазмоидов.

Исследование статических решений модели указывает на возможность существования трёх видов плазмоидов в двухкомпонентной плазме: электронейтрального, заряженного положительно (электронный кластер в дырочной плазме), либо заряженного отрицательно (электронный кластер в электронной плазме), что совпадает с наблюдениями.

Нестатические решения модели указывают на следующую временную последовательность формирования плазмоида при развитии электрической неустойчивости. В некоторый момент времени в атмосфере возникает ограниченная в пространстве область с электронейтральной плазмой. Затем в плазме быстро развивается электрическая неустойчивость, которая в конечном счёте формирует одиночный либо положительный, либо

отрицательный плазмоид. Заряды плазмоида удерживаются в пространстве самосогласованным полем.

Накопленная плазмоидом электрическая энергия высвечивается в атмосферу и он как объект перестаёт существовать. Для того, чтобы отобрать электрическую энергию, накопленную плазмоидом до высвечивания, его нужно создавать искусственно внутри пластин П-образного конденсатора так, как это сделано в Тестатике.

Каждый проводящий сектор, наклеенный радиально на круг, представляет собой электрическую стрелку (см. рис. 1). Она отличается от магнитной тем, что в свободном состоянии указывает направление напряжённости внешнего электрического поля и при высоких напряжённостях внешнего поля имеет достаточно большой электрический дипольный момент. Чем больше длина стрелки и чем больше напряжённость внешнего поля, тем больше дипольный момент электрической стрелки.

Когда стрелка попадает во внешнее электрическое поле, то на её концах искусственно образуются плазмоиды. Положительно заряженный плазмоид будет находится на «северном» конце стрелки, а отрицательно заряженный плазмоид – на «южном» конце стрелки. Заряды, накопленные пластинами П-образного конденсатора по знаку обычно противоположны зарядам стрелки, но в какие-то моменты могут и совпадать.

Расположение электрической стрелки под углом к оси П-образного конденсатора сразу создаёт момент электрических сил, который стремится притянуть концы стрелки к электродам и вернуть стрелку в положение равновесия. Поворот стрелки на такой же угол в другую сторону создаёт такой же момент сил, но другого направления. Для того, чтобы понять, как этот момент сил создаёт вращение диска с проводящими секторами в одну сторону, необходимо учесть следующее исключительно важное обстоятельство.

В Тестатике взаимодействие зарядов искусственного плазмоида с зарядами П-образного конденсатора не описывается кулоновским взаимодействием. Как известно, математическая модель кулоновского взаимодействия построена только для точечных зарядов, которые в природе не реализуются, и не применима для распределённых зарядов.

Мы утверждаем, что на каждый элемент объёма протяжённого одноимённо заряженного тела, находящееся во внешнем неоднородном электрическом поле действуют две объёмные силы. Первая электрическая $\vec{f}_1 = \rho\vec{E}$, которая должна быть просуммирована по всем зарядам плазмоида стрелки, а вторая, связанная с градиентом давления поля, которая пропорциональна $\vec{f}_2 = \vec{E}div\vec{E}/4\pi$ и действует на локальное расположение плотности масс зарядов плазмоида [8].

Бисиловое взаимодействие протяжённых заряженных тел обладает асимметрией. Закон зависимости силы взаимодействия двух одноимённо заряженных тел от расстояния – один, а тех же разноимённо заряженных тел – другой.Это происходит по причине различных направлений действия сил: электрической и градиентной.

Поэтому, когда конец электрической стрелки приближается к пластине П-образного конденсатора,её заряды притягиваются к пластине. Атмосфера зарядов на конце стрелки в каждый следующий момент времени изменяет свою форму и структуру. Самосогласованные электрические поля системы зависят от времени и совершают положительную работу над стрелкой.

Подходя близко к пластине конденсатора, стрелка разряжается через наименьшее расстояние газового промежутка и изменяет знаки зарядов на своих концах. Сразу же изменяется и сила взаимодействия концов стрелки с пластинами конденсатора. Она скачком увеличивается и становится отталкивающей. Момент электрической силы не изменяет своего направления в пространстве и продолжает вращать колесо с проводящими секторами в ту же сторону, снова совершая положительную работу. Микроразряды приводят к появлению сухого потрескивания и образованию озона, что и наблюдается в Тестатике.

Так работает мотор Тестатики. На этом принципе возможно создание разнообразных роторных двигателей и микродвигателей постоянного и переменного тока нового поколения.

Если разряда стрелки на пластины П-образного конденсатора не происходит, то момент электрической силы изменяет своё направление в пространстве и начнёт возвращать стрелку в положение равновесия. В этом случае будет реализовано финитное по углу движение стрелки.

Как работает генератор Тестатики, становится ясным из приведённых выше рассуждений. В момент разряда электрической стрелки на пластины

конденсатора её дипольный электрический момент за миллисекунды изменяет своё направление на противоположное. Изменение дипольного момента всегда приведёт к изменению вектора электрической индукции в этом же пространстве. А это, в свою очередь, породит вектор плотности тока смещения Максвелла, который пропорционален скорости изменения электрической индукции $\vec{j}_{см} = \partial\vec{D} / \partial t$.

Поскольку П-образный конденсатор находится в контуре и замкнут на индуктивность, то короткий импульс тока смещения Максвелла вызовет в индуктивности короткий импульс такого же тока проводимости. Последовательность проводящих секторов, движущихся периодически в пластинах П-образного конденсатора, на фоне постоянного тока будет вырабатывать переменный импульсный ток. Он будет периодически поставлять избыточную энергию в систему. На втором принципе работы Тестатики возможно построение электромеханических генераторов переменного тока нового поколения.

Избыточной энергии, поставляемой генератором, будет достаточно как для создания высокого напряжения на пластинах П-образного конденсатора, так и для компенсации диссипативных потерь системы. Все остальные электрические элементы, применяемые в Тестатике, следует отнести к её накопительной части. В различных установках они могут быть различны.

Инновационное направление энергетики двойного назначения, использующее для производства энергии переменные электрические поля плазменной неустойчивости, является мощной альтернативой способу производства электроэнергии на эффекте электромагнитной индукции Фарадея. Причина этого в том, что такая энергетика использует физические свойства электрического поля, которое оказывается первичным по отношению к полю магнитному.

***Изложенная концепция избыточной энергетики плазменной неустойчивости имеет несомненные преимущества: простота, экологическая безвредность, мобильность, дешевизна, автономность, компактность, широкий диапазон выходных мощностей, получаемых из «ничего».*** Онане «требует» человеческихжертв.

**Списоклитературы**

1. MarinovS. “THETHORNYWAYOFTRUTH”. Part V, Documents on the violation of the laws of conservation. TESLA INSTITUT, Austria, A-1180 Wien, Postfach 100, 1989, p. 35.

2.Sapogin Leo, Ryabov Yuri and Boichenko Victor. Unitary Quantum Theory and a new source of energy. Archer Enterprises, 2938 Ferguson Crs. Rd. Geneva, NY 14456, p.278.

3. Сапогин Л.Г., Рябов Ю.А., Бойченко В.А. Унитарная квантовая теория и новые источники энергии. Перевод с англ. Л.Г.Сапогина/под ред. Ю.И.Сазонова. – М.: «САЙНС-ПРЕСС», 2008. – 280 с.

4. Папалекси Н.Д. Собрание научных трудов. Под редакцией профессора С.М. Рытова. Издание Академии Наук СССР. 1948 г.

5. GolubnichiyP.I., GromenkoV.M. etal. “The Investigation of the Mechanism of Energy Accumulation in Long-Living Lightning Objects, Found after a Powerful Impulse Energy Release in Water”, Cold Fusion Source Book. ISCF a. AES. 1994. Minsk. PP. 221–225; “Long-Living Lightning Objects Iside the Pulsating Cavern, Initiated by the Powerful Energy Emission in Water.” Dokl. An SSSR. 1990. V. 311. No. 2. PP. 356–360; “Formation of Long-Living Lightning Objects after the Collaps of Dens Low Temperature Water Plasma.” Zhurnal Techn. Fiziki. 1990. V.60. No. 1. PP. 183–186; “Fomation and Dinamics of Long-Living Lightning Objects – Lightning Ball, Summary Report”. Moscow: Inst. Vysokih Temp. 1991. No. 2. PP. 73–75; “Dinamics of Long-Living Lightning Objects Throw-out, Initiated by the Powerful Spark Energy Emission in Water. High velocity photography, photonics and metrology of fast-occuring processes. Summary of Reports at the 15th All–Union conference.” 1991. Moscow: VNIIOFI. P.113.

6. Шабанов Г.Д. Оптические свойства долгоживущих светящихся образований// Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. №. 4. С. 81.; Шабанов Г.Д., Соколовский Б.Ю. Макроскопическое разделение зарядов в импульсном электрическом разряде. //Физика плазмы. 2005. Т. 31. №6. С. 560-566.

7. Пустовойт В.И. О механизме возникновения молнии. //Радиотехника и электроника.– 2006. –Т. 51, №8. – С. 996 – 1002.

8. Сапогин В.Г. Механизмы удержания вещества самосогласованным полем. Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. С. 254.

**Автоматизированная установка для исследования температурных характеристик пьезоэлектрических материалов и устройств**

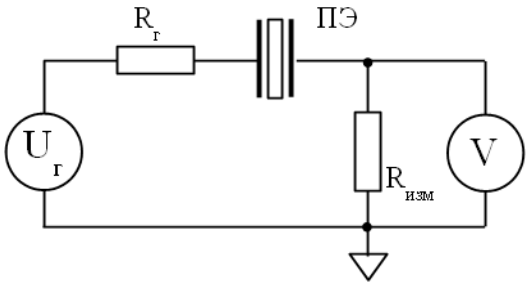
***Д.А. Бурдин, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов***

*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва, Россия*

**Введение**

При разработке новых устройств на основе пьезоэлектрических материалов необходимо исследовать их температурные характеристикив широком диапазоне температур. Используемые в настоящее время установки для температурных измерений при работе в области отрицательных температур (до 273К) используют специальные методы для борьбы с образованием конденсата [1,2]. В настоящей работе описана автоматизированная установка для исследования температурных зависимостей свойств пьезоэлектрических материалов в которой использован метод обдува образца газообразным азотом, что позволило проводить измерения в диапазоне температур 140 К – 400 К.

**Метод исследования упругих свойств пьезоэлектрических материалов**




$R_г$ — сопротивление генератора;
$R_{изм}$ — сопротивление нагрузки;
$U_г$ — напряжение генератора сигналов;
V — вольтметр;
ПЭ — пьезоэлектрический резонатор

Рис. 1 - Схема измерения упругих характеристик пьезо-материалов

Для исследования упругих свойств пьезоэлектрических материалов был использован метод последовательного резонанса. Образец пьезоэлектрика в виде диска или пластины с нанесёнными электродами включался последовательно с сопротивлением по схеме, изображенной на

рис. 1. На вход схемы подавалось переменное напряжение от генератора Agilent 33210a. Изменяя частоту сигнала и измеряя напряжение $u_г$ на резисторе $R_{изм}$ вольтметромАКИП-2401, получаем зависимость напряжения от частоты. На зависимости наблюдаются пики, соответствующие резонансным колебаниям образца. По частоте и форме пика можно рассчитать добротность и найти модуль Юнга материала. В частности, добротность $Q$ определяется по формуле:

$$Q = \frac{f_р}{\Delta f}, \quad (1)$$

где $f_р$ - резонансная частота,$\Delta f$ - ширина резонансного пика по уровню 0.7. Модуль Юнга находится по резонансной частоте. Частота продольных колебаний прямоугольной пластины равна:

$$f_n = \frac{n v_p}{2l} = \left(\frac{n}{2l}\right)\sqrt{\frac{Y}{\rho}}, \quad (2)$$

где для второй моды n =2,$l$ – длина пластины, $Y$ – модуль Юнга, ρ – плотность.

Отсюда получаем выражение для расчета модуля Юнга материала

$$Y = 4 f_n^2 l^2 \rho / n^2. \quad (3)$$

**Система регулировки температуры образца**

Для задания температуры исследуемого образца был применён метод обдува образца потоком газообразного азота с регулируемой температурой. Блок-схема установки приведена на рис. 2. С помощью испарителя, находящегося внутри сосуда Дьюара, жидкий азот испаряется и по газоводной трубке через дополнительный резистивный нагреватель «РН» подаётся в термоячейку. Специальный термоконтроллер «ТК» осуществляет регулирование температуры азота внутри ячейки, управляя мощностью на испарителе и нагревателе и измеряя температуру с помощью датчика температуры «ДТ», установленного внутри термоячейки в непосредственной близости от исследуемого образца «ИО».

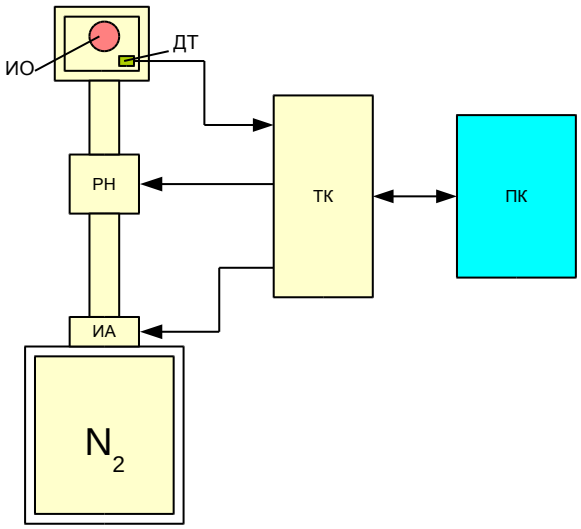



Рис. 2 -Блок-схема температурной установки

В ходе измерений с помощью персонального компьютера “ПК» последовательно регистрируются серии амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в области акустического резонанса при разных значениях температуры $T$ в ячейке. На основе этих данных затем строятся зависимости резонансного напряжения $u_r$, резонансной частоты $f_r$ и добротности $Q$от температуры. На рис. 3 в качестве примера представлена серия АЧХ для кольцевого резонатора из керамики ЦТС-19, измеренных при температурах от 240 К до 400 К.

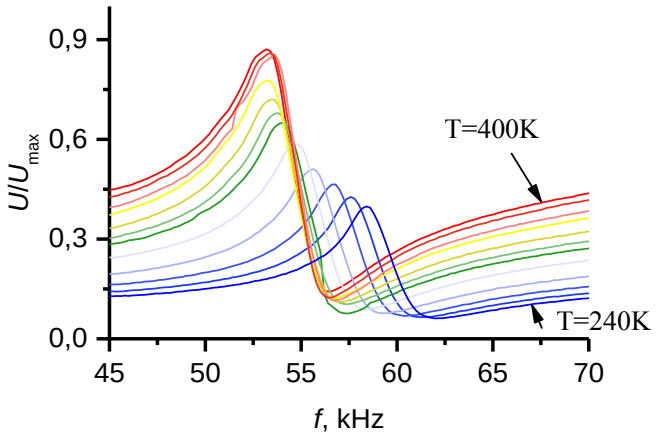



Рис. 3 Измеренные АЧХ пьезокерамического кольца при различных температурах.

**Заключение**

Таким образом, созданная установка позволяет автоматизировать измерение температурных зависимостей упругих параметров пьезоэлектрических материалов в диапазоне от 140 К до 400 К. При использовании данной установки в сочетании с дополнительными приборами и магнитной системой можно исследовать также температурные зависимости упругих параметров ферромагнитных материалов и характеристики магнитоэлектрических эффектов в композитных структурах, содержащих пьезоэлектрические и ферромагнитные слои [1].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект RFMEFI58314X0009.

**Список литературы**

1. Д.А. Бурдин, Ю.К.Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов // Журнал технической физики, 2013, т. 83, вып. 3, с. 107-112.

## Статическая деформация активного элемента в переменном управляющем поле

***Д.А. Бурдин, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Н.А. Экономов***

*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, 119454, г. Москва, Россия*

В настоящее время в приборостроении все более широко применяются «активные» пьезоэлектрические и магнитострикционные материалы, у которых деформация четным образом зависит от направления приложенного электрического (например, PMN-PT) или магнитного (все ферромагнетики) поля. Это приводит, как будет показано ниже, к возникновению в таких материалах статической деформации под действием переменного поля, что необходимо учитывать при проектировании датчиков и актюаторов на основе активных материалов. В данной работе эффект исследован на примере ферромагнитных (ФМ) материалов.

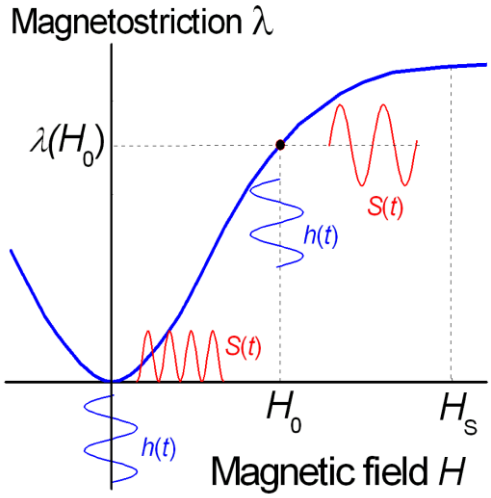



Рис. 1 - Зависимость деформации ферромагнетика λ от поля $H$

Качественно эффект объясняется следующим образом. На рис.1 приведена типичная зависимость деформации ФМ образца $S(H) = \lambda(H) = \Delta l / l$ вдоль направления приложенного постоянного магнитного поля от его величины $H$. Видно, что магнитострикциянасыщается на уровне $\lambda_S$ в области полей $H>H_S$ и деформация сохраняет знак при обращении $H$. Характер деформации ФМ образца под действием переменного поля $h(t)$ с частотой $f$ зависит от поля $H_0$. В поле $H_0$ при маломh<<$H_0$ в образце, помимо статической деформации $\lambda(H_0)$, возникает дополнительная периодическая деформация $S(t)$ с частотой $f$. Если же поле смещения $H_0$=0, то под действием $h(t)$ в образце генерируется периодическая однополярная деформация $S(t)$ с удвоенной частотой $2f$. Эту деформацию можно представить в виде суммы статической деформации$S_0$, и периодической деформации с удвоенной частотой $2f$. Отсюда следует, что под действиемпеременного поля нелинейность магнитострикции приводит к появлению в ФМ образце дополнительной статической деформации.

Простая теория позволяет описать эффект количественно. Рассмотрим ФМ образец в форме стержня или пластины, помещенный в продольное переменное магнитное поле $H(t) = H_0 + h(t)$, $h<<H_0$. Разложим магнитострикцию в ряд Тейлора вблизи точки $H_0$:

$$\lambda(H) = \lambda(H_0) + qh + (1/2)ph^2 + \ldots \qquad (1)$$

Здесь $q = (\partial\lambda / \partial H)\big|_{H_0}$ и $p = (\partial^2\lambda / \partial H^2)\big|_{H_0}$ -«пьезомагнитный коэффициент» и «нелинейный пьезомагнитный коэффициент», соответственно.Подставляя поле вида $h(t) = h\cos(2\pi ft)$ в (1),после перегруппировки членов получаем деформацию:

$$S = \lambda(H_0) + (1/4)ph^2 + qh\cos(2\pi ft) + (1/4)ph^2\cos(4\pi ft)\ .(2)$$

Первое слагаемое в (2) описывает статическую деформацию ФМ в постоянном поле, оно обращается в нуль при $H_0$=0. Второе слагаемое в (2) $S_0 = (1/4)ph^2$ описывает дополнительную статическую деформацию ФМ образца, возникающую из-за переменного поля. Третье и четвертое слагаемые в (2) соответствуют динамическим эффектам с частотами *f*и 2*f*, соответственно. Далее их рассматривать не будем. Из (2) видно, что статическая деформация $S_0$ ФМ образца в переменном поле пропорциональна коэффициенту *p* и квадрату амплитуды поля $h^2$. Как следует из рис.1,*p* зависит от $H_0$, поэтому величина $S_0$ также должна зависеть от поля смещения.

В экспериментах использовали образцы из ферромагнитных материалов, существенно отличающихся величиной, знаком и полями насыщения магнитострикции:пластину из пермендюра ($Fe_{0.49}Co_{0.49}V_{0.02}$-FeCo) размерами 20x10x0.4 мм$^3$; пластину из никеля (Ni) размерами 20x10x0.4 мм$^3$ и пленку из аморфного сплава FeBSi (Metglas 2605S3A) размерами 20x10x0.025 мм$^3$. Образцы помещали между полюсами магнита в касательное постоянное поле $H_0$величиной до 3 кЭ и переменное поле $h\cos(2\pi ft)$ с амплитудой до 400 Э и частотой $f$ =50 Гц, созданное катушками Гельмгольца. Статическую деформацию образцов в направлении $H_0$измеряли с помощью тензодатчиков, наклеенных на поверхность образцов.

На рис. 2 показаны зависимости статической деформации образцов от поля $H_0$, измеренные в отсутствие переменного поля ($h$= 0). Рис. 3 демонстрирует влияние поля с амплитудой $h$ = 140 Э, на полевую зависимость статической деформации для образца из FeCo. Без поля смещения ($H_0$=0) образец растягивается, при $H_0$≈250 Э переменное поле не влияет на деформацию образца, в полях $H_0$>250 Э образец дополнительно сжимается под действием поля*h*. В полях $H_0$>$H_S$, поле *h* опять не влияет на

деформацию образца. Аналогичные зависимости были получены и для образцов из никеля и аморфного сплава FeBSi.

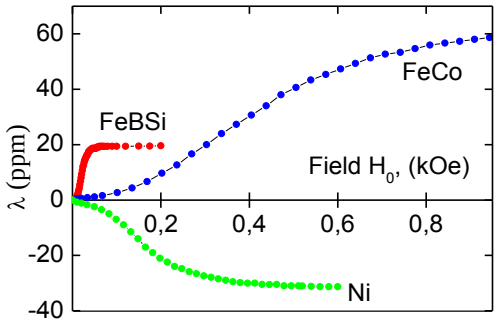



Рис. 2 - Зависимость магнитострикции FeCo, Ni и аморфного сплава от поля $H_0$.

Результаты измерений при разных$h$, аналогичные показанным на рис. 3, позволили получить зависимости статической деформации$S_0$, созданной переменным полем, от величины поля$h$для всех указанных выше образцов.

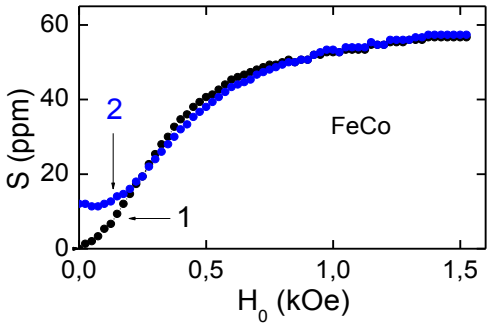



Рис. 3 - Зависимость статической деформация FeCo от $H_0$ при $h$= 0 (1) и 140 Э (2)

Измеренный кривые приведены на рис. 4. Видно, что зависимости линейны с тенденцией к насыщению с увеличением $h$. Согласно (2), при малых $h$ зависимости должна быть квадратичными, однако точность наших измерений не позволила это подтвердить. В области больших $h$ формула (2) не применима, а нелинейность зависимости $\lambda(H)$, как следует из формы кривой на рис.1, должна приводить к насыщению зависимости $S_0(h)$, что наблюдали в эксперименте. Максимальная величина индуцированной

переменным полем статической деформации $S_0$велика и для исследованных материалов достигала ~60% от магнитострикции насыщения.

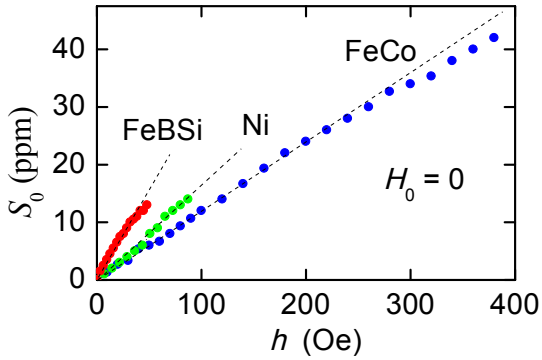



Рис. 4 - Зависимости деформации $S_0$, индуцированной переменным полем в образцах от поля $h$. Штриховые линии – линейная аппроксимация.

На рис.5 приведена зависимость статической деформации$S_0$, созданной переменным полем в FeCo, от поля смещения $H_0$. Зависимостьполучена путем вычитания кривых$S_0(H_0) = S(h, H_0) – S(h= 0, H_0)$. Для сравнения на рисунке сплошной линией изображена полевыя зависимость нелинейного пьезомагнитного коэффициента$p(H_0)$, рассчитанная численно с использованием данных рис.2. Видно, что формы зависимостей $S_0(H_0)$ и$p(H_0)$ и поля смещения, при которых деформации и коэффициенты меняют знак, хорошо согласуется, что подтверждает справедливость изложенного ранее объяснения эффекта.

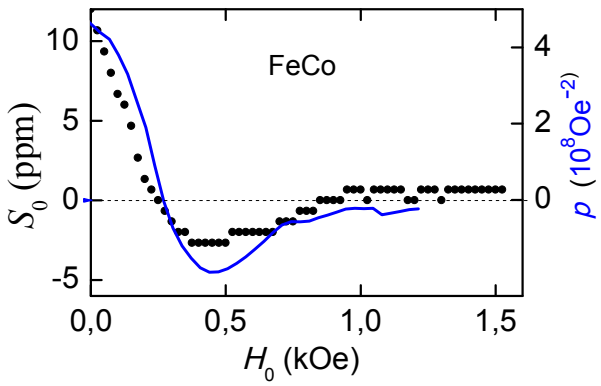



Рис. 5 - Зависимость деформации FeCo, вызванной полем$h$ = 140 Э, от поля $H_0$.

Таким образом, в работе обнаружен и исследован эффект статической деформации ферромагнетика под действием переменного магнитного поля, обусловленный нелинейностью магнитострикции. Показано, что величина деформации пропорциональна второй производной от магнитострикции по полю, зависит от поля смещения и линейно растет с увеличением амплитуды переменного поля.В материалах с сильно отличающимися параметрами (сплав FeCo,Niи аморфный сплав FeBSi) величина индуцированной переменным полем деформации сравнима с магнитострикцией насыщения. Аналогичный эффект статической деформации под действием переменного электрического поля может наблюдаться и в пьезоэлектрических материалах, у которых знак деформации не зависит от направления поля.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по госзаданию, проект № 76.

## Бесконтактный магнитоэлектрический датчик тока

***Д.В. Чашин, Л.Ю. Фетисов***

*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва, Россия*

Повсеместное использование различного энергооборудования и электроприборов привело к бурному развитию электроэнергетики. Огромную важность приобрели вопросы повышения безопасности функционирования и эффективности энергопотребления, которые практически невозможно решить без использования различных датчиков тока и напряжения. Датчики необходимы для отслеживания величины потребляемого тока, диагностики различных аварийных режимов типа короткого замыкания, перегрузки, выхода параметров тока за допустимые пределы.

Для бесконтактного измерения токов в настоящее время наиболее широко применяются датчики, использующие эффект Холла [1,2]. Однако по ряду параметров такие датчики уже не удовлетворяют растущим техническим требованиям для новых применений в автомобильной промышленности, двигателестроении, альтернативной энергетика и т.д. В частности, необходимы датчики для токов много меньших 1 А,

работающие в широком температурном диапазоне. Все это стимулирует разработку бесконтактных датчиков тока на новых физических принципах.

В настоящей работе создан и исследован бесконтактный датчик тока, использующий магнитоэлектрический (МЭ) эффект в композитной структуре ферромагнетик-пьезоэлектрик [3,4]. Предлагаемый датчик измеряет постоянное магнитное поле, создаваемое проводом с текущим по нему постоянным током и по величине поля определяет силу тока.

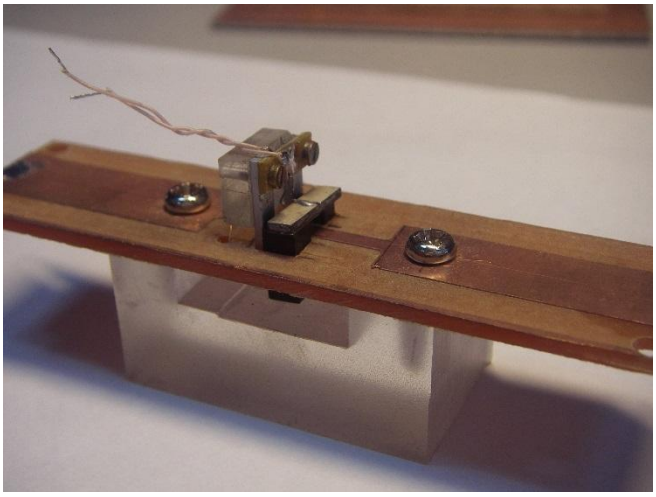


Рис. 1 - Внешний вид макета бесконтактного МЭ датчика тока с токовой шиной

Фотография макета датчика изображена на рис.1 Основным элементом датчика является двухслойная композитная структура, содержащая механически связанные друг с другом ферромагнитный и пьезоэлектрический слои. В качестве пьезоэлектрика использовали пьезокерамическую пластину ЦБТС-8 толщиной 1 мм. В качестве магнитного слоя использовали аморфную ферромагнитную ленту (FeSiCB) толщиной 23 мкм. Размеры структуры в плоскости равнялись 10мм × 3мм. Слои были соединены при помощи клея на основе цианакрилата. Структура была помещена в зазор П-образного магнитопровода, изготовленного из феррита марки М2000НМ, с намотанными на нее возбуждающей и компенсационной катушками. Магнитопровод обеспечивал концентрацию измеряемого постоянного магнитного поля в области расположения композитной структуры. Зазор между магнитоэлектрической структурой и магнитопроводом составлял 0,05 мм. Для повышения чувствительности измерения проводили на частоте резонанса продольных акустических колебаний структуры. Частота

резонанса определяется размерами структуры, модулями упругости и плотностями материалов. Для данной структуры частота составляла $f \sim 125$ кГц. Измеряемый ток пропускали через токовую шину в видемедной полоски толщиной 35 мкм и шириной 1,5 мм, сформированной на плате из фольгированного гетинакса.

Блок-схема МЭ бесконтактного датчика тока приведена на рис. 2. На рисунке изображены :токовая шина 1, магнитопровод 2, возбуждающая катушка 3, измерительная катушка 4, композитная структура 5 и блоки возбуждения датчика и регистрации сигнала. Датчик работает следующим образом. Магнитное поле, создаваемое постоянным током, проходящим через токовую шину 1, концентрируется в магнитопроводе и МЭ структуре. На обмотку возбуждения 3 от генератора (Гн) подается переменное напряжение с частотой механического резонанса МЭ элемента. В результате взаимодействия постоянного и переменного магнитных полей пьезоэлектрический слой структуры генерирует переменное напряжение, которое усиливается дифференциальным усилителем (ДУ) и поступает на прецизионный выпрямитель (ПВ).

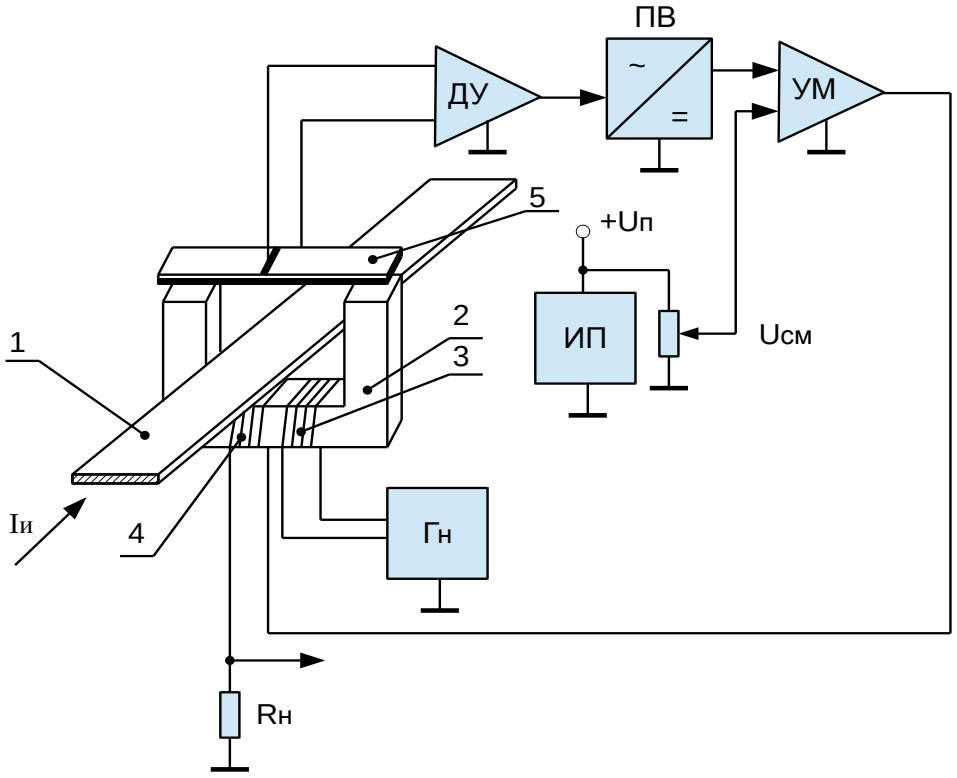



Рис. 2 - Блок-схема бесконтактного МЭ датчика тока

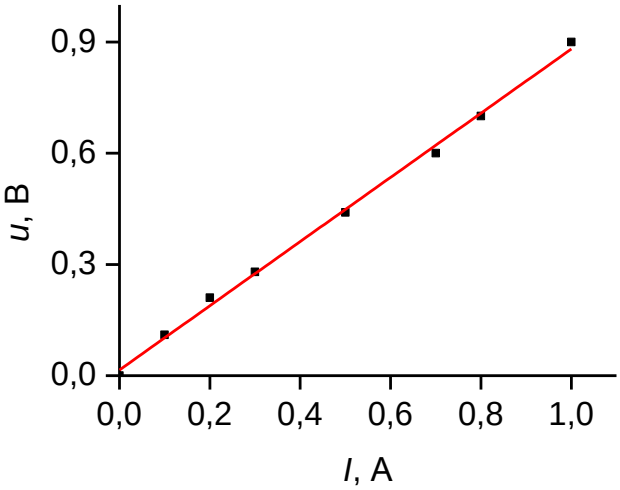



Рис. 3 - Зависимость выходного напряжения *u* от силы тока *I*

Затем полученное постоянное напряжение поступает на усилитель мощности (УМ). Также на него поступает напряжение смещения, которое устанавливает нулевую рабочую точку. При наличии в шине измеряемого тока сигнал с усилителя мощности подается на компенсационную обмотку и затем на сопротивление нагрузки (Rн). Причем напряжение на этом сопротивлении пропорционально величине измеряемого тока.

На рис. 3 приведена измеренная зависимость действующего напряжения *u* от амплитуды измеряемого тока *I* в проводнике. Видно, что в указанном диапазоне токов зависимость имеет линейный вид. Наклон прямой линии соответствует чувствительности МЭ датчика тока u/*I* = 1 В/А. Согласно оценкам, минимальная амплитуда тока, регистрируемого таким датчиком составляла ~ 5 мА. Динамический диапазон датчика составлял почти три порядка.

Таким образом, в работе изготовлен и исследовании бесконтактный датчик тока, использующий резонансный МЭ эффект в композитной структуре. Датчик имеет чувствительность 1 В/А в диапазоне токов от единиц мА до 1 А. Характеристики Характеристика предложенного датчика можно существенно улучшить за счет оптимизации конструкции и использования МЭ структур с большим по величине МЭ эффектом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образовании и науки РФ, проект RFMEFI158314X009.

**Список литературы**

1. Э. Ланге. Датчики тока компенсационного типа // Силовая электроника. – 2014. - № 3. – С. 42.
2. http://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf.
3. J.F. Scott Applications of magnetoelectrics // Journal of materials Chemistry. – 2012. – V. – 22. – P. 4567 – 4574.
4. И.Н. Соловьев, М.И. Бичурин Низкочастотный магнитоэлектрический датчик тока // Вестник Новгородского государственного университета. – 2013. – Т. 1. - № 75.- С. 35 - 36.

## Способ контроля работоспособности трехкомпонентного вибропреобразователя

***А.В. Орлов, В.Я. Смирнов***

*ЗАО «Вибро-прибор», г. Санкт-Петербург, Россия*

Необходимость повышения надежности работы машин и механизмов, увеличения ресурса безотказной работы, снижения затрат на ремонт оборудования и т.д. требует уделять значительно большее внимание вопросам встроенного контроля работоспособности средств измерений самого различного назначения. Средства измерений (СИ) параметров вибраций (ПВ) не являются исключением. При этом наблюдается два основных направления контроля работоспособности СИ ПВ: дублирование вибропреобразователей (ВИП) [1] и применение свойства обратимости (например, электрическое возбуждение пьезокерамики у пьезоэлектрических ВИП) [2].При использовании однокомпонентных ВИП такие подходы не влекут за собой существенного увеличения массогабаритных показателей измерительной аппаратуры.Однако применение трехкомпонентных ВИП (даже малогабаритных пьезоэлектрических), позволяющих измерить пространственную вибрацию, с одной стороны, существенно ограничивает использование свойства обратимости (электрического возбуждения), т.к. наблюдается взаимное влияние каналов, а с другой – применение дублирования увеличивает массу средств измерений, что может оказать влияние на параметры вибрации работающего механизма. Надо добавить, что существенно увеличивается и стоимость измерительной аппаратуры.

Чтобы избежать указанных недостатков при использовании трехкомпонентных пьезоэлектрических ВИП с системой контроляработоспособности разработан трехкомпонентный пьезоэлектрический ВИП, измеряющийпроекции вектора виброускорения в трех ортогональных направлениях, с дополнительным встроенным четвертым однокомпонентным ВИПось чувствительности которого находится под фиксированными углами к первым трем ВИП (все четыре однокомпонентных ВИП расположены в одном корпусе).

Модульная система позволяет снизить затраты на его изготовление, а применение четвертого ВИП позволяет в процессе эксплуатации контролировать работоспособность трех ортогональных каналов. На рис. 1 представлена система координат, связанная с осями чувствительности ВИП, и соответствующие углы между направлениями отдельных осей чувствительности.

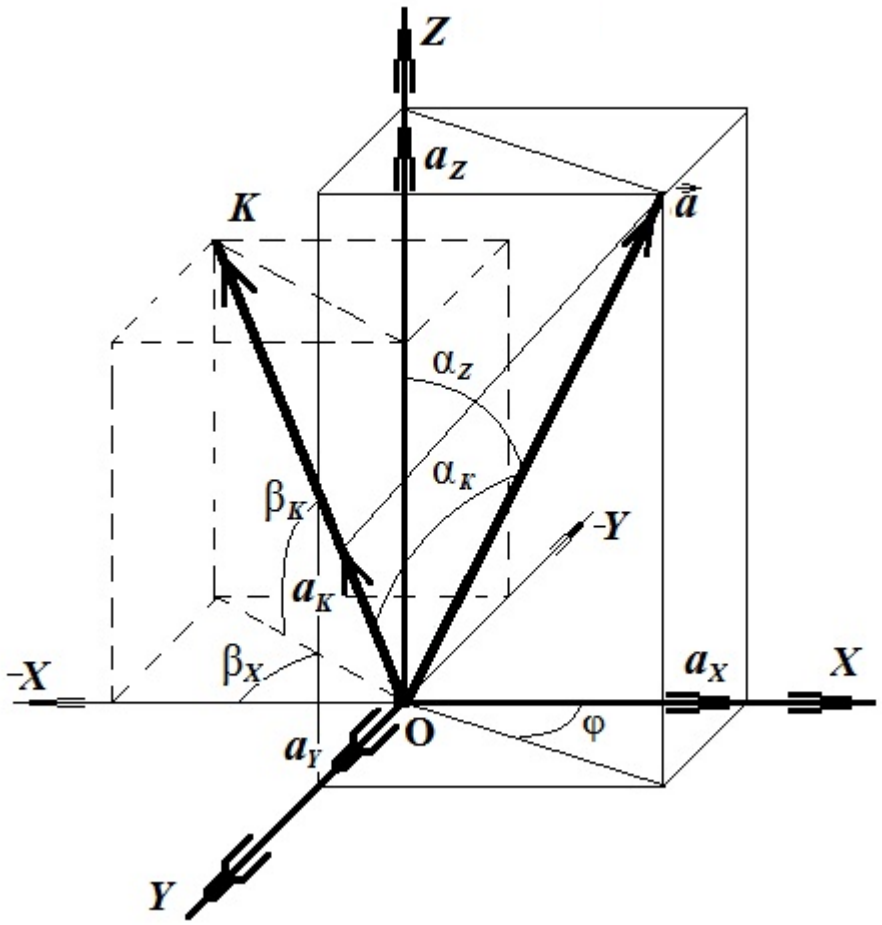



Рис. 1 - Система координат, связанная с осями чувствительности ВИП

На рис. 1$X, Y, Z$ – направление осей чувствительности трех ортогональных каналов ВИП; $K$ – направление оси чувствительности контрольного ВИП; $a_X, a_Y, a_Z$- проекции вектора виброускорения $\vec{a}$ на оси чувствительности ВИП $X$, $Y$ и $Z$ соответственно; $a_K$ - проекция вектора виброускорения $\vec{a}$ на ось чувствительности контрольного ВИП; $\alpha_Z, \alpha_K$ – углы между направлением вектора виброускорения $\vec{a}$ и осями чувствительности $Z$ и контрольного ВИП; $\beta_K$ – угол между осью чувствительности контрольного ВИП и плоскостью $XOY$; $\beta_X$ – угол между проекцией контрольного ВИП на плоскость $XOY$ и осью чувствительности $X$.

При первичной поверке в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.669-2009 на методы и средства поверки рабочих СИ ПВ определяются требуемые метрологические характеристики всех каналов ВИП, в т.ч. и действительные значения коэффициентов преобразования каждого канала, а также измеряются и фиксируются углы между осью чувствительности контрольного канала ВИП и его ортогональными осями чувствительности $X$, $Y$ и $Z$. После установки на место эксплуатации в соответствии с интервалом времени, установленным в руководстве по эксплуатации, осуществляют проверку работоспособности ВИП в следующей последовательности.

Выходные сигналы каждого канала ВИП усиливают с помощью согласующих усилителей и направляют, при необходимости, на соответствующие узкополосные перестраиваемые фильтры, с помощью которых выделяют близкие к гармоническим сигналы $U_X, U_Y, U_Z$ и $U_K$, основная частота которых $f_{об}$. С помощью измерителей разности фаз определяют сдвиги фаз между выходным сигналом $U_Z$ канала Z и выходными сигналами $U_X, U_Y$ и $U_K$ каналов $X(\varphi_{ZX})$, $Y(\varphi_{ZY})$ и $K(\varphi_{ZK})$. Сдвиги фаз $\varphi_{ZX}, \varphi_{ZY}$ и $\varphi_{ZK}$ принимают значения или 0° (выходной сигнал канала находится в фазе с каналом $Z$) или 180° (выходной сигнал канала находится в противофазе с каналом $Z$). Определяют измеренные амплитудные значения проекций вектора виброускорения на оси чувствительности $X$, $Y$, $Z$ и $K$ каналов ВИП:

$$a_X = \frac{U_X}{k_X} \cdot cos\varphi_{ZX}\ ;\quad a_Y = \frac{U_Y}{k_Y} \cdot cos\varphi_{ZY}\ ;\quad a_Z = \frac{U_Z}{k_Z}\ ;\ a_K = \frac{U_K}{k_K} \cdot cos\varphi_{ZK}\ , \quad (1)$$

где $k_X$, $k_Y$, $k_Z$ и $k_K$ – коэффициенты преобразования каналов *X*, *Y*, *Z*и*K* соответственно, (в каждый канал *X*, *Y*и*K* включают однокомпонентный пьезоэлектрический ВИП, согласующий усилитель и измеритель разности фаз, в канал *Z*включают однокомпонентный пьезоэлектрический преобразователь виброускорения и согласующий усилитель).

С помощью проекции вектора виброускорения на ось чувствительности контрольного канала*K* определяют расчетные проекции вектора виброускорения на оси чувствительности *X*, *Y*, *Z*:

$$a_X^{\text{P}} = \frac{1}{cos\,\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}} \cdot a_K - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}} \cdot a_Z - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}} \cdot a_Y, \quad (2)$$

$$a_Y^{\text{P}} = \frac{1}{cos\,\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}} \cdot a_K - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}} \cdot a_Z - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}} \cdot a_X, \quad (3)$$

$$a_Z^{\text{P}} = \frac{1}{cos\,\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}} \cdot a_K - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}} \cdot a_X - \frac{cos\,\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}}{cos\,\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}} \cdot a_Y, \quad (4)$$

где $\widehat{\vec{a}_X, \vec{a}_K}$, $\widehat{\vec{a}_Y, \vec{a}_K}$ и $\widehat{\vec{a}_Z, \vec{a}_K}$ – углы между осями чувствительности ортогональных каналов пьезоэлектрического преобразователя виброускорения $X$, $Y$, $Z$ и осью чувствительности контрольного канала $K$ соответственно.

Полученные расчетные значения проекций вектора виброускорения позволяют квадратичным суммированием определить четыре значения модуля вектора виброускорения:

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + a_Z^2}, \quad (5)$$

$$|\vec{a}|_X = \sqrt{(a_X^{\text{P}})^2 + a_Y^2 + a_Z^2}, \quad (6)$$

$$|\vec{a}|_Y = \sqrt{a_X^2 + (a_Y^{\text{P}})^2 + a_Z^2}, \quad (7)$$

$$|\vec{a}|_Z = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + (a_Z^{\text{P}})^2}, \quad (8)$$

после чего рассчитывают среднее арифметическое значение модуля вектора виброускорения и определяют относительные отклонения рассчитанных по формулам (5) – (8) значений модулей вектора виброускорения от среднего арифметического значения $(\delta|\vec{a}|, \delta|\vec{a}|_X, \delta|\vec{a}|_Y, \delta|\vec{a}|_Z)$ . Если относительные отклонения не превышают заданного значения (например, 1%), то работоспособность ортогональных

каналов ВИП подтверждается. В противном случае можно предположить, что вышел из строя один или несколько каналов ВИП.

Опытный образец трехкомпонентного пьезоэлектрического ВИП был изготовлен и испытан. В таблице 1 приведены расчеты отклонений, позволяющие оценить работоспособность опытного образца пьезоэлектрического преобразователя виброускорения. При этом для моделирования ситуации возникновения дефектов в образце последовательно искусственно изменялся коэффициент преобразования согласующего усилителя каналов $X$, $Y$ и $Z$.

Таблица 1

| Номер экспери-мента | Дефектный канал | | Относительные отклонения модулей вектора виброускорения, % | | | | Вывод о работоспо-собности |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ось чувст-ти | Степень изм-ния, % | $\delta\|\vec{a}\|$ | $\delta\|\vec{a}\|_X$ | $\delta\|\vec{a}\|_Y$ | $\delta\|\vec{a}\|_Z$ | |
| 1 | - | - | -0,141 | 0,343 | 0,333 | -0,535 | Да |
| 2 | - | - | -0,098 | 0,068 | 0,409 | -0,379 | Да |
| 3 | X | 50 | -5,097 | 8,386 | 16,131 | -19,420 | Нет |
| 4 | Y | 31,6 | -4,630 | 7,233 | 15,277 | -17,880 | Нет |
| 5 | Z | 10,8 | 1,492 | -3,599 | -3,490 | 5,597 | Нет |

Из таблицы 1 следует, что в первых двух экспериментах опытный образец пьезоэлектрического преобразователя виброускорения следует признать работоспособным, а в последующих трех – неработоспособным.

Следует добавить, что проверку работоспособности можно провести и по величине отклонения от измеренного расчетного значения проекции вектора виброускорения на ось чувствительности контрольного канала *K*.

**Списоклитературы**

1. Macdonald Andrew Peter. Dual channel accelerometer and method of manufacturing the same. Двухканальный акселерометр и способ его изготовления. Патент США US2014305133 (A1), 2014-10-16, F02C9/00, G01P15/00. Приоритет от 2013-04-15.

2. Иванов Ю.М., Косенков Б.В. Способ поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя без демонтажа с объекта контроля. Патент RU2358244 ЗАО «Мера», Санкт-Петербург, опубл. 10.06.2009

# О погрешностях определения коэффициента преобразования модуля вектора виброускорения

***В.Я. Смирнов, А.В. Орлов***

*ЗАО «Вибро-прибор», г. Санкт-Петербург, Россия*

Наиболее полно можно оценить уровень вибрации работающего агрегата по вектору виброускорения (виброскорости, виброперемещения – ниже рассматривается только виброускорение), который может быть измерен с помощью трех однокомпонентных вибропреобразователей (или одного, но трехкомпонентного), определяющих вектор вибрации в пространстве. Однако, действующие нормативные документы на методы и средства поверки рабочих средств измерений параметров вибрации не выделяют в особую группу трехкомпонентные вибропреобразователи [1]. Регламентируются параметры, в т.ч. погрешности, только отдельных каналов, не рассматривая ВИП как средство измерений параметров вектора вибрации (например, модуля). Поэтому в данном докладе рассматривается вопрос определения ряда специфических погрешностей коэффициента преобразования (КП) трехкомпонентного ВИП при измерении модуля вектора виброускорения. При этом анализируются два варианта определения действительного значения КП модуля вектора виброускорения:

1) методом непосредственного сличения с эталонным однокомпонентным ВИП;
2) методом непосредственного сличения с эталонным трехкомпонентным ВИП.

Эти варианты интересны тем, что при использовании ПВУ с однонаправленным движением вибростола,можно существенно сократить время поверки (это имеет большое значение при серийном выпуске трехкомпонентных ВИП). В рассматриваемых вариантах поверяемый трехкомпонентный ВИП располагается под углом к вектору однонаправленного движения вибростола ПВУ.

На рис. 1 приведена схема размещения поверяемого трехкомпонентного ВИП на вибростоле ПВУ по варианту 1, где 1 – ПВУ; 2 – эталонный однокомпонентный вибропреобразователь; 3 – оправка; 4 – поверяемый трехкомпонентный вибропреобразователь; α – угол между

направлением движения вибростола ПВУ$Z_{\text{ВС}}$ и осью чувствительности $Z_{\text{ВИП}}$вибропреобразователя; β – угол между направлением оси чувствительности $X_{\text{ВИП}}$ и направлением биссектрисы угла между осями чувствительности $X_{\text{ВИП}}$ и $Y_{\text{ВИП}}$; $a^X_{\text{ВИП}}$, $a^Y_{\text{ВИП}}$, $a^Z_{\text{ВИП}}$ – проекции вектора виброускорения $a^Z_{\text{ВС}}$ на оси чувствительности $X_{\text{ВИП}}$, $Y_{\text{ВИП}}$ и $Z_{\text{ВИП}}$ соответственно; $U^X_{\text{ВИП}}$, $U^Y_{\text{ВИП}}$, $U^Z_{\text{ВИП}}$, $U_{\text{ЭТ}}$ - выходные сигналы каналов $X_{\text{ВИП}}$, $Y_{\text{ВИП}}$ и $Z_{\text{ВИП}}$ трехкомпонентного ВИП и выходной сигнал эталонного ВИП соответственно.

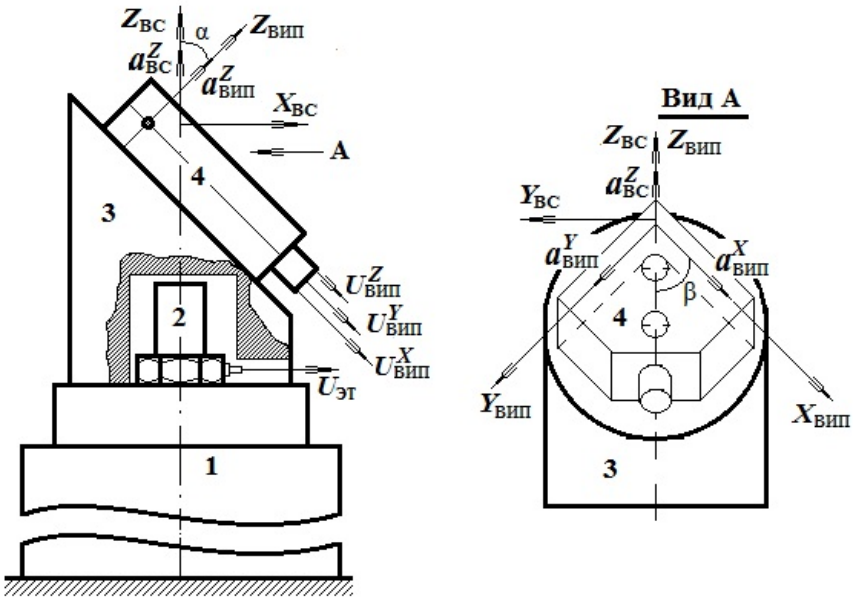



Рис. 1 -Схема размещения поверяемого трехкомпонентного ВИП на вибростоле ПВУ по варианту 1

1. В первом варианте измеряется только одна составляющая вектора виброускорения $a^Z_{\text{ВС}}$, которая номинально является эталонным вектором, следовательно, КП модуля вектора виброускорения может быть определен:

$$k_{\text{ВИП}} = \frac{\sqrt{(U^X_{\text{ВИП}})^2 + (U^Y_{\text{ВИП}})^2 + (U^Z_{\text{ВИП}})^2}}{a^Z_{\text{ВС}}} =$$

$$= \frac{\sqrt{(k^X_{\text{ВИП}} \cdot a^X_{\text{ВИП}})^2 + (k^Y_{\text{ВИП}} \cdot a^Y_{\text{ВИП}})^2 + (k^Z_{\text{ВИП}} \cdot a^Z_{\text{ВИП}})^2}}{a^Z_{\text{ВС}}}. \qquad (1)$$

Если для упрощения принять, что$k^X_{\text{ВИП}} \approx k^Y_{\text{ВИП}} \approx k^Z_{\text{ВИП}} \approx k^0_{\text{ВИП}}$,$a^Z_{\text{ВС}} = a_{\text{ЭТ}}$, а $\delta a^X_{\text{ВИП}} \approx \delta a^Y_{\text{ВИП}} \approx \delta a^Z_{\text{ВИП}} \approx \delta a^0_{\text{ВИП}}$, то погрешность определения КП модуля:

$$\delta k_{\text{ВИП}} = \sqrt{(\delta k^0_{\text{ВИП}})^2 + \delta a^2_{\text{ЭТ}} + (\delta a^0_{\text{ВИП}})^2 \cdot \frac{(a^X_{\text{ВИП}})^4 + (a^Y_{\text{ВИП}})^4 + (a^Z_{\text{ВИП}})^4}{[(a^X_{\text{ВИП}})^2 + (a^Y_{\text{ВИП}})^2 + (a^Z_{\text{ВИП}})^2]^2}}. \qquad (2)$$

Из (2) видно, что поперечное движение вибростола ПВУ ($a^X_{\text{ВИП}}$ и $a^Y_{\text{ВИП}}$) оказывает существенное влияние на погрешность. Необходимо отметить, что на суммарное значение погрешности оказывают влияние и погрешность изготовления (или измерения) углов оправки $\alpha$ и $\beta$, на которой установлен поверяемый ВИП. Так, если не учитывать поперечное движение вибростола, то инструментальные погрешности в зависимости от величины этих углов имеют вид:

$$\delta k^X_{\text{ВИП}} = \sqrt{(\delta U^X_{\text{ВИП}})^2 + \left(\delta\left|a^Z_{\text{ВС}}\right|\right)^2 + (tg\beta)^2 \cdot (\Delta\beta)^2 + (ctg\alpha)^2 \cdot (\Delta\alpha)^2}\ ;.$$

$$\delta k^Y_{\text{ВИП}} = \sqrt{(\delta U^Y_{\text{ВИП}})^2 + \left(\delta\left|a^Z_{\text{ВС}}\right|\right)^2 + (ctg\beta)^2 \cdot (\Delta\beta)^2 + (ctg\alpha)^2 \cdot (\Delta\alpha)^2}; \quad (3)\ .$$

$$\delta k^Z_{\text{ВИП}} = \sqrt{(\delta U^Z_{\text{ВИП}})^2 + \left(\delta\left|a^Z_{\text{ВС}}\right|\right)^2 + (tg\alpha)^2 \cdot (\Delta\alpha)^2}.$$

Из (3) следует, что погрешности определения КП зависят от конкретных значений углов $\alpha$ и $\beta$, которые на практике имеют фиксированное значение. В таблице 1 приведены расчеты относительной погрешности определения КП отдельной оси чувствительности трехкомпонентного ВИП только в зависимости от точности изготовления и измерения угловα $= 45°$ и $\beta = 45^{\circ}$.

Из (3) также следует, что увеличение угла α при постоянной погрешности изготовления и измерения приводит к увеличению погрешности $\delta k^Z_{\text{ВИП}}$ и уменьшению влияния поперечных составляющих $\delta k^X_{\text{ВИП}}$ и $\delta k^Y_{\text{ВИП}}$. Аналогичное влияние оказывает и погрешность изготовления и измерения угла β.

Таблица 1

| $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ | град. | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | рад.$\times 10^{-2}$ | 0,17 | 0,35 | 0,87 | 1,2 | 1,7 | 2,6 | 3,5 |
| $tg45° \cdot \Delta\alpha$ | % | 0,17 | 0,35 | 0,87 | 1,2 | 1,7 | 2,6 | 3,5 |
| $ctg45° \cdot \Delta\beta$ | % | 0,17 | 0,35 | 0,87 | 1,2 | 1,7 | 2,6 | 3,5 |

2. При определении действительного значения КП модуля вектора виброускорения методом непосредственного сличения с эталонным трехкомпонентным ВИП поверяемый и эталонный ВИП должны располагаться параллельно друг к другу и под одинаковыми углами $\alpha$ и $\beta$ к вектору однонаправленного движения вибростола ПВУ.

КП модуля вектора виброускорения поверяемого ВИП определяется:

$$k_{\text{ВИП}} = \frac{U_{\text{ВИП}}}{|\vec{a}|} = \frac{\sqrt{(U^X_{\text{ВИП}})^2 + (U^Y_{\text{ВИП}})^2 + (U^Z_{\text{ВИП}})^2}}{\sqrt{(a^X_{\text{ЭТ}})^2 + (a^Y_{\text{ЭТ}})^2 + (a^Z_{\text{ЭТ}})^2}}. \quad (4)$$

Общее выражение относительной погрешности определения КП

$$\delta k_{\text{ВИП}} = \sqrt{\frac{[(U^X_{\text{ВИП}})^2 \cdot \delta U^X_{\text{ВИП}}]^2 + [(U^Y_{\text{ВИП}})^2 \cdot \delta U^Y_{\text{ВИП}}]^2 + [(U^Y_{\text{ВИП}})^2 \cdot \delta U^X_{\text{ВИП}}]^2}{[(U^X_{\text{ВИП}})^2 + (U^Y_{\text{ВИП}})^2 + (U^Z_{\text{ВИП}})^2]^2} + \frac{[(a^X_{\text{ЭТ}})^2 \cdot \delta a^X_{\text{ЭТ}}]^2 + [(a^Y_{\text{ЭТ}})^2 \cdot \delta a^Y_{\text{ЭТ}}]^2 + [(a^Z_{\text{ЭТ}})^2 \cdot \delta a^Z_{\text{ЭТ}}]^2}{[(a^X_{\text{ЭТ}})^2 + (a^Y_{\text{ЭТ}})^2 + (a^Z_{\text{ЭТ}})^2]^2}}. \quad (5)$$

Рассмотрим инструментальные погрешности, вызванные непараллельностью размещения осей чувствительности поверяемого ВИП относительно эталонного. Выясняется, что погрешность определения модуля вектора виброускорения при отклонении поверяемого ВИП от эталонного на величину $\pm\Delta\alpha$ не возникает, т.к. независимо от угла наклона определяется один и тот же модуль вектора. Влияние неточности установки (или измерений) угла $\beta$ сводится к нулю только в тех случаях, когда угол $\beta$установки поверяемого ВИП отклоняется от угла $\beta$ установки эталонного ВИП на одну и ту же величину как по оси $X$, так и по оси $Y$. Однако, в общем случае, когда ось$X$ поверяемого ВИП отклоняется от эталонного ВИП на угол $\pm\Delta\beta^X$, а ось $Y$ – на $\pm\Delta\beta^Y$, инструментальная погрешность измерения отдельных составляющих вектора виброускорения поверяемым ВИП принимает вид:

$$\delta a^Z_{\text{ВИП}}(\Delta\beta^X;\Delta\beta^Y) = 0;$$

$$\delta a^X_{\text{ВИП}}(\Delta\beta^X) \approx \mp\frac{a^Z_{\text{ВС}} \cdot sin\alpha \cdot sin\beta - a^X_{\text{ВС}} \cdot cos\alpha \cdot sin\beta - a^Y_{\text{ВС}} \cdot cos\beta}{a^Z_{\text{ВС}} \cdot sin\alpha \cdot cos\beta - a^X_{\text{ВС}} \cdot cos\alpha \cdot cos\beta + a^Y_{\text{ВС}} \cdot sin\beta} \cdot \Delta\beta^X; \quad (6)$$

$$\delta a^Y_{\text{ВИП}}(\Delta\beta^Y) \approx \pm\frac{a^Z_{\text{ВС}} \cdot sin\alpha \cdot cos\beta - a^X_{\text{ВС}} \cdot cos\alpha \cdot cos\beta + a^Y_{\text{ВС}} \cdot sin\beta}{a^Z_{\text{ВС}} \cdot sin\alpha \cdot sin\beta - a^X_{\text{ВС}} \cdot cos\alpha \cdot sin\beta - a^Y_{\text{ВС}} \cdot cos\beta} \cdot \Delta\beta^Y.$$

Если $a^X_{\text{ВС}} \approx a^Y_{\text{ВС}} \approx 0{,}05 \cdot a^Z_{\text{ВС}}$ (коэффициент поперечного движения вибростола поверочного вибростенда ≈7%), то

$$\delta a^X_{\text{ВИП}}(\Delta\beta^X) \approx \mp 0{,}861 \cdot \Delta\beta^X; \delta a^Y_{\text{ВИП}}(\Delta\beta^Y) \approx \pm 1{,}161 \cdot \Delta\beta^Y.$$

Необходимо рассмотреть еще одну погрешность определения коэффициента преобразования модуля вектора виброускорения. При расчете модуля вектора виброускорения по (4) априори предполагается, что выходные напряжения поверяемого ВИП пропорциональны только проекциям виброускорения на соответствующие оси чувствительности поверяемого ВИП, а коэффициенты преобразования $k^X_{\text{ВИП}} \approx k^Y_{\text{ВИП}} \approx$

$k^Z_{\text{ВИП}} \approx k^0_{\text{ВИП}}$. В реальности технические условия допускают отклонения коэффициентов преобразования по осям чувствительности ВИП от номинального значения (в расчетах можно учитывать максимально допустимое отклонение по техническим условиям отклонение). В этом случае можно записать:

$k^X_{\text{ВИП}} = k^0_{\text{ВИП}} \pm \Delta\, k^X_{\text{ВИП}}; k^Y_{\text{ВИП}} = k^0_{\text{ВИП}} \pm \Delta\, k^Y_{\text{ВИП}}; k^Z_{\text{ВИП}} = k^0_{\text{ВИП}} \pm \Delta\, k^Z_{\text{ВИП}}$.

При условии $\delta k^X_{\text{ВИП}} \approx \delta k^Y_{\text{ВИП}} \approx \delta k^Z_{\text{ВИП}} \approx \delta k^0_{\text{ВИП}}$ такие отклонения приведут к возникновению погрешности

$$\delta k_{\text{ВИП}} = \frac{k^0_{\text{ВИП}}}{|\vec{a}|} \cdot \frac{\sqrt{(a^X_{\text{ВИП}})^4 + (a^Y_{\text{ВИП}})^4 + (a^Z_{\text{ВИП}})^4}}{\sqrt{(U^X_{\text{ВИП}})^2 + (U^Y_{\text{ВИП}})^2 + (U^Z_{\text{ВИП}})^2}} \cdot \delta k^0_{\text{ВИП}}\,. \qquad (8)$$

Если принять, что $a^X_{\text{ВИП}} \approx a^Y_{\text{ВИП}} \approx a^Z_{\text{ВИП}} \approx 10\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $k^0_{\text{ВИП}} = 5\,\frac{\text{мВ}}{\text{м}\cdot\text{с}^{-2}}$, тогда

$$\delta k_{\text{ВИП}} = \frac{5}{10\cdot\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{(10)^4 \cdot 3}}{\sqrt{(50)^2 \cdot 3}} \cdot \delta k^0_{\text{ВИП}} = \frac{5\cdot 100}{10\cdot\sqrt{3}\cdot 50} \cdot \delta k^0_{\text{ВИП}} = \frac{\delta k^0_{\text{ВИП}}}{\sqrt{3}},$$

т.е. при указанных выше условиях погрешность определения КП модуля вектора виброускорения в $\sqrt{3}$ раза меньше, чем допускаемый предел отклонения КП отдельного канала от номинального значения.

**Список литературы**

1. ГОСТ Р 8.669 – 2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки» // - М.: Стандартинформ, 2010. – 83с.

**Устройство для определения значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических вибропреобразователей**

***Д.В.Скворцов, А.Л. Блохин, В.Я.Смирнов***

*ЗАО «Вибро-прибор», г. Санкт-Петербург, Россия*

Значение частоты установочного резонанса пьезоэлектрического вибропреобразователя (ВИП) является одной из основных его технических характеристик, определяющей рабочий частотный диапазон средств измерения параметров вибрации [1]. При выпуске из производства ВИП значение частоты установочного резонанса является обязательным параметром для определения, а частотная характеристика наглядно показывает качество сборки и совершенство разработанной конструкции ВИП. Наибольшее применение при определении значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрического вибропреобразователянашел известный способ возбуждения колебаний в ВИП с помощью падающего шарика (пункт 10.15.2 [1]).Падающий шарик возбуждает в рабочем теле (как правило, рабочее тело – сфера с лыской для крепления ВИП) плоскую волну короткой длительности, которая возбуждает затухающие колебания в ВИП. Соответствующее программное обеспечение позволяет быстро преобразовать временной сигнал в спектральную форму и получить амплитудно- и фазо-частотные характеристики. Простота способа является несомненным его преимуществом, но он обладает и рядом недостатков, не позволяющим получить достаточно стабильные результаты. Разброс результатов возможен из-за несоосности осей сферического рабочего тела и направляющей трубки, положительной разности диаметров отверстия направляющей трубки и падающего шарика, что приводит к непредсказуемому изменению направления распространения волны и появлению ее горизонтальной составляющей. Как следует из таблицы В.1 [1] для получения различной длительности ударного импульса необходимы набор падающих шариков и выбор высоты их падения. Все это (особенно нестабильность результатов от эксперимента к эксперименту) приводит к необходимости поиска путей совершенствования способов и аппаратуры для определения значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических ВИП. Желательно совместить простоту рассмотренного выше способа и получение более стабильных результатов,

не зависящих от неточности изготовления и расположения отдельных элементов установки.

Один из таких вариантов устройства схематически представлен на рис. 1

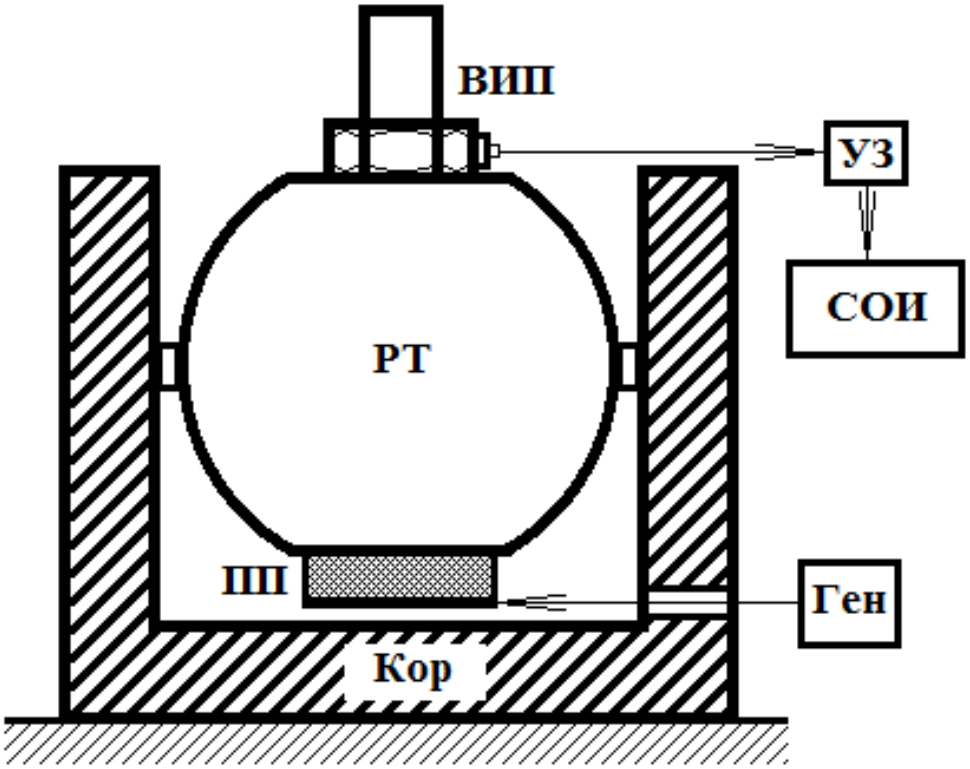



Рис. 1- Схема устройства для определения установочных резонансов пьезоэлектрического ВИП

На рис. 1 РТ – рабочее тело, ПП – пьезопластина (или набор пьезопластин), Кор – корпус устройства, Ген – генератор специальных сигналов, УЗ – усилитель заряда, СОИ – система обработки информации.

В предлагаемом устройстве используется аналогичное [1] рабочее тело в форме сферы (возможны и другие варианты, например, цилиндр). Важно, чтобы собственная частота рабочего тела превышала установочный резонанс поверяемого ВИП (например, в 1,2 раза [1]). Но возбуждение волны в рабочем теле осуществляется с помощью пьезокерамической пластины (или набора пластин). Пластина закреплена неподвижно на плоскости, расположенной на диаметрально противоположной стороне от плоскости, на которой установлен поверяемый ВИП. С выхода генератора специальных сигналов на пластину подается одиночный прямоугольный электрический импульс. Длительность и амплитуда импульса выбирается в зависимости от значения частоты установочного резонанса поверяемого

ВИП. Неподвижность плоскости, с помощью которой возбуждается плоская волна в рабочем теле, и ее однонаправленность по отношению к рабочему телу позволяет получать значительно более стабильные результаты. Ценность данного устройства состоит в том, что изменяется только способ возбуждения плоской волны в рабочем теле. Вместо ударного взаимодействия двух стальных тел, упругая деформация которых зависит от многих влияющих факторов, создается плоская волна с помощью практически постоянного и по длительности и по амплитуде прямоугольного электрического импульса. При этом импульс, возбуждающий плоскую волну в рабочем теле, создается не в точке соприкосновения рабочего тела с падающим шариком, а в плоскости соприкосновения пьезопластины и рабочего тела, что существенно увеличивает энергию плоской волны и уменьшает риск ее искажения.

Одиночный электрический импульс, воздействующий на пьезоэлектрический вибратор, во времени описывается известным выражением [2]:

$$X(t) = \begin{cases} A_{\text{И}} \text{ при } 0 \le t \le \tau_{\text{И}} \\ 0 \text{ при } 0 > t \text{ и } t > \tau_{\text{И}} \end{cases},$$

амплитудная спектральная функция которого определяется выражением

$$S(j\omega) = \frac{2 \cdot A_{\text{И}}}{\omega} \cdot \left|\sin\left(\frac{\omega}{2} \cdot \tau_{\text{И}}\right)\right|,$$

а фазовая –

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega \cdot \tau_{\text{И}}}{2} \pm i \cdot \pi,$$

где $A_{\text{И}}$ и $\tau_{\text{И}}$ – амплитуда и длительность одиночного импульса;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f; f$ – циклическая частота.

Амплитуда импульса $A_{\text{И}}$ выбирается из условия соотношения высоты резонансного пика и нулевого уровня спектральной характеристики после проведения преобразования Фурье. Это соотношение на практике должно быть не менее трех, что позволяет с более высокой точностью выделить резонансный пик на спектральной характеристике и определить значение частоты установочного резонанса. Длительность импульса $\tau_{\text{И}}$, которая является основным его параметром, определяется ожидаемым значением частоты установочного резонанса поверяемого вибропреобразователя $f_{\text{уст}}$ и выбирается из условия:

$$f_{\text{И}} = \frac{1}{\tau_{\text{И}}} \geq 1{,}2 \cdot f_{\text{Уст}};$$

$$\tau_{\text{И}} \leq \frac{0{,}83}{f_{\text{Уст}}}.$$

На нашем предприятии была проведена экспериментальная проверка опытного образца устройства для определения установочного резонанса вибропреобразователя модели МВ-43-25, паспортное значение частоты установочного резонанса которого около 20 кГц, масса ВИП ≈ 0,09 кг.В качестве рабочего тела использовался цилиндр, высота которого 80 мм, диаметр – 40 мм, масса – 0,78 кг, расчетное значение первого резонанса свободного цилиндра ≈31875 Гц. Обработка получаемой с выхода усилителя заряда информации осуществлялась с помощью АЦП и компьютера с соответствующим программным обеспечением. Результаты экспериментального определения значений частоты установочного резонанса с помощью электрического возбуждения плоской волны в рабочем теле приведены в таблице 1. Для сравнения в таблице 2 приведены результаты определениязначений частоты установочного резонанса с помощью ударного возбуждения плоской волны в рабочем теле.

Таблица 1. Результаты определения значений частоты установочного резонанса ВИПс помощью электрического возбуждения плоской волны

| $\tau_{\text{и}}$ | мкс | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Уст-ный резонанс ПВИП | Гц | 19299 | 19299 | 19300 | 19300 | 19300 | 19301 | - |

Из таблицы 1следует, что среднее значение частоты установочного резонанса, определенного с помощью электрического прямоугольного импульса, равно 19299 Гц, при этом практически отсутствует зависимость от длительности электрического импульса. Однако, при $\frac{1}{\tau_{\text{И}}} \approx f_{\text{Уст}}$ провести измерение невозможно, т.к. значение частоты $f_{\text{Уст}}$ близко к нулевой точке амплитудной спектральной характеристики прямоугольного импульса с длительностью $\tau_{\text{И}}$= 50 мкс. Необходимо отметить, что при постоянной длительности и амплитуде одиночного прямоугольного электрического

импульса разброс в определении значения частоты практически не наблюдается и составляет 1-2 Гц.

Таблица 2. Результаты определения значений частоты установочного резонанса ВИПс помощью ударного возбуждения плоской волны

| Диаметр падающего шарика | мм | 3 | 4 | 4,5 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\tau_и$ | мкс | ≈10 | ≈14 | ≈16 | ≈18 | ≈20 | ≈25 | ≈28 |
| Уст-ный резонанс ПВИП | Гц | 19471 | 19466 | 19464 | 19461 | 19453 | 19441 | 19440 |

Из таблицы 2 следует, что разброс в зависимости от массы падающего шарика, т.е. от длительности ударного импульса значительно больше, чем при воздействии электрического импульса, при этом значение частоты установочного резонанса снижается в зависимости от длительности.

**Список литературы**

1. ГОСТ Р 8.669 – 2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки» // - М.: Стандартинформ, 2010. – 83с.

2. Иориш Ю.И. Виброметрия. Изд. 2-ое перераб. М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. – с 115

**Пьезоэлектрические преобразователи виброскорости: схемные решения, конструктивные особенности, вопросы точности измерений**

***А.М. Селихов***

*ЗАО «Вибро -прибор», г. Санкт-Петербург, Россия*

Пьезоэлектрические преобразователи виброскорости: схемные решения, конструктивные особенности, вопросы точности измерений

А.М. Селихов

ЗАО «Вибро -прибор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Вибрационный контроль за состоянием работающего механизма широко применяется для выявления повышенных уровней вибрации на его корпусе с целью предотвращения возникновения аварийных ситуаций на производстве, оснащённом энергоёмким оборудованием. Среди измеряемых параметров вибрационного сигнала в контрольной точке на корпусе работающего механизма виброскорость занимает главенствующее положение. Это объясняется тем, что виброскорость в контролируемой точке работающего механизма непосредственно связана с кинетической энергией механических колебаний в этой точке. Этим объясняется и большая номенклатура пьезоэлектрических преобразователей виброскорости, выпускаемых различными предприятиями. Среди зарубежных предприятий наиболее широко представлены Bently Nevada [1], PCB, Endevco, Kistler, Metrix, MEGGITT и ряд других, а среди отечественных: ЗАО «Вибро-прибор», ЗАО «СИЭЛ», ФГУП «НПО ИТ», Вибробит», ООО «Глобал-Тест», ООО «Альконт».

Одним из главных условий, предъявляемых к пьезоэлектрическому преоб-разователю виброскорости, является возможность измерений сигнала в полосе частот 10 – 1000 Гц, что вытекает из требований к полосовым фильтрам в этой полосе, прописанным в [2]. Выполнение этих требований реализуется в штатной аппаратуре, производимой ЗАО «Вибро-прибор» и ЗАО «СИЭЛ».

Необходимо отметить, что большинство выпускаемых пьезоэлектрических преобразователей виброскорости выполняют роль

только датчиков виброскорости без выполнения требований, изложенных в [2]. Причём многие из датчиков виброскорости работают в стандарте ICP. Фирмы - изготовители пьезо-электрических преобразователей виброскорости не раскрывают необходимую информацию о технических характеристиках встроенного усилителя с полосовым фильтром. Недостаток сведений затрудняет решение вопроса о правильном выборе пьезоэлектрического преобразователя виброскорости для контроля за вибрационным состоянием работающего механизма. Специалист, занимающийся вопросом выбора пьезоэлектрического преобразователя виброскорости, оказы-вается в сложном положении, так как от правильного решения этого вопроса зависит надёжность и срок эксплуатации самого механизма. С целью улучшения сложившегося положения на рынке по производству виброизмерительной аппара-туры. ЗАО «Вибро-прибор» разработал несколько вариантов изготовления пьезоэлектрических преобразователей виброскорости, структурные схемы кото-рых представлены ниже на рисунках 1-4.

Рис. 1. Структурная схема пьезоэлектрического преобразователя вибро-скорости с фильтром верхних частот первого порядка и питанием по двух-проводной линии от источника постоянного тока с выходным током 2-20 мА.

Рис. 2. Структурная схема пьезоэлектрического преобразователя виброскорости с фильтром верхних частот второго порядка и питанием по двух-проводной линии от источника постоянного тока с выходным током 2-20 мА.

Рис. 3. Структурная схема пьезоэлектрического преобразователя вибро-скорости, удовлетворяющего требованиям [2], с питанием по двухпроводной линии от источника постоянного тока с выходным током 4-20 мА.

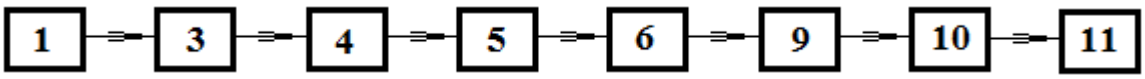



Рис. 4. Структурная схема пьезоэлектрического преобразователя вибро-скорости, удовлетворяющего требованиям [2], с питанием по двухпроводной линии от источника постоянного напряжения по токовой петле 4-20 мА

На рис. 1 – 4

1- вибропреобразователь;

2- усилитель заряда с фильтром верхних частот первого порядка;

3- усилитель заряда с фильтром верхних частот второго порядка;

4- интегратор;

5- фильтр верхних частот четвёртого порядка;

6- фильтр нижних частот четвёртого порядка;

7- усилитель напряжения-модулятор напряжения;

8- источник постоянного тока;

9- детектор среднего квадратического значения напряжения;

10- передатчик токовой линии;

11- источник постоянного напряжения.

При реализации различных вариантов пьезоэлектрического преобразователя виброскорости необходимо учитывать конструктивные особенности изготовления самого усилителя пьезоэлектрического преобразователя виброскорости:

Усилители пьезоэлектрического преобразователя виброскорости по первому и второму вариантам из-за их небольших габаритных размеров могут быть расположены как в корпусе самого вибропреобразователя (лучший вариант), так и в корпусе разъёма присоединённого кабеля. Для высокотемпературных вибро-преобразователей размещение усилителя пьезоэлектрического преобразователя виброскорости целесообразно размещать в корпусе разъёма присоединённого кабеля. При этом температура разъёма не должна превышать 125 °С. Усилитель пьезоэлектрического преобразователя виброскорости по остальным вариантам из-за увеличения их габаритных размеров целесообразно располагать в допол-нительном корпусе разъёма присоединённого кабеля.

Вопрос уменьшения погрешности при работе усилителя пьезоэлектрического преобразователя виброскорости с расширенным частотным диапа-зоном решается правильным выбором частот среза фильтров верхних и нижних частот первого порядка входного усилителя заряда, чтобы они в меньшей степени влияли на неравномерность амплитудно-частотной характеристики в рабочей полосе частот преобразователя. Уменьшение погрешности при работе усилителя пьезоэлектрического преобразователя виброскорости с полосовым фильтром можно достичь применением во входном усилителе заряда фильтра верхних частот второго порядка.

Изготовленные для всех 4-х вариантов макетные образцы пьезоэлектри-ческих преобразователей виброскорости подтвердили их работоспособность.

Опытный образец пьезоэлектрического преобразователя виброскорости на основе виброизмерительного преобразователя ускорения МВ-43-5Б №150153 был изготовлен по варианту 1 и испытан. Усилитель пьезоэлектрического преобра-зователя виброскорости из-за его небольших габаритов был расположен в корпусе разъёма присоединённого кабеля. В таблице 1 приведены результаты измерений опытного пьезоэлектрического преобразователя виброскорости, позволяющие оценить его работоспособность.

Таблица 1

| a | f | V | Uвых | K | $\delta$ |
|---|---|---|---|---|---|
| м/с$^2$ | Гц | мм/с | мВ | мВ/(мм/с) | % |
| 0,664 | 10 | 10,57 | 558 | 5,28 | 3,49 |
| 1,266 | 20 | 10,07 | 528 | 5,24 | 2,72 |
| 2,500 | 40 | 9,95 | 509,4 | 5,12 | 0,37 |
| 4,983 | 80 | 9,91 | 508,2 | 5,13 | 0,47 |
| 9,968 | 160 | 9,92 | 505,9 | 5,10 | 0,00 |
| 19,690 | 315 | 9,95 | 503,7 | 5,06 | -0,77 |
| 39,430 | 630 | 9,96 | 499 | 5,01 | -1,82 |
| 39,360 | 1250 | 5,01 | 250 | 4,99 | -2,23 |
| 78,600 | 2500 | 5,00 | 244,6 | 4,89 | -4,19 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 155,800 | 5000 | 4,96 | 227,8 | 4,59 | -9,97 |

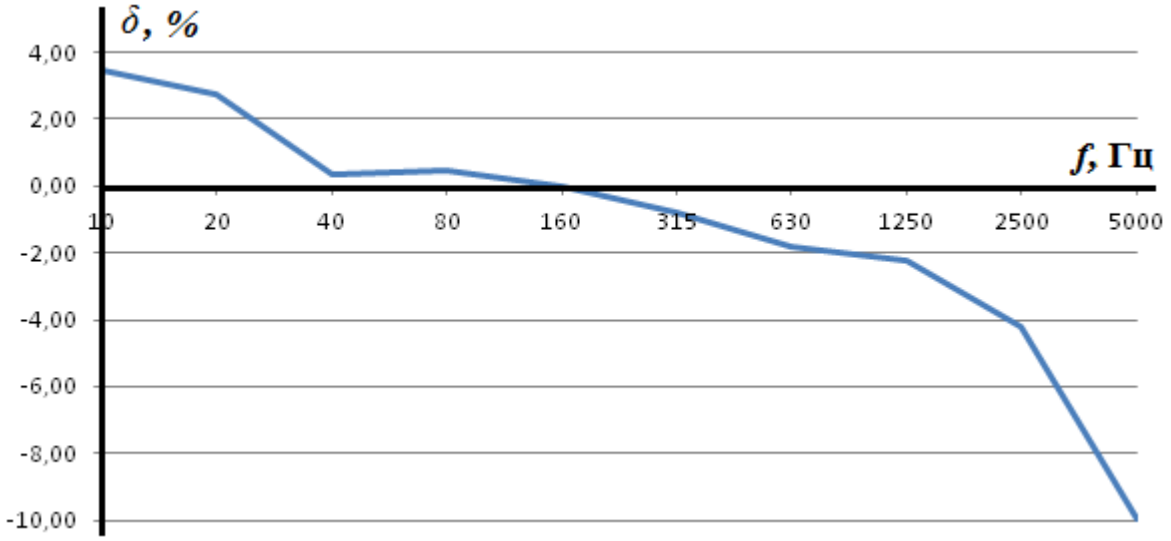



Рис. 5 Результаты измерений опытного пьезоэлектрического преобразователя виброскорости на основе МВ-43-5Б №150153

Анализ результатов измерений опытного пьезоэлектрического преобразователя виброскорости на основе МВ-43-5Б №150153 показал, что его рабочий диапазон частот с неравномерностью коэффициента преобразования ± 4% находится в пределах от 10 Гц до 2500 Гц, что соответствует техническим требованиям на его разработку. Уменьшение коэффициента преобразования на частоте 5000 Гц до 10% вызвано влиянием фильтра нижних частот входного усилителя заряда. Для расширения рабочего диапазона частот преобразователя необходимо увеличить частоту среза его фильтра нижних частот входного усилителя заряда.

**Список литературы**

1. Don Li. Signal conditioning circuit apparatus and method. ПатентСША 5,792,956 Date of Patent: Aug.11,1998

2. ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений.

# Привязка выходного сигнала пьезоэлектрического преобразователя к нулевому уровню

***А.М. Селихов***

*ЗАО «Вибро-прибор», г. Санкт-Петербург, Россия*

Сигнал на выходе усилителя заряда, к которому подключён пьезоэлектрический преобразователь, всегда имеет среднее значение напряжения, равное нулевому уровню. Это связано с тем, что по своей природе пьезоэлектрический преобразователь не может формировать сигнал на нулевой частоте. В связи с этим измерение импульсных сигналов как с помощью пьезоэлектрического вибропреобразователя, так и с помощью пьезоэлектрического преобразователя переменного давления всегда будет осуществляться с появлением погрешности в измерении действительного значения амплитуды импульса исследуемого процесса. Причём, чем меньше скважность последовательности импульсных сигналов, тем больше погрешность определения действительного значения амплитуды импульса. При скважности импульсной последовательности равной двум, погрешность определения действительного значения амплитуды импульса может достигнуть 100%. При увеличении скважности импульсной последовательности погрешность будет уменьшаться, но оценить действительное значение амплитуды импульса в этом случае не представляется возможным. Для устранения отмеченного явления предлагается отрицательную амплитуду импульсного сигнала привязывать к нулевому уровню.

Структурная схема устройства, позволяющая устранить отмеченный недостаток при анализе импульсных процессов на выходе датчика переменного давления показана на рисунке 1. Измерение переменного давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания производится с помощью пьезоэлектрического преобразователя переменного давления 1.Импульсный сигнал с выхода преобразователя поступает на вход согласующего усилителя 2, выход которого подключён к входу пикового детектораотрицательных импульсов 3. Для привязки уровнянапряжения

импульсной последовательности к нулевому уровню необходимо сначала напряжение на выходе пикового детектора проинвертировать с помощью инвертора 4, а затем просуммировать полученное напряжение с напряжением на выходе согласующего усилителя 2 [1].

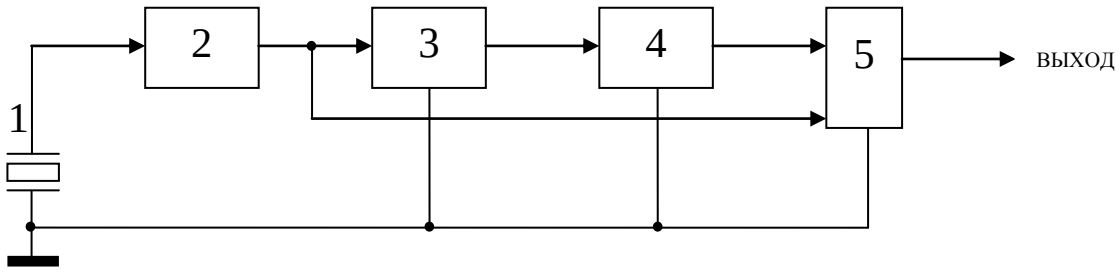



Рис. 1 - Структурная схема устройства для измерения давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

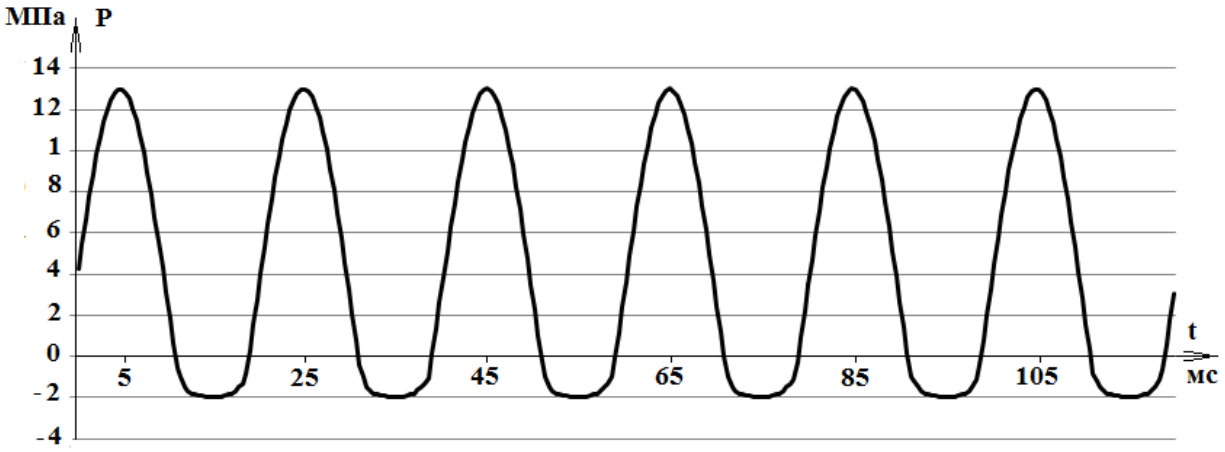



Рис. 2 - Напряжение на выходе согласующего усилителя 2 при измерении давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

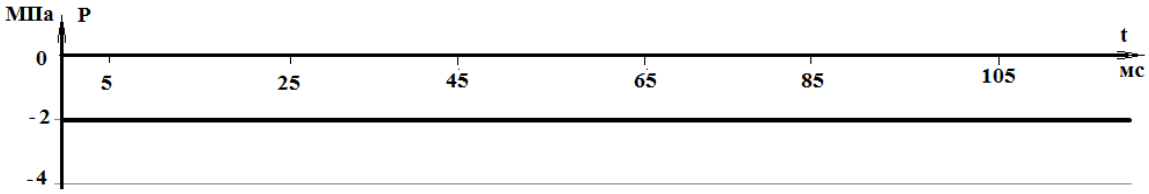



Рис. 3 - Напряжение на выходе пикового детектора при измерении давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

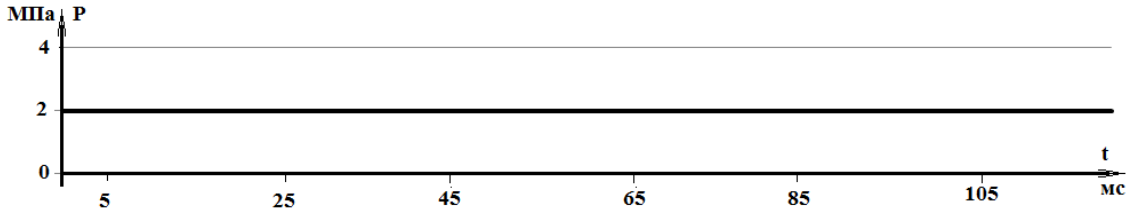



Рис. 4 - Напряжение на выходе инвертора 4 при измерении давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

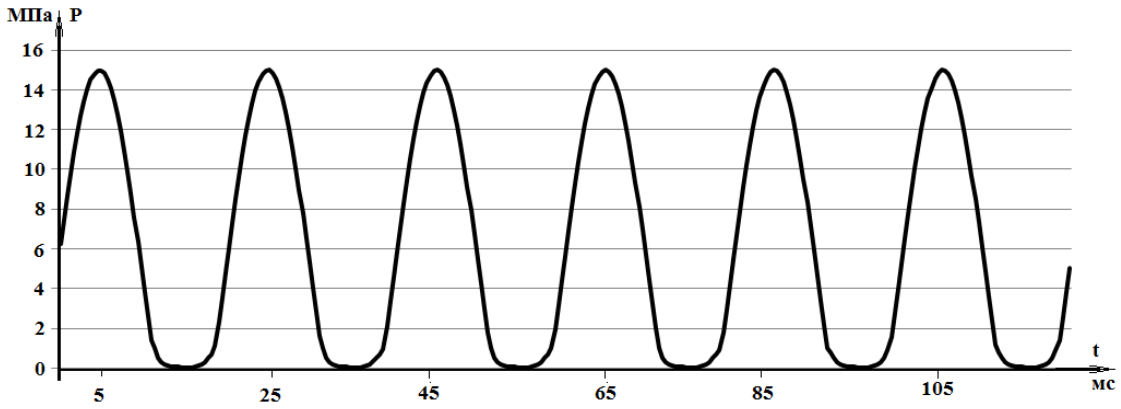



Рис. 5 - Напряжение на выходе сумматора 5 при измерении давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

Экспериментальная проверка предлагаемого устройства проводилась на стенде предприятия ОАО «Коломенский завод» (г. Коломна, Московской обл.). На стенд был установлен 8 цилиндровый 4-х тактный дизельный двигатель 11Д42(5ДРА) без наддува. Обороты дизельного двигателя: (540 ± 2) об/мин.

Мощность двигателя: (75 ± 0,1) % от максимальной мощности.

В процессе экспериментов с помощью специально изготовленного тройника проводилось одновременное измерение переменного давления в камере сгорания первого цилиндра дизельного двигателя 11Д42(5ДРА):

- эталонным измерителем максимального давления (максиметром) КУ0М3;

- датчиком переменного давления МД-45-400 с подключённым усилителем заряда;

- датчиком переменного давления МД-45-400 с подключённым предлагаемым устройством. Датчик переменного давления МД-45-400 имеет следующие основные метроло-гические характеристики:

- коэффициент преобразования, (Кпр)=(1000±200) (пКл/МПа);

- диапазон измерения переменного давления, МПа 0 ± 25;

- диапазон рабочих температур датчика, °С минус 60 ÷ 400.

Результаты измерений амплитудных значений переменного давления в камере сгорания, полученные различными средствами измерений, представлены в таблице 1.

Таблица 1Амплитудные значения измеренного переменного давления в камере сгорания, МПа для различных средств измерений:

Таблица 1Амплитудные значения измеренного переменного давления в камере сгорания, МПа для различных средств измерений:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| МаксиметрКУОМ3 | 13,5 | 13,6 | 13,55 | 13,62 | 13,55 | 13,4 |
| МД-45-400 с усилителем заряда | 12,6 | 12,8 | 12,7 | 12,8 | 12,75 | 12,2 |
| МД-45-400 с предлагаемым устройством | 13,46 | 13,6 | 13,50 | 13,58 | 13,46 | 13,38 |

Сравнение полученных результатов показывает, что максимальная разность между результатами измерений максиметром и с помощью датчика МД-45-400 с усилите-лем заряда 1,2 МПа (≈ 9%). Применение предлагаемого устройства позволило сни-зить максимальную разность полученных результатов измерений максиметром и с помощью датчика МД-45-400 до 0,09 МПа (≈0,7%).

В результате проведённых экспериментальных исследований пьезоэлекрического преобразователя переменного давления совместно с предлагаемым устрой-ством доказана возможность его применения для оценки работоспособности двига-теля внутреннего сгорания.

**Список литературы**

1. Селихов А.М., Брюзгин А.Е., Орлов А.В., Смирнов В.Я., Штейн А.Г.Устройство для измерения давления в цилиндре двигателя внутреннего сгоранияПАТЕНТ на полезную модель № 129233 от 20 июня 2013 г.

## Многофункциональные датчики на основе пьезокерамики

***В.Н. Костюков, А.В. Костюков, А.В. Боярников***

*НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия*

В настоящее время довольно широкое распространение, в силу повышенной надежности и температурной стойкости, получили датчики на основе пьезокерамики [2, 5]. Пьезоэлектрические датчики используются для измерения силы, давления, ускорения, влажности, температуры и расхода.При этом, например, в датчиках силы, используется прямой пьезоэффект, заключающийся в изменении величины заряда на противоположных плоскостях кристалла под действием сил сжатия или растяжения.Измерение температуры с помощью пьезокристалла, как правило, основано на использовании анизотропии - выбирая соответствующую ориентацию среза пьезоэлемента относительно кристаллографических осей, можно изменять его термочастотную характеристику (ТЧХ), которая в общем случае является нелинейной функцией температуры.

Кроме того, известно о влиянии температуры на свойства пьезокерамических вибропреобразователей [1, 2], а также об ограничениях по предельно-допустимой температуре, при которой еще не происходит необратимых изменений характеристик пьезокерамических материалов (ПКМ) [3, 4].Для большинства ПКМ предельно-допустимая температура лежит в пределах (0,5-0,8) от значения температуры точки Кюри, что например для ЦТС-19 составляет 150-200°С. В большинстве случаях, температура диагностируемого оборудования укладывается в этот диапазон температур.При этом не требуется измерение температуры с точностью до долей градуса, а необходимо определение превышения некоторого порогового значения, что указывает на развитие процесса разрушения оборудования.

В ходе проведенных исследований был установлен параметр пьезокерамического вибропреобразователя, изменяющийся в зависимости от температуры – его емкость.

Эксперименты, проводимые с различными типами пьезокерамических преобразователей, показали различие в чувствительности датчиков к изменению температуры, в данном случае изменение его ёмкости от температуры. Наибольшая чувствительность к изменению температуры

наблюдалась у вибропреобразователя AB-311FRU(рис. 1), в тоже время лучшая линейность данной характеристики отмечалась на вибропреобразователе АК-3165.

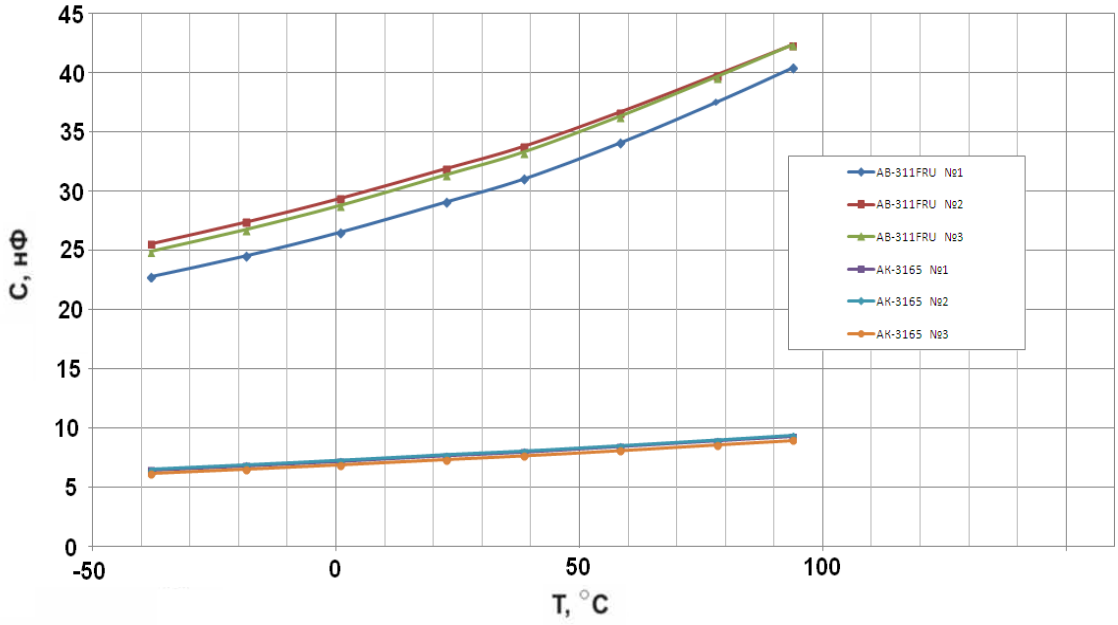



Рис. 1 - Зависимость между температурой вибропреобразователя и его емкостью

Было принято решение, для дальнейших исследований использовать более чувствительный к изменению температуры вибропреобразователь, а именно AB-311FRU.

По полученным эмпирическим данным была определена зависимость между температурой и емкостью вибропреобразователя (рис. 2).

С наименьшей погрешностью зависимость оценки температуры от емкости вибропреобразователя описывается логарифмической функцией:

$$T = A_C \cdot Ln(C_t) + B_C \qquad (1)$$

где $A_C = \frac{t_{80} - t_{20}}{Ln(C_{80}) - Ln(C_{20})}$ и $B_C = t_{20} - Ln(C_{20}) \frac{t_{80} - t_{20}}{Ln(C_{80}) - Ln(C_{20})}$

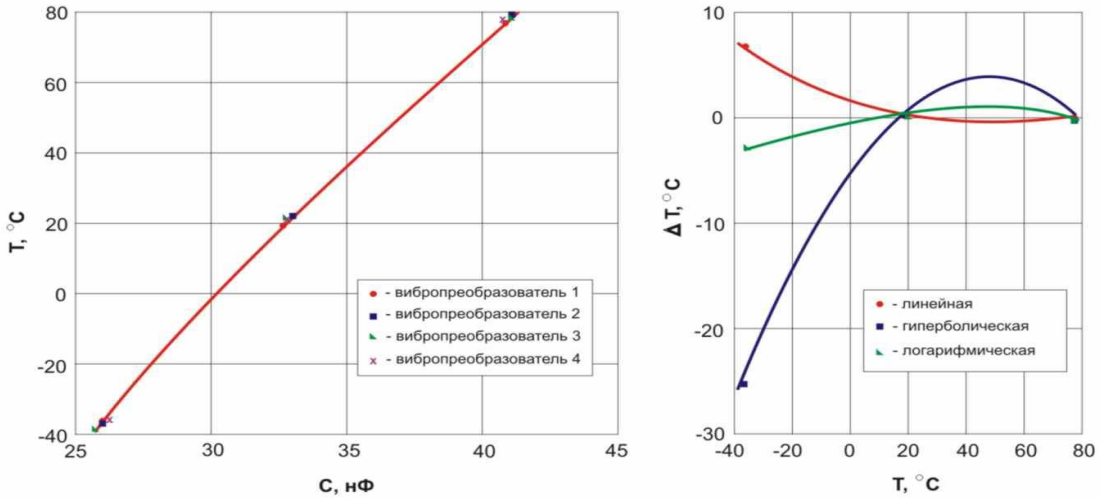



Рис. 2 - Зависимость между температурой вибропреобразователя AB-311FRU и его емкостью, и погрешность вычисления температуры при линейной, гиперболической и логарифмической аппроксимации

Коэффициенты $C_{20}$ и $C_{80}$ являются индивидуальными характеристиками вибропреобразователя и определяются при температурах 20°C и 80°C. Емкость при конкретной температуре $C_t$ может быть определена по напряжению, измеряемому измерительным преобразователем, к которому подключен акселерометр.

С наименьшей погрешностью зависимость (рис.3) емкости вибропреобразователя от напряжения описывается гиперболической функцией:

$$C_t = \frac{A_U}{U} + B_U - C_к \qquad (2)$$

где $A_U = (C_1 - C_2)\frac{U_1 \cdot U_2}{U_2 - U_1}$ и $B_U = \frac{C_2 U_2 - C_1 U_1}{U_2 - U_1}$

Определенная по напряжению емкость $C_t$ должна быть скорректирована на емкость кабеля $C_к$.

Полученная зависимость характеризует измерительный преобразователь, а настроечные коэффициенты $A_U$ и $B_U$ являются индивидуальными, и определяются по эталонным емкостям $C_1$ и $C_2$ (подключаемым вместо вибропреобразователя) и соответствующим им напряжениям $U_1$ и $U_2$.

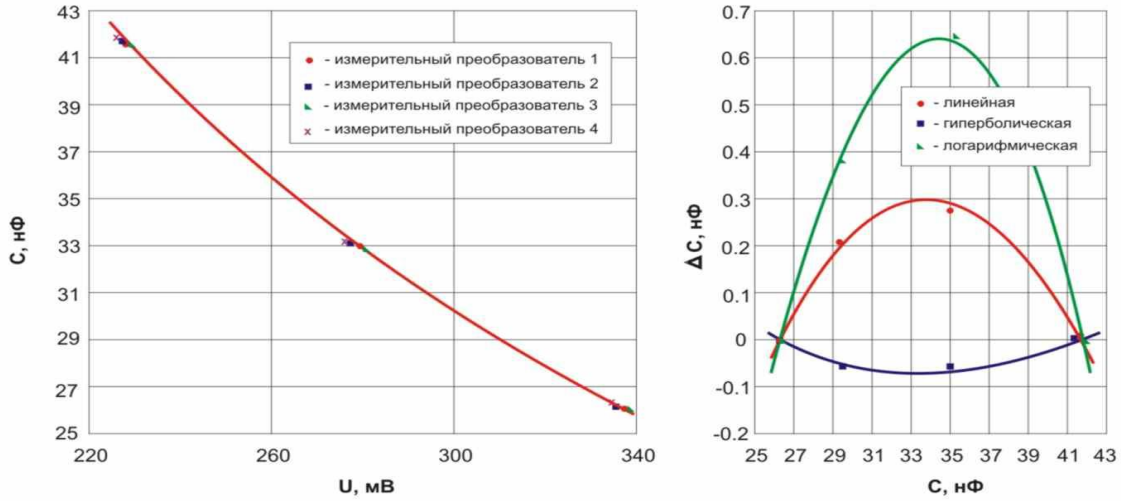



Рис. 3 - Зависимость между емкостью вибропреобразователяAB-311FRU и измеряемым напряжением, погрешность вычисления емкости при линейной, гиперболической и логарифмической аппроксимации

Таким образом, температура, определяемая с помощью пьезокерамического вибропреобразователя (рис. 4), может быть вычислена по формуле:

$$T = A_C \cdot Ln\left(\frac{A_U}{U} + B_U - C_K\right) + B_C \qquad (3)$$

где $A_C$ и $B_C$ - коэффициенты, описывающие свойства акселерометра, $A_U$ и $B_U$ - коэффициенты, характеризующие измерительный преобразователь, $C_K$ - емкость кабеля, соединяющего акселерометр с измерительным преобразователем.

Дальнейшие исследования с использованием 120 вибропреобразователейAB-311FRU, подтвердили эффективность описанного выше способа определения температуры(см. рис. 5). Абсолютная погрешность измерения температуры, с вероятностью 0,95, не превысила значение ± 1 °Св диапазоне температур диагностируемого оборудования от минус 40 до 100 ºС.

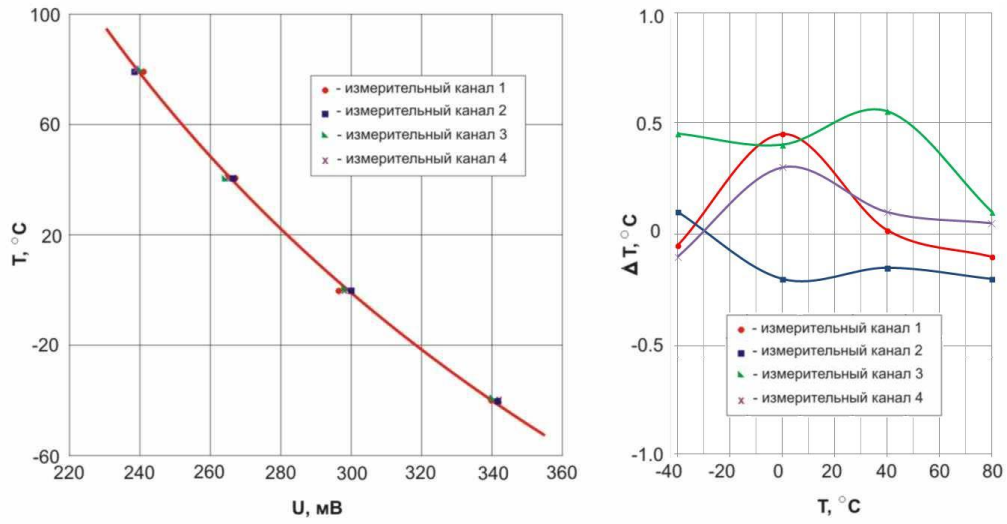



Рис. 4 - Зависимость между температурой и измерямым напряжением, погрешность вычисления температуры

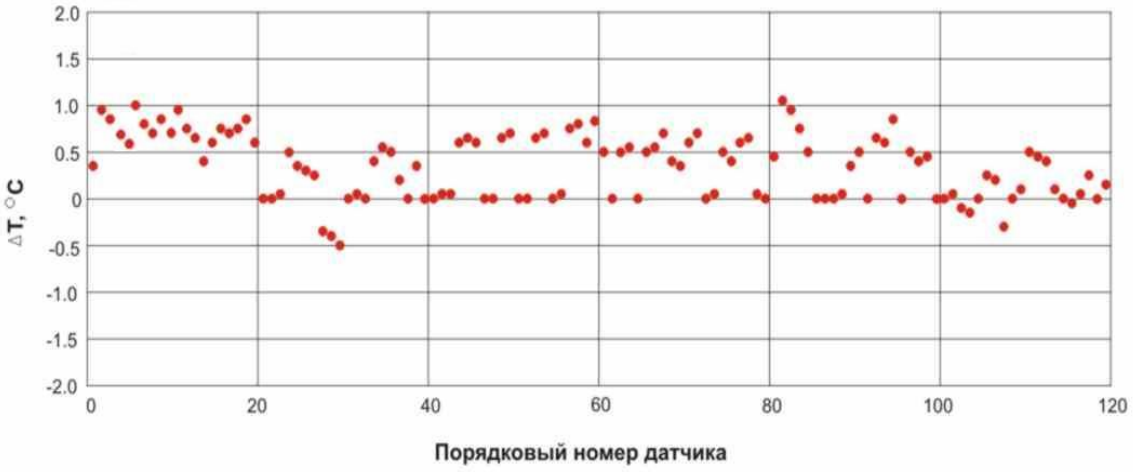



Рис.5 -Абсолютная погрешность измерения температуры при использовании 120 вибропреобразователейAB-311FRU

Таким образом, задача комплексной диагностики оборудования по параметрам вибрации и по температуре решается с использованием только вибропреобразователей.

За счет исключения датчиков температуры, кабельных линий и измерительных каналов (к которым подключались датчики температуры), возможно значительно упростить и удешевить систему мониторинга технического состояния оборудования без потери качества диагностики.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований в соответствии с Соглашением №15-19-00267 от 19.05.2015.

**Список литературы**

1. А.С. СССР № 1740994, G01M15/00. Устройство диагностики машин/В.Н. Костюков, С.А. Морозов (СССР); Заявл. 01.09.83; Опубл. 15.06.92; Бюл. № 22, 4 с.

2. Костюков В.Н., Донсков В.И., Иванов А.А., Завгородний В.С. Виброизмерительные преобразователи промышленного применения. Зарубежная электроника. - 1996. - № 9. - С. 65-67.

3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. - Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. - 346 с.

4. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2008. - 77 с.

5. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры).Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2010. - 304 с.

## Влияниевысокотемпературного отжига ферромагнетиканамагнитоэлектрическийэффект в структуре «пьезоэлектрик – аморфныйферромагнетик»

***Ф.А. Федулов***

*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва, Россия*

В настоящее время большое внимание уделяется созданию различных датчиков, использующих явление магнитострикции в магнитных пленках и способных работать при высоких температурах. Например, в работе [1] продемонстрирована работоспособность магнитоэлектрических (МЭ) датчиков магнитных полей при температурах до 100 С. Однако при более высоких температурах исследования не проводились.

В данной работе впервые исследовано влияние высокотемпературного отжига аморфного ферромагнетика Metglas на МЭ эффект в структуре «пьезоэлектрик – ферромагнетик».

В качестве образца использовался ферромагнетикMetglas Magnetic Alloy2605S3A с размерами в плоскости 4 мм х20мм и толщиной 25μм.

Измерения магнитострикции проводили методом взаимного кинетического импеданса[2].Была собрана экспериментальная установка, блок схема которой показана на рис.1. Установка содержала генератор сигналов специальной формы Agilent 33210A, катушку накачки, выходную катушку, кольца Гельмгольца, блок питания APS 7305 и осциллограф TDS3032B.

Образец располагалсявнутри катушки накачки и выходной катушки как показано на рисунке.На катушку накачки от генератора подавали синусоидальный ток, который создавал возбуждающее магнитное поле с частотой в диапазоне 0.1 - 400 кГц амплитудой до 2 Э. Переменное поле, вследствие магнитострикции, возбуждало в образце продольный механические колебания. На частоте механического резонанса в выходной катушке индуцировалось переменное напряжение, амплитуда которого была пропорциональна магнитострикции образцаλ. Напряжение с выходной катушки регистрировали с помощью осциллографа. Для получения максимального сигнала при резонансе к образцу с помощью катушек Гельмгольца прикладывали постоянное магнитное поле напряженностью Н ~10 Э.

Влияние отжига образца Metglas на его магнитострикционные свойства исследовали в диапазоне температур от 20°С до 500°С с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис.2. Установка состояла из муфельной печи и источника питания GPC-6030D. Контроль температуры осуществлялся пирометром CEMDT-8869 при помощи термопары K-type.

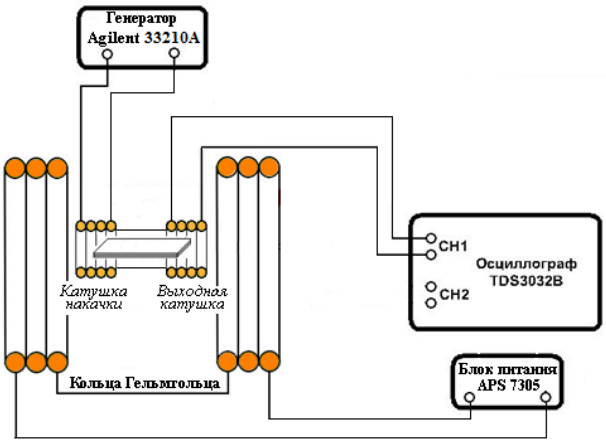



Рис.1 - Структурная схема установки для проведения магнитострикционныхисследований

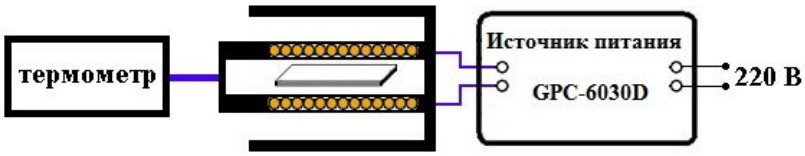



Рис.2 - Установка для отжига ферромагнетика

На первом этапе было изучено влияние отжига на магнитострикционные характеристики образца. На рис.3 показаны зависимости напряжения на выходе измерительной катушки от частоты возбуждающего магнитного поля (АЧХ), измеренныена образце Metglas после его последовательного отжига при различных температурах. Измерения проведены при постоянном поле смещения H= 9.7 Э, соответствующем максимуму пьезомагнитного коэффициента ферромагнетика $q=\partial\lambda/\partial H$.Пики на графике соответствуют резонансным частотам основной и высших мод продольных механических колебаний образца. Установлено, что при температурах отжига образца от 20°C до 425°C амплитуды резонансов и их добротности практически не изменялись. При температуре отжига T> 425°C наблюдалось падение амплитуды резонансов, уменьшение их добротности $Q=f/\Delta fco112$ до 20 и незначительное изменение резонансных частот. При дальнейшем увеличении температуры отжига выше T ≥ 450°C, как видно из рисунка, амплитуда всех резонансов возрастала на ~ 17 %. Амплитуда резонансов достигала максимума при T = 470°C, а затем при дальнейшем повышении температуры отжига резонансы исчезали. Из данных измерений следует, что отжиг ферромагнитного образца при температурах ~ 450°C приводит к

повышению эффективности магнитострикционного возбуждения механических колебаний в образце и одновременному увеличению механических потерь.

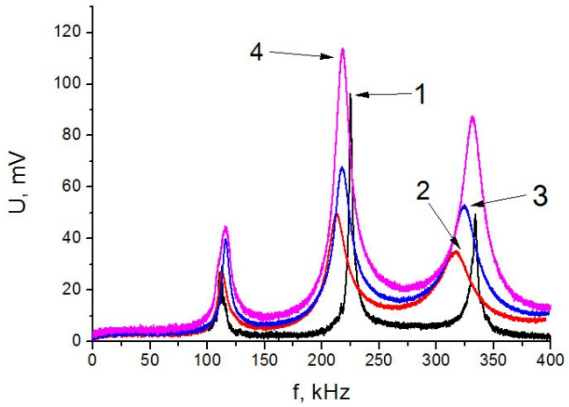



Рис.3 - АЧХ образца, отожжённого при различных температурах: 1– при 20°C, 2 – при 455°C, 3 – при 460°C, 4 – при 470°C.

Затем было исследовано влияние отжига на характеристики МЭ эффекта в структуре, содержащей отожжённый образец Metglas'a. Для этого была изготовлена двухслойная структура, где в качестве пьезоэлектрического слоя использовалась пластинка керамики ЦТС-19 с размерами 4 мм х 20 мм х 0.3мм, а в качестве ферромагнитного слоя – исследуемый образец. Пьезоэлектрический и ферромагнитный слои соединялись при помощи клея «Момент Профи плюс». На рис. 4 схематически изображена схема исследования МЭ эффекта. Структуру помещали внутрь катушки, которая создавала переменное магнитное поле с амплитудой h ~ 4 Э и регистрировали амплитуду МЭ напряжения, генерируемого пьезоэлектриком, при изменении частоты возбуждающего поля.

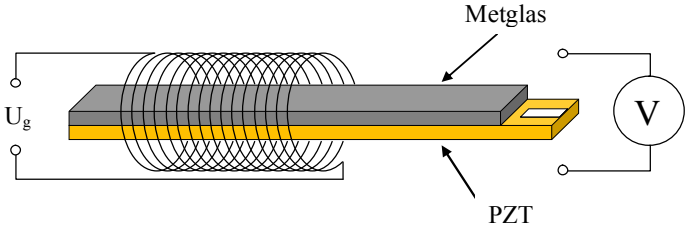



Рис.4 - Двухслойная структура PZT-Metglas

На рис.5 представлена АЧХ структуры. Кривая (a)соответствует сигналу со структуры, содержавшей ферромагнитный образец, не подвергавшийся термообработке. Кривая (b)соответствует сигналу со структуры, содержавшей тот же ферромагнитный образец, но нагретый до

470°C. Из рисунка видно, что амплитуда напряжения при резонансе в структуре с ферромагнитным слоем, отожжённым при 470°C примерно в 1.3 раза выше, чем в структуре с необожжённым ферромагнетиком.

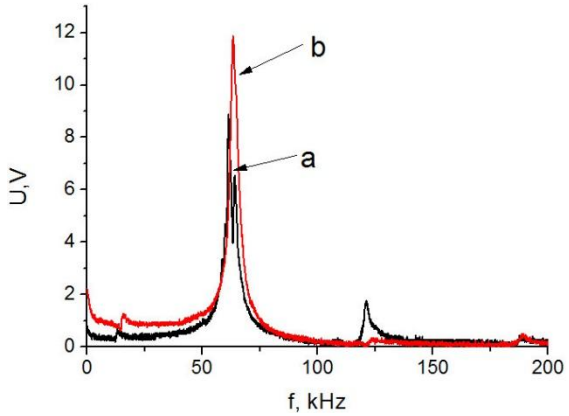



Рис.5 - Частотная зависимость МЭ напряжения для двухслойной структуры

Таким образом, показано, что высокотемпературный отжиг ферромагнитного слоя Metglas существенно влияет на его магнитострикционные характеристики. Отжиг при температурах ~ 470°C способствует более эффективному возбуждению механических колебаний вследствие магнитострикции, что, в свою очередь, приводит к увеличению МЭ напряжения, генерируемого композитной структурой «пьезоэлектрик-ферромагнетик». При температурах T> 500°C магнитострикционные свойства ферромагнитного образца исчезают. Можно сделать вывод, что верхняя граница рабочего температурного диапазона ферромагнетика Metglas при использовании его в магнитоэлектрических датчиках ограничивается T ≈ 500°C.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации по госзаданию, проект №76.

**Список литературы**

1. Бурдин Д.А., Фетисов Ю.К., Чашин Д.В., Экономов Н.А. Температурные характеристики магнитоэлектрического взаимодействия в композитных резонаторах лангатат-ферромагнетик // Известия РАН. Серия физическая, 2014, том 78, №2, с. 200-202.

2. Кикучи Е., Ультразвуковые преобразователи: . –М.: Изд-во «Мир», 1972. – 419с.

**Входной каскад мультидифференциального операционного усилителя с повышенным ослаблением синфазного сигнала**

***А.Е. Титов, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова, И.Н. Сергеенко***

*Донской государственный технический университет,*

*г. Ростов-на-Дону, Россия*

В статье рассмотрен входной каскад мультидифференциального операционного усилителя(МОУ) на основе базового матричного кристалла АБМК_1.3 [1]. В сравнении с классическими схемами он имеет повышенную радиационную стойкость, а также более низкий коэффициента передачи входного синфазного сигнала ($K_{сф}$).

На основе МОУ реализуется новое поколение устройств преобразования и усиления сигналов [2-4], создание которых на традиционных ОУ либо не возможно, либо сопряжено с большими энергетическими и элементными затратами.На рис. 1 показана функциональная схема МОУ на базе двух входных каскадов ДК1, ДК2 и симметричной активной нагрузки (АН).

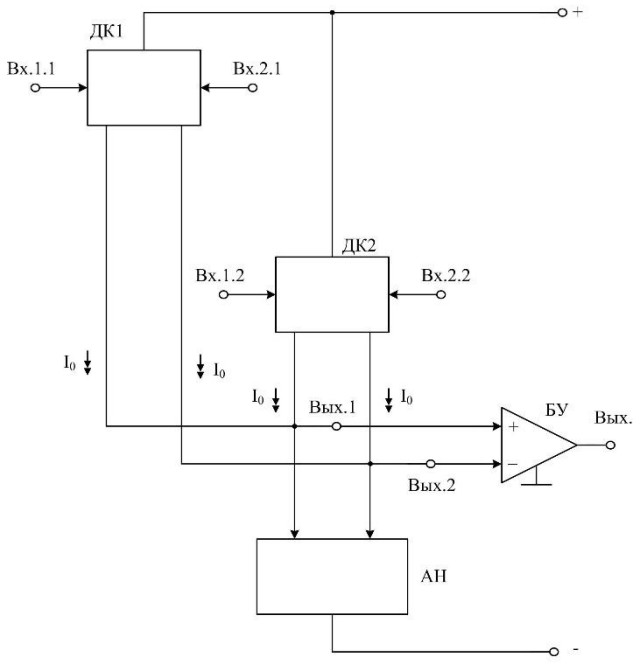



Рис. 1- Функциональная схема МОУ на основе ДК1 и ДК2

Для работы в условиях космического пространства, в экспериментальной физике необходимы радиационно-стойкие МОУ,

допускающие одновременное воздействие на них низких температур и потока нейтронов.

Задачи данного класса решаются на основе достаточно редких технологических процессах, реализующих одновременно полевыеBiFET транзисторы с двумя типами каналов (p, n).

В настоящее время НПО «Интеграл» (г.Минск) освоило производство микросхем на основе хорошо зарекомендовавшего себя радиационно-стойкого биполярно-полевого технологического процесса [1], который обеспечивает формирование толькор-канальных полевых и высококачественных n-p-n биполярных транзисторов с радиационной стойкостью до 1 Мрад и потоком нейтронов до $10^{13}$ н/см$^2$. Однако, для построения МОУ с учетом ограничений базового матричного кристалла АБМК_1.3 необходима специальная схемотехника [1]. В предлагаемом схеме ДК рис.2 источник опорного тока, обеспечивающий статический режим схемы, выполнен на полевых транзисторах VT2 и VT3 с цепью отрицательной обратной связи на транзисторе VT1 (рис. 2а).

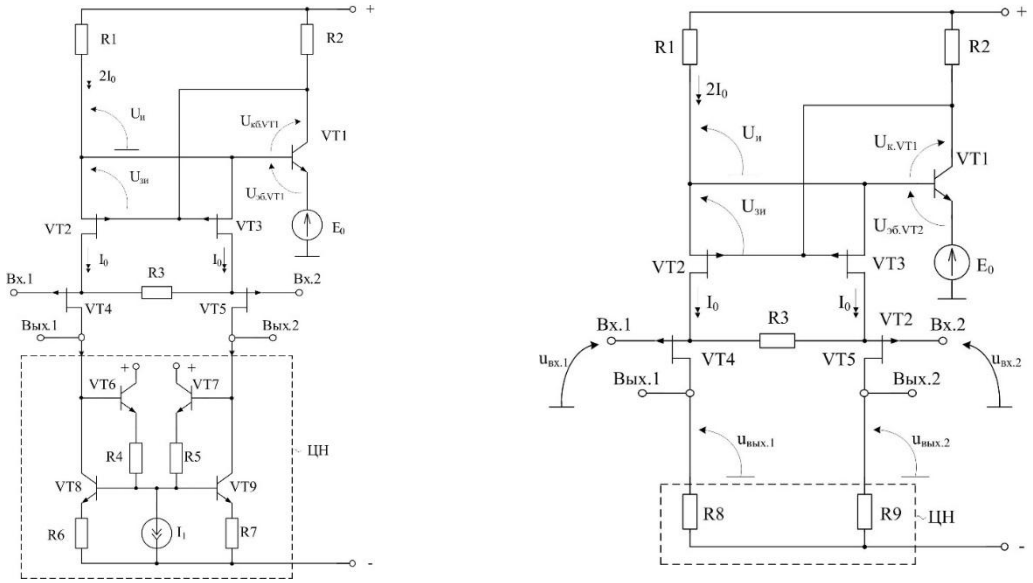



Рис. 2- Входной каскад МОУ с симметричной активной (а) и резистивной (б) нагрузками

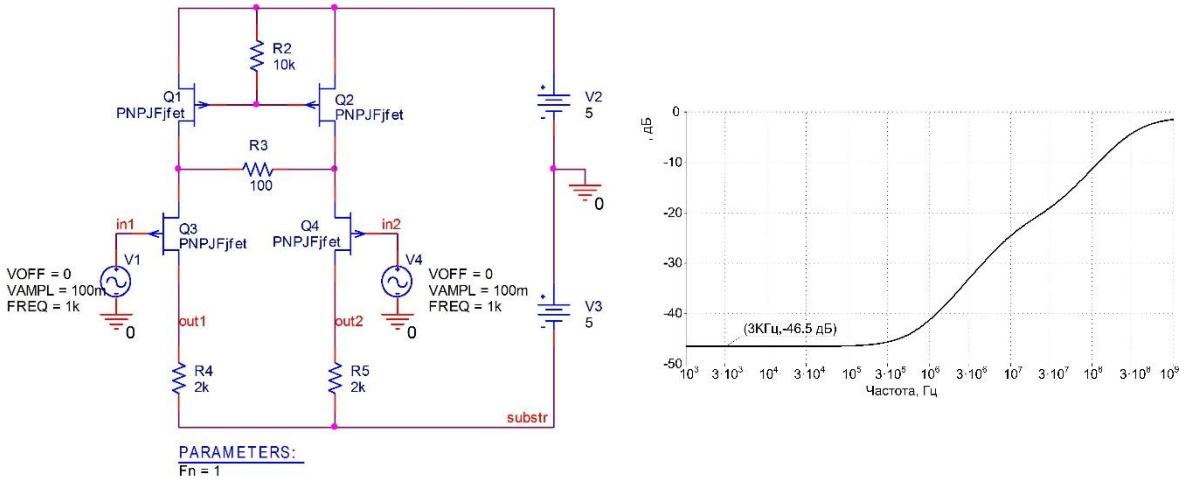
При изменении входного синфазного напряжения ДК рис. 2б ($u_c$=$u_{вх.1}$= $u_{вх.2}$) изменяется напряжение на базе транзистора VT1 на величину:

$$u_{бVT1} \approx (\mu_{VT2}\mu_{VT3})u_c, \quad (1)$$

где $\mu_{VT2} \approx \mu_{VT3} = 10^{-2} - 10^{-3}$ – коэффициенты внутренней обратной связи полевых транзисторов VT2 и VT3.

Это напряжение передаётся в коллекторную цепь транзистора VT1 и, далее, в цепь затворов полевых транзисторов VT2 и VT3. В результате минимизируется влияние внутренней обратной связи полевых транзисторов VT2 и VT3 на выходное сопротивление в цепи стока полевых транзисторов VT4 и VT5. Как следствие, коэффициент ослабления синфазного сигнала ($К_{сф}$) в предлагаемой схеме ДК рис. 2 существенно уменьшается (рис. 3б и рис. 4б).

Моделирование классической схемы ДК (рис. 3а) в среде PSpice на моделях интегральных транзисторов АБМК_1_3 НПО «Интеграл» (г.Минск) показывает, что значение коэффициента ослабления входного синфазного сигнала для выхода 1 не выше, чем минус 46,5дБ.

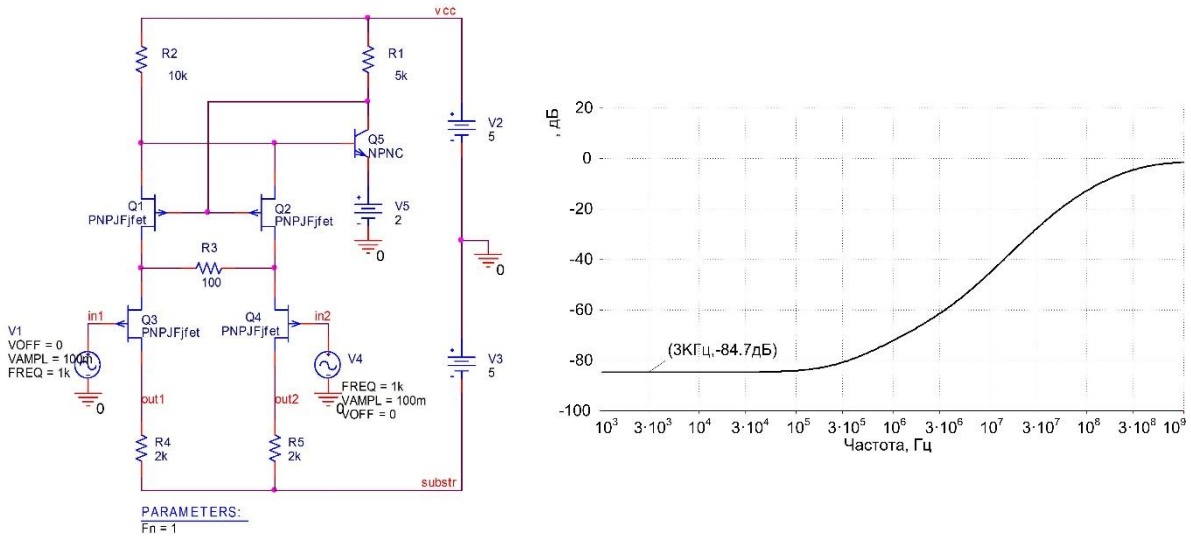



а) б)

Рис. 3- Результаты моделирования частотной зависимости $К_{сф}$ классической схемыОУ в среде PSpice

Анализ частотной зависимости коэффициента ослабления входного синфазного ($К_{сф}$) сигнала для выхода 1 предлагаемой схемы ДК, работающей при тех же условиях, что и классическая схема, показывает,

что схема рис. 2б позволяет уменьшить $K_{сф}$на низких частотах до минус 84,7дБ (рис. 4б).




а) б)

Рис. 4- Результаты моделирования частотной зависимости коэффициента ослабления синфазного сигналапредлагаемой схемы ВК в среде PSpice

Сравнение графиков рис. 3б и рис. 4б показывает что предлагаемый ДК обеспечивает более высокое ослабление входного синфазного сигнала (в 100 раз лучшее по сравнению с классической схемой).

Преимуществом предлагаемых схем (рис. 2а и рис. 2б) состоит также в том, что, в отличие от классических схем ДК, они реализуются на основе радиационно-стойкого биполярно-полевого технологического процесса НПО «Интеграл» (г. Минск) [1].

**Список литературы**

1. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем : монография / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутчинский; под. общ. ред. д.т.н. проф. Н.Н.Прокопенко; ФГБОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т. экономики и сервиса». – Шахты: ФГБОУ ВПО ЮРГУЭС, 2011. – 208с.

2. Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н. В., Пахомов И. В. Основные параметры и уравнения базовых схем включения

мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014. Сборник трудов. Часть 3 /под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. – С. 111-116

3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The main connection circuits of the radiation-hardened differential difference amplifier based on the bipolar and field effect technological process // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2014) proceedings in 7 Volumes; Novosibirsk, October 2-4, 2014. – Novosibirsk State Technical University. – Vol. 1. – P. 29-34

4. Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В. Сверхвысокочастотные мультидифференциальные операционные усилители и основные схемы их включения (Circuitandconnectiondesignofmicrowavedifferentialdifferenceamplifiers) // 11-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: Саратов, 25-26 сентября 2014 г. : материалы конф. в 2 т. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2014. – Т.2. – С. 100-107

*Статья подготовлена по проекту № 8.374.2014/К Госзадания Минобрнауки РФ на 2014-2016 гг.*

**Радиационно-стойкий биполярно-полевой операционный усилитель на основе классического каскода**

***Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова, Л.А. Заякина***

*Донской государственный технический университет,*

*г. Ростов-на-Дону, Россия*

При решении ряда задач прецизионного усиления низкочастотных сигналов необходимы радиационно-стойкие операционные усилители (ОУ)с малым напряжением смещения нуля ($U_{см}$). Мировой опыт проектирования устройств данного класса показывает, что это возможно осуществить на основе биполярно-полевого технологического процесса [1], обеспечивающего формирование p-канальных полевых и высококачественных n-p-n биполярных транзисторов с радиационной стойкостью до 1 Мрад и потоком нейтронов до $10^{13}$ н/см$^2$. Однако, для таких ОУ необходима специальная схемотехника, учитывающая ограничения биполярно-полевой технологии [1]. В настоящей статье рассматривается ОУ с нетрадиционной активной нагрузкой входного каскада в виде истоковых цепей полевых транзисторов классического каскода (рис. 1, рис. 2).

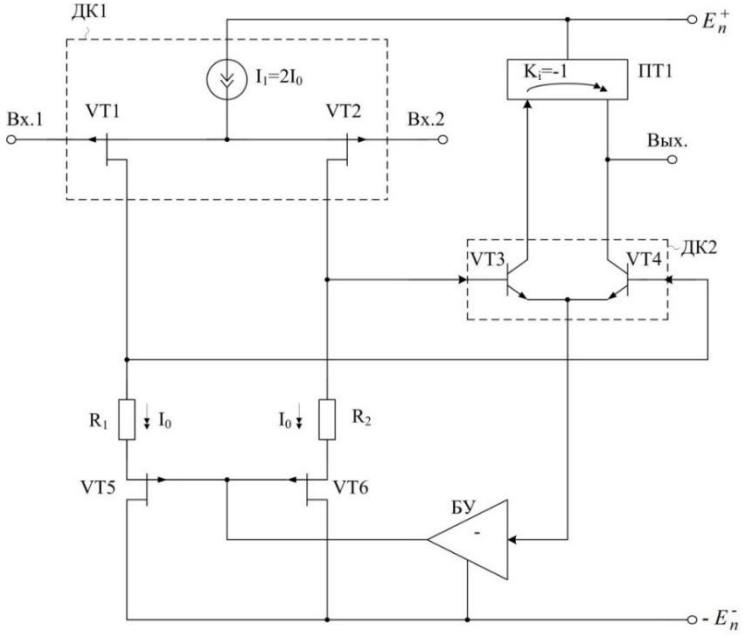



Рис. 1 - Функциональная схема предлагаемого ОУ

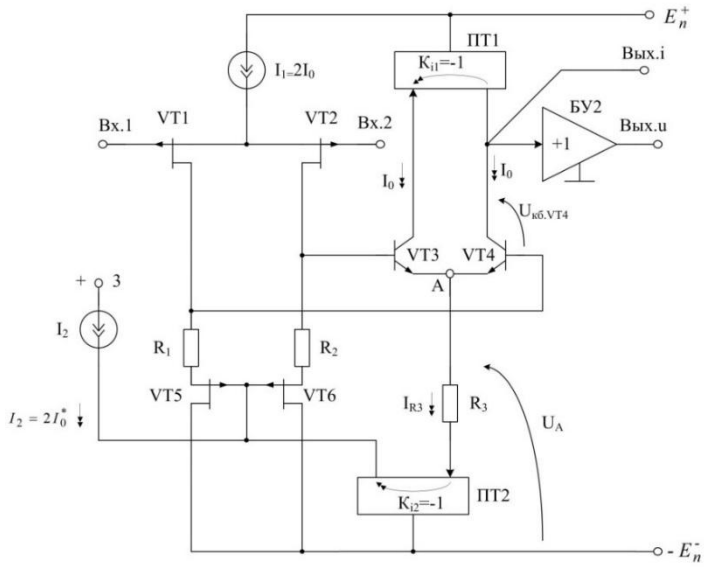



Рис. 2 - Практическая схема ОУ с отрицательной обратной связью по синфазному сигналу

В схеме ОУ (рис. 2)токи стока ($I_{ci}$) и токи коллекторов ($I_{ki}$) транзисторов определяются уравнениями:

$$I_{cVT1} = I_{cVT2} \approx 0{,}5I_1 = I_0, \quad (1)$$

$$I_{эVT3} = I_{эVT4} = I_{кVT3} = I_{кVT4} = 0{,}5I_2 = I_0^*, \quad (2)$$

$$I_{cVT5} = I_{cVT1} = I_0, \quad (3)$$

$$I_{cVT6} = I_{cVT2} = I_0, \quad (4)$$

$$I_A = I_2 = 2I_0, \quad (5)$$

где $I_1$, $I_2$– токи двухполюсников $I_1$ и $I_2$.

Заданное статическое напряжение в общей эмиттерной цепи «А» входного дифференциального каскада ДК ($U_A$) (при идеальном токовом зеркале ПТ2) устанавливается за счет отрицательной обратной связи по синфазному сигналу:

$$U_A = \frac{I_2}{K_{i2}} R_3 = \text{const}, \quad (6)$$

где $K_{i2}$ – коэффициент усиления по току токового зеркала ПТ2;

$R_3$ – сопротивление согласующего резистора $R_3$.

Таким образом, напряжение $U_A$ не зависит от статических токов стока транзисторов VT1 и VT2. Как следствие, максимальная амплитуда

отрицательного напряжения в выходном токовом узле Вых.i ($U_m^{(-)} \approx U_{кб.VT4}$) не будет существенно изменяться при изменении тока источника опорного тока $I_1$, а также напряжений затвор-исток VT6 и VT5 при воздействии температуры и радиации:

$$U_m^{(-)} = -E_n^- - U_{эб.VT4} - U_A \approx const, \quad (7)$$

где $U_{эб.VT4} \approx 0{,}7B$ - напряжение эмиттер-база транзистора VT3.

Перспективно применениерассмотренных выше схем ДК в структуре мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ), которые имеют ряд неоспоримых преимуществ в сравнении с классическими ОУ [1-3] и являются их дальнейшим развитием.

В схеме МОУ (рис. 3) за счет введениябуфераБУ3 статическое напряжение общей эмиттерной цепи «А» при глубокой отрицательной обратной связи:

$$U_A \approx U_0 = const, \quad (8)$$

где $U_0$ – опорное напряжение на неинвертирующем входе дифференциального каскада БУ3.

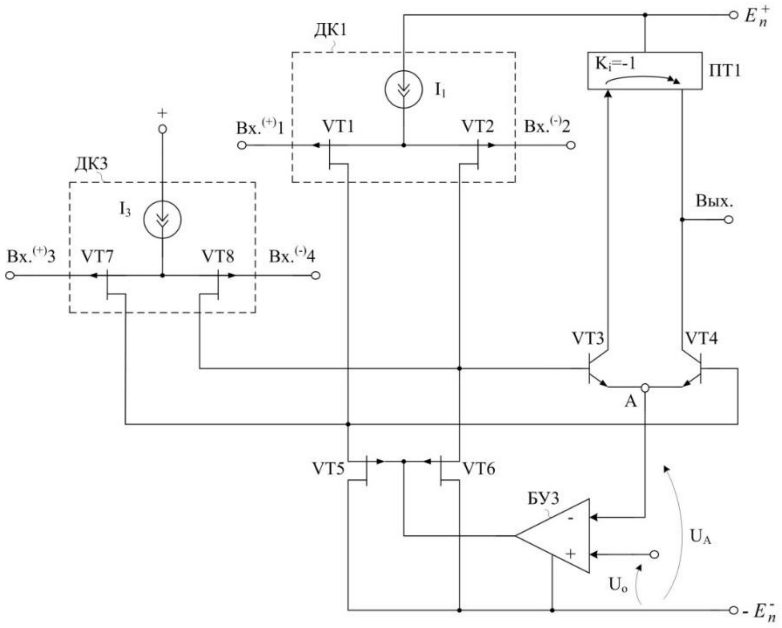
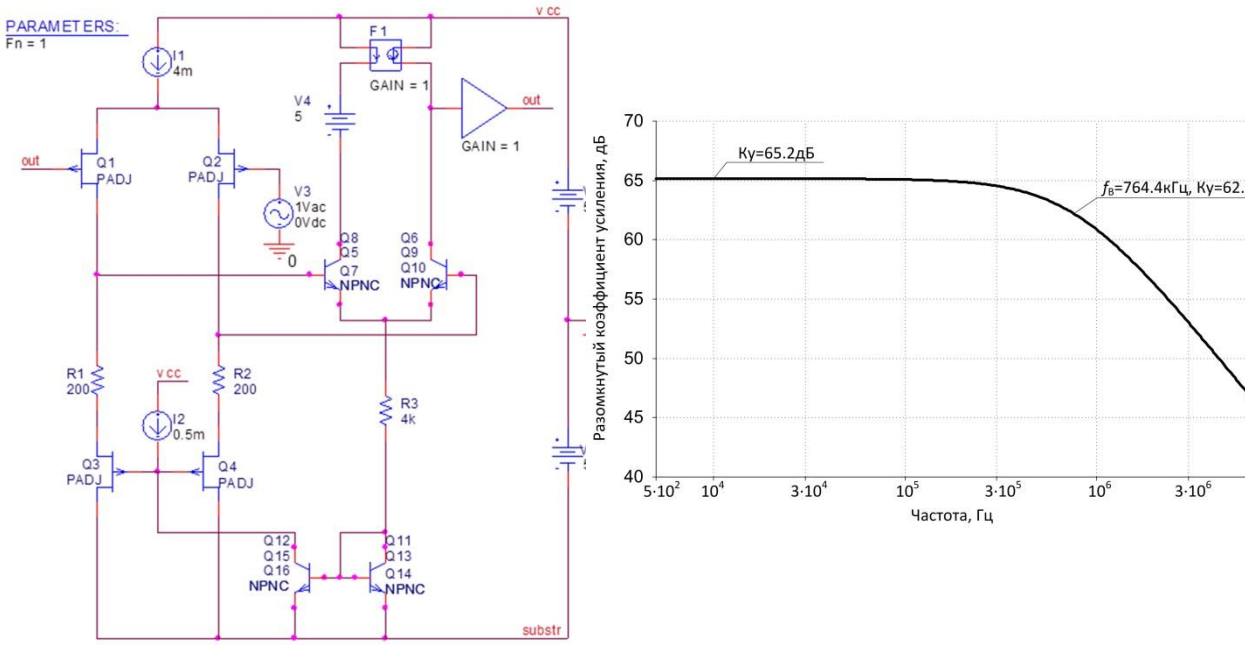



Рис. 3 - Мультидифференциальный ОУна основе схемы рис.1

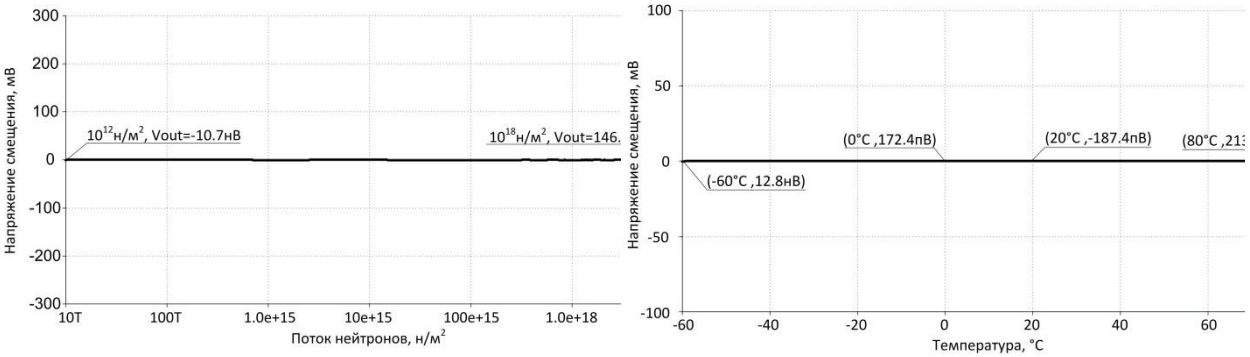
Результаты моделирование схемы ОУ рис.2 в среде PSpice на радиационно-зависимых моделях интегральных транзисторов АБМК_1_4 НПО «Интеграл» (г.Минск) представлены на рис. 4.




а) б)

Рис. 4 - Предлагаемая схема ОУ в среде PSpice (а) и её АЧХ (б)

Компьютерное моделирование показывает, что при симметрировании статического режима транзисторов Q8 и Q6 ОУ рис. 4а источником V5 (для уменьшения влияния их внутренней обратной связи на $U_{см}$), предельные параметры ОУ по величине $U_{см}$существенно улучшаются (рис.5).




а) б)

Рис. 5 - Зависимость предельных значений$U_{см}$ОУ рис.4а от потока нейтронов (а) и температуры (б)

Графики рис. 5 получены при идеальном токовом зеркале ПТ1 и идентичных транзисторах схемы. В практических схемах ОУ для получения малых значений $U_{см}$необходимо выбрать ПТ1 и БУ по численным значениям их коэффициентов слабой токовой асимметрии [4].

*Статья подготовлена по проекту № 8.374.2014/К Госзадания Минобрнауки РФ на 2014-2016 гг.*

**Список литературы**

1. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем : монография / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутчинский ; под общ. ред. д.т.н. проф. Н.Н. Прокопенко ; ФГБОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т. экономики и сервиса». – Шахты :ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – 208 с.

2. Основные свойства, параметры и базовые схемы включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, П.С. Будяков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 2 (233), 2014 г. С. 53-64

3. Основные параметры и уравнения базовых схем включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом / Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014. Сборник трудов. Часть 3 /под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. – С. 111-116

4. Архитектура и схемотехника операционных усилителей. Методы снижения напряжения смещения нуля в условиях температурных и радиационных воздействий: монография / Н.Н. Прокопенко, А.И.Серебряков // LAP Lambert Academic Publishing. – 2013. – 127с.

# Использование осциллятора Пуанкаре в задаче синергетического управления MEMS-гироскопом[1]

***А.А. Кузьменко, Д.А. Колесниченко***

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия*

**Введение.** Микроэлеткромеханические системы (MEMS-гироскопы) нашли широкое применение в автомобильной промышленности, робототехнике, системах стабилизации различных объектов массового применения – игровых приставок, смартфонов, планшетов, фото- и видеокамер и др. [1]. Вибрационный MEMS-гироскоп, представленный на рис. 1, состоит из чувствительной (эталонной) массы с двумя степенями свободы, которая может колебаться в двух перпендикулярных направлениях на плоскости под действием упругих сил, сил трения и внешней вынуждающей силы. Традиционным способом увеличения точности MEMS-гироскопа является использование резонансных свойств чувствительного элемента, когда первичные колебания возбуждаются на собственной частоте его механического резонанса. При этом его максимальная чувствительность достигается при равенстве собственных частот первичных и вторичных колебаний [1, 2]. Однако погрешности изготовления не позволяют обеспечить такую настройку с необходимой точностью. Альтернативным путем повышения точности является управление характеристиками первичных и вторичных колебаний [2–4].

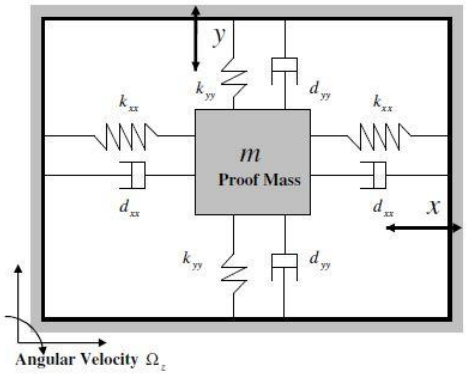



Рис.1 – Схема одноосевого вибрационного гироскопа

[1]Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-08-01008-а.

**Постановка задачи.** Рассмотрим модель одноосевого MEMS-гироскопа [3] при типовых допущениях, записанную в относительных единицах и в безразмерном времени:

$$\ddot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{K}_\mathbf{b}\mathbf{q}=\mathbf{u}-2\boldsymbol{\Omega}\dot{\mathbf{q}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{q}=\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$, $\mathbf{u}=\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\Omega}=\begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z \\ \Omega_z & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{D}=\begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{xy} & d_{yy} \end{bmatrix}$ и $\mathbf{K}_\mathbf{b}=\begin{bmatrix} \omega_x^2 & \omega_{xy} \\ \omega_{xy} & \omega_y^2 \end{bmatrix}$, $m$ – масса чувствительного элемента, $x, y$ – перемещения массы вдоль ортогональных осей, $d_{xx}, d_{xy}, d_{yy}$ – коэффициенты демпфирования подвеса, $k_{xx}, k_{xy}, k_{yy}$ – коэффициенты упругости подвеса, $u_x, u_y$ – внешние силы, действующие вдоль ортогональных осей *x* и *y* (сигналы управления), $\Omega_z$ – угловая скорость вращения основания вибрационного гироскопа (измеряемая скорость объекта).

Традиционно принято считать, что эталонные траектории движения MEMS-гироскопа $x_m = A_x \sin(\omega_1 t)$, $y_m = A_y \sin(\omega_2 t)$ формируются идеальным осциллятором:

$$\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{m}(t)+\mathbf{K}_\mathbf{m}\mathbf{q}_\mathbf{m}=0, \tag{2}$$

где $\mathbf{q}=\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix}$, $\mathbf{K}_\mathbf{m}=\begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 \end{bmatrix}$. При этом отметим, что система уравнений (2) не обладает предельным циклом, а генерируемые ей колебания имеют амплитуду, существенно зависящую от действия внешней среды.

Постановка задачи управления объектом (1) заключается в обеспечении нулевой ошибки слежения:

$$\mathbf{e}=\mathbf{q}-\mathbf{q}_\mathbf{m}. \tag{3}$$

Рассмотрим решение данной задачи с помощью метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [5] и сравним результат с одним из методов современной теории управления – адаптивным скользящим управлением [3].

**Синтез синергетического управления.** В рамках синергетической теории управления модель гироскопа (1) представим в форме Коши:

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2(t) = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - a_3 x_3 - a_4 x_4 + u_x;$$
$$\dot{x}_3(t) = x_4; \quad \dot{x}_4(t) = -a_3 x_1 - a_5 x_2 - a_6 x_3 - a_7 x_4 + u_y, \tag{4}$$

где $x_1 = x, x_2 = \dot{x}(t), x_3 = y, x_4 = \dot{y}(t)$, $a_1 = \omega_x^2$, $a_2 = d_{xx}$, $a_3 = \omega_{xy}$, $a_4 = d_{xy} - 2\Omega_z$, $a_5 = d_{xy} + 2\Omega_z$, $a_6 = \omega_y^2$, $a_7 = d_{yy}$.

В качестве эталонной модели рассмотрим модель осциллятора Пуанкаре, которая, в отличие от модели (2), обладает предельным циклом, а амплитуду колебаний не зависит от условий внешней среды и является задаваемым параметром:

$$\dot{x}_{m1}(t) = -\omega_1 x_{m2} + x_{m1}\left(A_x^2 - x_{m1}^2 - x_{m2}^2\right); \quad \dot{x}_{m2}(t) = \omega_1 x_{m1} + x_{m2}\left(A_x^2 - x_{m1}^2 - x_{m2}^2\right);$$
$$\dot{y}_{m1}(t) = -\omega_2 y_{m2} + y_{m1}\left(A_y^2 - y_{m1}^2 - y_{m2}^2\right); \quad \dot{y}_{m2}(t) = \omega_2 y_{m1} + y_{m2}\left(A_y^2 - y_{m1}^2 - y_{m2}^2\right), \tag{5}$$

где $x_m = x_{m1}, y_m = y_{m1}$ – желаемые траектории эталонной модели, $A_x, A_y$ – желаемая амплитуда колебаний по оси *x* и *y*соответственно.

В рамках метода АКАР данную цель можно сформулировать в терминах инвариантов: необходимо синтезировать законы управления $u_x, u_y$ объектом (4) в форме обратных связей, которые обеспечивают перевод изображающей точки объекта из некоторого произвольного состояния в допустимой области фазового пространства в конечное состояние, в котором обеспечивается выполнение инвариантов:

$$e_1 = x_1 - x_{m1} = 0; \; e_2 = y_1 - y_{m1} = 0, \tag{6}$$

т.е. должно обеспечиваться нулевое отклонение траекторий колебаний MEMS-гироскопа по осям *x* и *y* от соответствующих траекторий эталонных колебаний на выходе системы (5). Очевидно, что соотношения (6) эквивалентны (3). В данной постановке можно утверждать, что синергетические законы управления должны обеспечить организацию в фазовом пространстве объекта управления (6) аттракторов (7).

В соответствии с процедурой синтеза метода АКАР получим аналитические выражения для законов управления:

$$u_x = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + \left(-\omega_1 x_{m2} + x_{m1}\left(A_x^2 - x_{m1}^2 - x_{m2}^2\right)\right)\left[A_x^2 - 3x_{m1}^2 - x_{m2}^2 - \lambda_{11}\right] -$$
$$-\left(\omega_1 x_{m1} + x_{m2}\left(A_x^2 - x_{m1}^2 - x_{m2}^2\right)\right)\left(\omega_1 + x_{m1} x_{m2}\right) - x_2\lambda_{11} - \lambda_{21}\left(x_1 - x_{m1}\right); \tag{7}$$

$$u_y = a_3x_1 + a_5x_2 + a_6x_3 + a_7x_4 + \left(-\omega_2 y_{m2} + y_{m1}\left(A_y^2 - y_{m1}^2 - y_{m2}^2\right)\right)\left[A_y^2 - 3y_{m1}^2 - y_{m2}^2 - \lambda_{12}\right] - \\ -\left(\omega_2 y_{m1} + y_{m2}\left(A_y^2 - y_{m1}^2 - y_{m2}^2\right)\right)\left(\omega_2 + y_{m1}y_{m2}\right) - x_4\lambda_{12} - \lambda_{22}\left(y_1 - y_{m1}\right). \quad (8)$$

**Адаптивное скользящее управление.** В соответствии с [3] для синтеза адаптивного скользящего управления задается поверхность скольжения:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{ce},$$

где $\mathbf{c} = diag\{c_1, c_2\} > 0$ – положительно-определенная постоянная матрица.

Робастное скользящее управление $\mathbf{u}$ для (1) определяется векторным выражением [4]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{Y\theta} - \mathbf{c}\left(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_\mathbf{m}\right) - \mathbf{K}_\mathbf{m}\mathbf{q}_\mathbf{m} - \mathbf{K}_\mathbf{s}\mathbf{s} - \boldsymbol{\rho}\frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}, \quad (9)$$

где $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & 0 & -2y & x & y & 0 \\ 0 & \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & 2\dot{x}(t) & 0 & x & y \end{bmatrix}$ – функциональная матрица, $\mathbf{K}_\mathbf{s} = \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 \\ 0 & k_{s2} \end{bmatrix} > 0$, $\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix} > 0$ – постоянные матрицы, выбираемые для получения желаемого переходного процесса по выходным координатам.

К системе (9) добавляется подсистема адаптации, которая осуществляет оценку параметров модели (1):

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) = -\mathbf{mY}^\mathrm{T}\mathbf{Ps}. \quad (10)$$

Таким образом, совокупность выражений (9), (10) образует адаптивное скользящее управление.

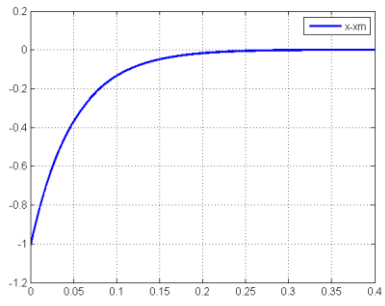



Рис. 2 – График изменения ошибки $e_1(t)$

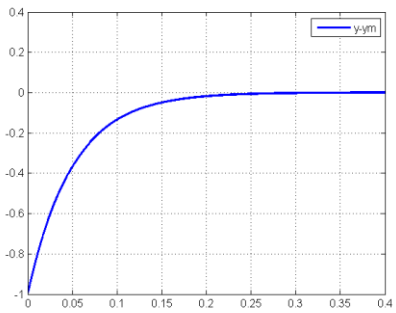



Рис. 3 – Графики изменения ошибки $e_2(t)$

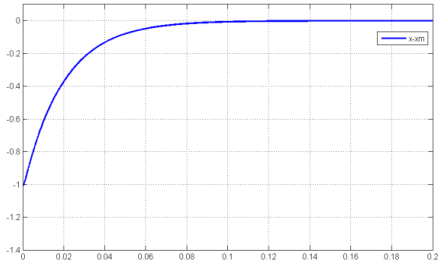


Рис. 4 – График изменения ошибки $e_1(t)$

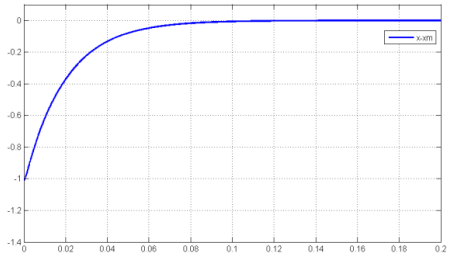


Рис. 5 – Графики изменения ошибки $e_2(t)$

**Моделирование замкнутой системы.** Выполним моделирование системы (1) с синтезированными синергетическими законами управления (7), (8) и сравним с адаптивными законами (9). Параметры MEMS-гироскопа [3]: $\omega_0 = 1\,кГц$; $\Omega_z = 5\ рад/с$; $m = 1{,}8\cdot10^{-7}\,кг$; $k_{xx} = 63{,}955\,Н/м$; $k_{yy} = 95{,}92\,Н/м$; $k_{xy} = 12{,}779\,Н/м$; $d_{xx} = 1{,}8\cdot10^{-6}\,Н\cdot с/м$; $d_{xy} = 3{,}6\cdot10^{-7}\,Н\cdot с/м$; $d_{yy} = 1{,}8\cdot10^{-6}\,Н\cdot с/м$; безразмерные параметры для системы (3): $\omega_x^2 = 355{,}3$; $\omega_y^2 = 532{,}9$; $\omega_{xy} = 70{,}99$; $d_{xx} = 0{,}01$; $d_{yy} = 0{,}01$; $\Omega_z = 0{,}1$; параметры законов управления: $k_{s1} = k_{s2} = 1000$, $\rho_1 = \rho_2 = 100$, $\mathbf{m} = diag\{10,10,10,10,10,10,10\}$, $\mathbf{P} = diag\{1000,1000\}$, $\mathbf{c} = diag\{20,20\}$, $\omega_1 = 1\,кГц$; $\omega_2 = 2\,кГц$; $A_x = 1$; $A_y = 1$; $\lambda_{11} = \lambda_{12} = 2000$; $\lambda_{21} = \lambda_{22} = 10^5$.

Результаты моделирования замкнутой системы (1) с адаптивным скользящим управлением (9) представлены на рис. 2, 3. Как видим, траектории колебаний MEMS-гироскопа по осям *x* и *y* устремляются к соответствующим траекториям эталонных колебаний – ошибки слежения равны нулю. Результаты моделирования замкнутой системы (1), (5) с синергетическими законами (7), (8) представлены на рис. 4, 5. Как видим, траектории колебаний MEMS-гироскопа по осям *x* и *y* также устремляются к соответствующим траекториям эталонных колебаний – ошибки слежения равны нулю.

**Заключение.** Итак, поставленная цель была достигнута – ошибки слежения за эталонными траекториями нулевые. Синтезированы законы синергетического управления, которые мы сравнили с законами адаптивного скользящего режима управления. Как видно из результатов

моделирования, законы управления (7), (8) и (9) приводят к практически идентичным результатам, а различие в быстродействии устранимо соответствующим выбором параметров этих законов. Однако принципиальными преимуществами синергетических законов является то, что они формируют в фазовом пространстве объекта (1) устойчивые предельные циклы, обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы в целом и непрерывные сигналы управления, в то время как адаптивное скользящее управление имеет разрывной характер (двуполярный меандр). А это, как известно, приводит к появлению паразитных вибраций, уменьшая точность MEMS-гироскопа.

**Список литературы**

1. Крекотень Ф.В. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры // Петербургский журнал электроники. – 2011. – №1. – С. 81-97.

2. Мышляев Ю.И., Финошин А.В., Мьо Т.Я. Адаптивное управление одноосным вибрационным гироскопом с интегратором // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16-19 июня 2014 г. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2014. – С. 2246-2256.

3. Fei J., Hua M., Xue Y. A Comparative Study of Adaptive Control Approaches for MEMS Gyroscope // IEEE Conference on Control Applications. –2010. – Pp. 1856-1861.

4. Fei J., Wu D. Adaptive Sliding Mode Control Using Robust Feedback Compensator for MEMS Gyroscope // Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2013.

5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

**Задачи шумоподавления в системах головных телефонов**

***К.С. Онищенко, Ж.Ю. Бондарева***

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,*
*Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

Пилоты вертолетов, водители гусеничной техники, операторы станков тяжёлой промышленности постоянно работают условиях высокого уровня внешнего шума. Однако, повысить производительность и качество труда, а также ограничить вредное влияние внешнего шума на организм человека можно введением системы шумоподавления и шумозаглушения.

Существуют методы активного и пассивного шумоподавления. Сочетания пассивного и активного шумоподавления позволяет решить подавление внешнего шума на высоком уровне.

Одной из конструктивных частей наушников являются амбушюры. В зависимости от области применения наушников, амбушюры могут иметь различную конструкцию.

В накладных наушниках с пассивной шумоизоляцией за подавление внешних шумов отвечают три фактора — материал амбушюров, сила прижатия и конструкция чашек наушников.

Материал амбушюров является ключевым фактором, определяющим степень изоляции шумов, а также и степень комфорта при их использовании.

Основные характеристики материала амбушюров – мягкость и высокое значение шумопоглощения. [1]

## Активное и пассивное шумоподавление

Активное шумоподавление достигает хороших результатов, при наличии точечного звука, и при расположении системы на пути точечного приемника. Поэтому активное шумоподавление наиболее эффективно используется в системах с использованием наушников.

Механизм активного шумоподавления заключается в следующем. В наушники встроены электретные микрофонные капсюли и схемы обратной связи. Звук, попадающий в микрофоны наушников, содержит как фоновый

шум, так и полезный акустический сигнал. Самые сильные шумовые помехи возникают на низких частотах, поэтому важные средние и высокие частоты – из которых по большей части состоит человеческая речь – отфильтровываются из сигнала. Затем электронные схемы обрабатывают оставшийся внешний шум, разворачивают его фазу на 180° и смешивают этот фазоинвертированный шум с оригинальным окружающим шумом. При этом, уровень нежелательного шума значительно снижается, но при этом компенсация не влияет на звуковые частоты человеческой речи, и четкость их воспроизведения повышается.

Наушники с пассивным шумоподавлениемэффективно подавляют шум на средних и высоких частотах, но их действенность резко снижается в низком диапазоне. Тем не менее, в наушниках закрытого типа пассивное шумоподавление снижают уровень шума больше, чем на 25дБ. Использование одновременно пассивного и активного шумоподавления позволяют ограничить влияние ВЧ и НЧ составляющих фонового шума. Суммарное затухание в результате активного и пассивного шумоподавления составляет около 30дБ сверх всего звукового диапазона.

Моделирование системы активного шумоподавления

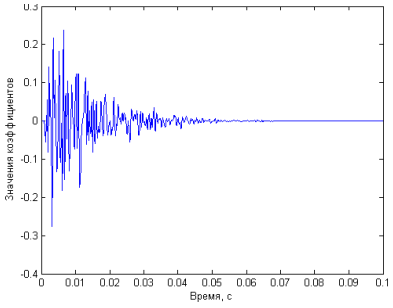
**Цель моделирования системы активного шумоподавления является создание “анти-шумового” сигнала с помощью адаптивно фильтра, который ослабит шум в определенной тихой области.**

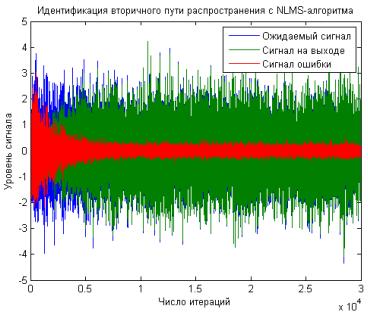
Первой задачей системы активного шумоподавления является определение импульсной характеристики пути вторичного распространения. Этот шаг обычно выполняется перед шумоподавлением с помощью синтезированного случайного сигнала, проигрываемого динамиками, при отсутствии шума. Нижеприведенные команды генерируют случайный сигнал длительностью 3,75 с, а также измеренный микрофоном сигнал с ошибкой.[2]

При сознании фильтра для оценки вторичного пути распространения используется фильтр высокого порядка, что соответствует импульсной

характеристики длиной 31 мс. Для этого понадобится любой алгоритм адаптивного КИХ–фильтра. [2]

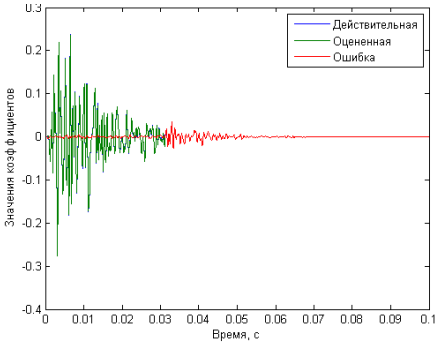
Рассчитаем алгоритмом для получения точности оценки импульсной характеристики вторичного пути (рис.1,2).

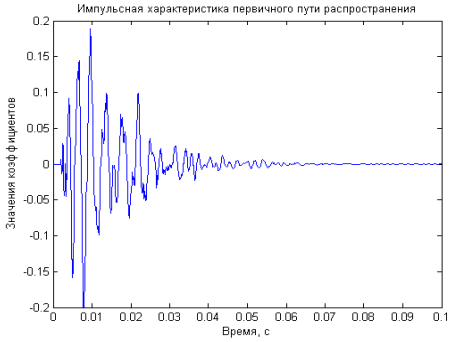



а б

Рис. 1 - (а) Импульсная характеристика вторичного пути распространения сигнала, (б) идентификация вторичного пути распространения NLMSалгоритма




а б

Рис.2 - (а)Определение импульсной характеристики вторичного пути распространения, (б) Импульсная характеристика первичного пути распространения

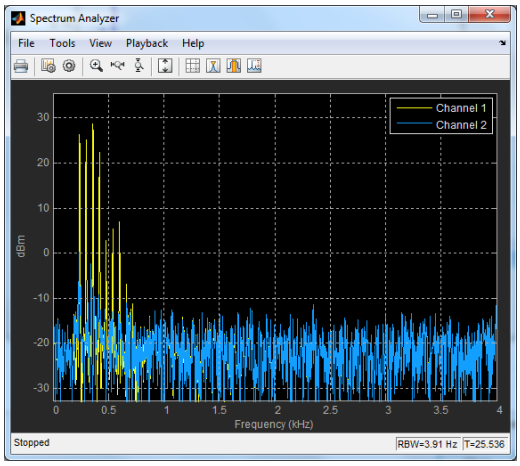



Рис. 3 - Работа системы активного шумоподавления

Результирующий алгоритм сходится примерно через 5имитационных с после включения адаптивного фильтра. Сравнивая спектры сигнала остаточной ошибки и исходного зашумленного сигнала (рис.3), можно наблюдать, что большая часть периодичных компонент была успешно подавлена.[2]

**Список литературы**

1. Амбушюры // Интернет-источник: http://stereo.ru/to/v6s02-gid-po-vyboru-naushnikov-dlya-bolshogo-goroda// Дата обращения: 10.03.2015.

2. Активное шумоподавление с помощью адаптивного КИХ-фильтра с дополнительной фильтрацией выходного сигнала // Интернет-источник: http://matlab.ru/blog/AlAn/107/// Дата обращения: 10.03.2015.

## Экспериментальные исследования широкополосных составных гидроакустических антенн на основе пьезоэлектрических преобразователей

***Ж.Ю. Бондарева***

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

Достижения современной электроники и автоматики открывают большие возможности для обработки и преобразования информации, содержащейся в акустических колебаниях, идущих от объекта контроля. Поэтому важнейшие функциональные возможности и метрологические

характеристики высокочастотной акустической исследовательской аппаратуры определяются, как правило, параметрами первичных электромеханических преобразователей — излучателей и приемников. Наиболее часто в качестве таких преобразователей используют пьезоэлектрические преобразователи самых различных типов.

Одной из важнейших характеристик пьезокерамических преобразователей является ширина полосы их рабочих частот. Широкая полоса пропускания позволяет излучать акустические сигналы требуемой формы, а также принимать и обрабатывать акустические сигналы без искажения их формы (частотного спектра), что ведет к повышению надежности и достоверности процессов исследования или контроля. В результате расширения полосы пропускания погрешность измерения геометрических размеров объектов, их координат и различных физических характеристик среды не превышает 1%. Появляется возможность плавно изменять частоту УЗ колебаний таким образом, чтобы обеспечить максимальную чувствительность прибора.

Все перечисленное является далеко не полным перечнем тех возможностей, которые открываются перед гидроакустическим оборудованием с широкополосными преобразователями. [1,2].

Создание широкополосного пьезоэлектрического преобразователя стало возможным благодаря новой конструкции его основных элементов. Выполнение преобразователя в виде прямоугольного параллелепипеда позволяет получить в широком частотном диапазоне продольные колебания, близкие к поршневым, для нечетных гармоник первой резонансной частоты. Следствием является возможность создания совмещенной гидроакустической системы дальнего обнаружения и ближней классификации объектов.

В данной работе представлен другой вариант достижения широкополосности – использование составных многоканальных разночастотных преобразователей. Реализация такой антенны описана в работе [18] и заключается в следующем. Конструкция антенны предполагает использование составного многоканального

пьезокерамического преобразователя. Каналы преобразователя разночастотны и, в зависимости от подключения, могут работать как вместе, так и раздельно. Акустические преобразователи закреплены на основании таким образом, что излучающие поверхности всех преобразователей находятся в одной плоскости. Размеры элементов подобраны таким образом, чтобы обеспечить постоянство характеристики направленности во всем диапазоне рабочих частот.

Конструкция данного макета включает в себя 5 каналов составных акустических преобразователей с различными резонансными частотами, способными работать как одновременно, так и раздельно. Резонансные частоты каналов антенны: f1 = 90 кГц, f2 = 100 кГц, f3 = 115 кГц, f4 = 122 кГц, f5 = 130 кГц. Акустические преобразователи закреплены на основании таким образом, что излучающие поверхности всех преобразователей находятся в одной плоскости. Размеры элементов подобраны таким образом, чтобы обеспечить постоянство характеристики направленности во всем диапазоне рабочих частот [3]. Эскиз предлагаемой многочастотной антенны представлен на рисунке 1.

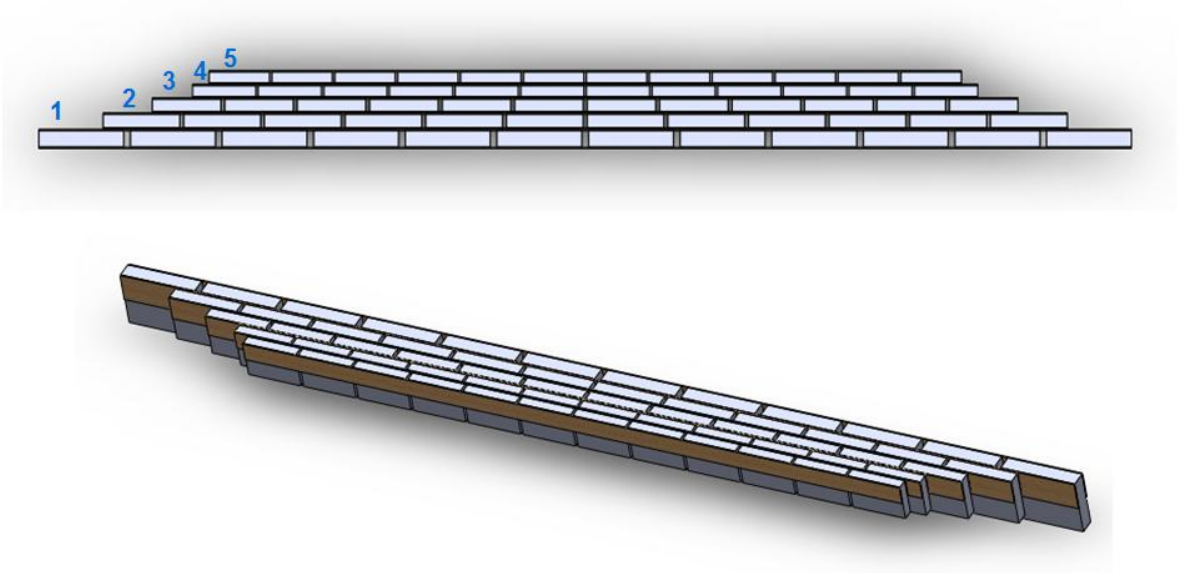
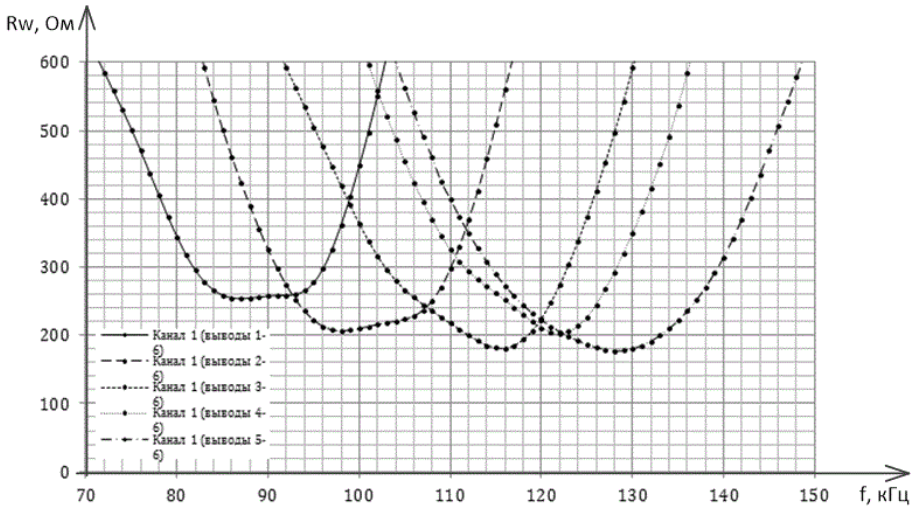


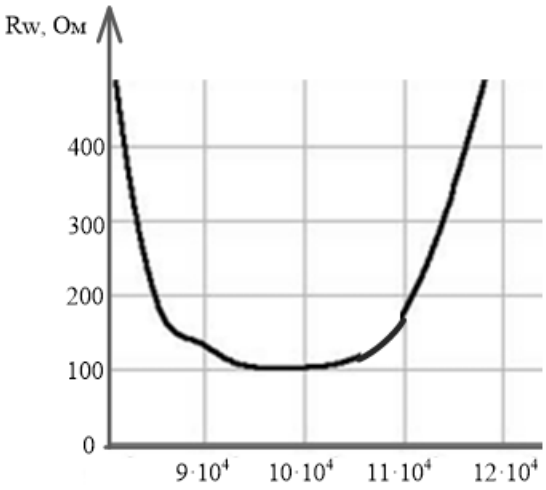

Рис. 1 - Эскиз пятиканального многочастотного преобразователя:
1 –Fр=80 кГц; 2 – Fр=90 кГц; 3 – Fр=100 кГц; 4 –Fр=110 кГц;
5 – Fр=120 кГц 3

Все измерения макета преобразователя проводились на автоматизированной установке, структурная схема которой представлена на слайде. Измерения проводились в соответствии с ОСТ 5.8361-86.

Задачей данной серии экспериментов является измерение активная составляющая полного сопротивления и динамической емкости каналов макета антенны, а также ширины главного максимума ХН. На рис. 22 представлена частотная зависимость макета антенны.




а)




б)

Рис. 2 - Резонансная кривая активного сопротивления связанных резонансных преобразователей, состоящих из разночастотных пьезокерамических элементов с резонансными частотами 90, 100, 110, 115 и 120 кГц: а – теоретические значения; б – экспериментальные данные

Анализируя полученные данные можно заключить следующее. Использование составных разночастотных преобразователей является одним из наиболее эффективных методов расширения полосы пропускания пьезокерамических преобразователей. Меняя количество и размеры преобразователей каждой частоты, можно манипулировать диаграммами направленности антенн разных частот, таким образом, чтобы они максимально приблизились или полностью совпали в пространстве лоцирования. Данный метод может существенно повысить эффективность работы преобразователя наиболее экономичным методом.

**Список литературы**

1. Королев М.В., Карпельсон А.Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: «Машиностроение», 1982г.-157 с.

2. Патент на полезную модель №105470, Максимов В.Н., Воронин В.А., Тарасов С.П., Пивнев П.П., Акустический тракт гидролокатора бокового обзора.

3. Кравчук Д.А., Маркова И.Н., Пивнев П.П., Экспериментальные исследования электроакустических характеристик пьезоэлементов антенн для гидроакустических систем различного назначения. Сборник трудов SWorld 2012г. Т.1 №1-с.28-29.

## Экспериментальные исследования расширения полосы пропускания демпфированных пьезоэлектрических преобразователей гидроакустических антенн

***Ж.Ю. Бондарева, В.А. Обыденная***

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,*
*Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

В последнее время в качестве таких преобразователей используют пьезоэлектрические преобразователи различных видов и модификаций. В зависимости от требований, которые применяются к измерительной аппаратуре, с ее помощью преобразуются различные сигналы, которые отличаются по амплитуде, длительности, форме.

Одной из важнейших параметров ультразвуковых измерительных систем является ширина полосы рабочих частот, отсюда следует, что широкую полосу частот и должны иметь сами преобразователи, выполняющие важные спектрометрические задачи, иначе становится затруднительным прием и излучение коротких импульсов, поскольку недостаточная полоса пропускания преобразователя приводит к искажению формы сигнала и потере его составляющих.

В настоящее время в современных отечественных и зарубежных гидроакустических устройствах, дефектоскопах, толщиномерах и во многих других акустических приборах для расширения полосы пропускания электроакустического тракта применяется различные способы демпфирование пьезокерамических элементов.

В настоящее время используют два основных метода демпфирования преобразователей:механическое и электрическое демпфирование.

В данной работе представлено влияние добротности пьезокерамического преобразователя на полосу пропускания стержневых пьезоэлектрических элементов путем их демпфирования. Жесткая связь с демпфером приводит к тому, что после окончания действия возбуждающего электрического или принимаемого звуковых импульсов импульса свободные колебания пьезоэлемента быстро затухают, причем тем быстрее, чем меньше разница между импедансами демпфера и пьезоэлемента.

Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания.

Добротность преобразователя рассчитывается по формуле (1):

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

где ω– циклическая частота системы, [Гц];

L – индуктивность контура, [Гн];

R – сопротивление контура, [Ом];

C – ёмкость заторможенного контура, [Ф];

$C_0$ – ёмкость свободного контура, [Ф];

$k_{31}$ =0,45 – коэффициент электромеханической связи;

Изменение ширины приклеиваемого демпфера оказывает заметное влияние на полосу пропускания преобразователей. Зависимости, полученные в результате измерения электроакустических параметров макетного образца, приведены на рисунке 2.

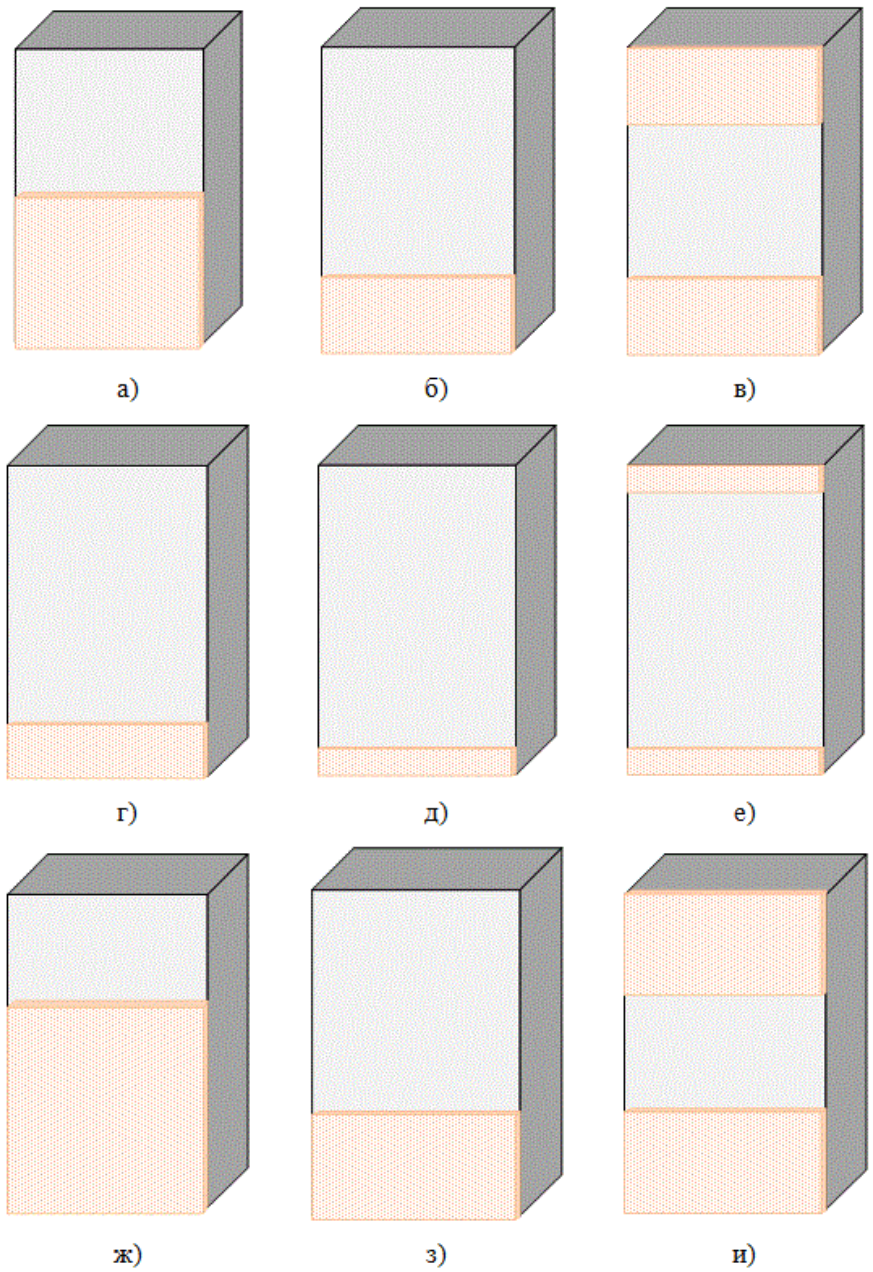



Рис. 1 - Варианты механического демпфирования преобразователей

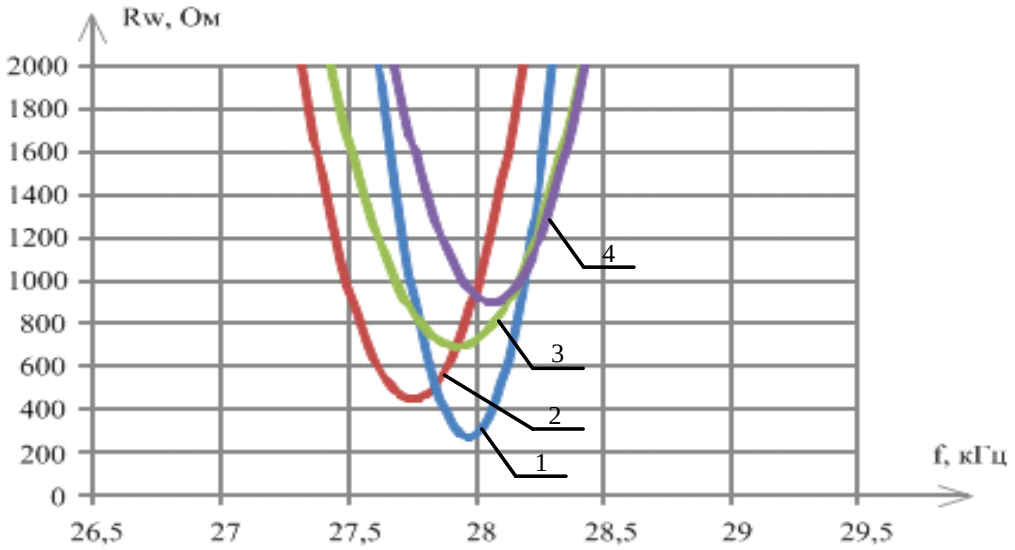



Рис. 2 - Частотные зависимости активной составляющей полногосопротивления пьезоэлементов

Таблица 1– Значения рассчитанных и измеренных величин Q и Δf

| Исследуемые параметры | Свободный элемент | Длина демпфера относительно длины элемента *l* | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *l/3* | *l/2* | *2l/3* |
| Значение Q | 4,389 | 4,25 | 4,207 | 4,128 |
| Значение Δf, кГц | 0,422 | 0,512 | 0,605 | 0,751 |

На основании полученных результатов был проведен анализ изменения ширины пропускания преобразователей в зависимости от величины приклеенной планки, результат представлен на рисунке 3.

На данном рисунке отражено влияние ширины демпфера на ширину полосы пропускания. Зависимость ширины полосы пропускания от ширины демпфера приближается к линейному закону.

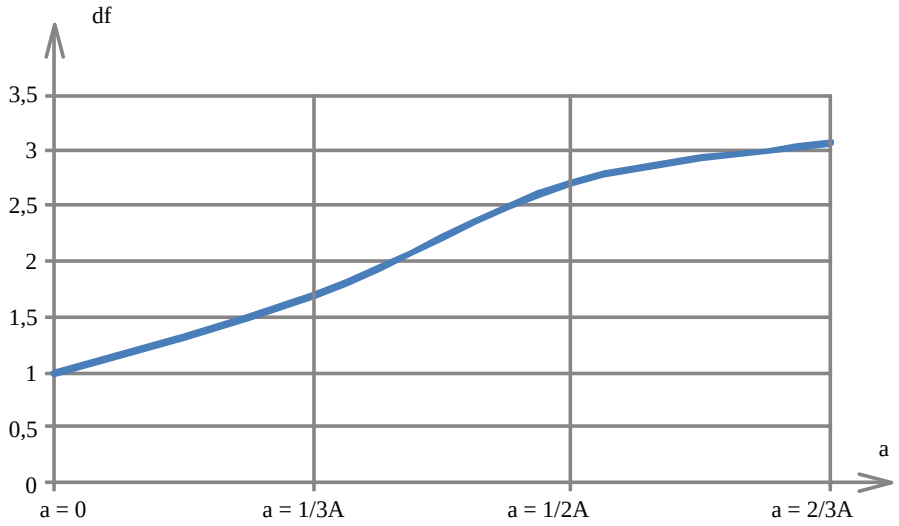



Рис.3 - Зависимость ширины пропускания от ширины планок

Эксперимент показал, что уменьшение добротности приводит к расширению полосы пропускания пьезоэлектрического преобразователя. Уменьшение добротности можно достичь путём приклеивания к пьезоэлементу стеклотекстолитовых планок. Теоретический расчет показал, что уменьшение добротности за счет увеличения длины планок ведет к увеличению ширины преобразователя. Следует отметить, что наиболее интенсивный полоса пропускания наблюдается до достижения значения длины планки, равного *l/2*.

**Список литературы**

1. Шарапов В.м., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики/ Под ред. Шарапова В.М. –М.: Техносфера, 2006, 632 с.;

2. Шарапов В.М., Минаев И.Г. , Бондаренко Ю.Ю., и др. Пьезоэлектрические преобразователи (Справочное пособие)/ Под редак. Шарапова В.М. Черкассы: ЧГТУ, 2004, 435 с.;

*3.* Тарасов С.П., Воронин В.А., Пивнев П.П. Особенности построения широкополосных антенн систем передачи данных малогабаритных автономных подводных аппаратов// XXII научно-техническая конференция, посвященная шестидесятилетию НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова, г. Жуковский, 2015.

**Параметрический профилограф для мониторинга мелководных районов мирового океана**

***М.Е. Мищукова, В.А. Обыденная, А.О.Гацев***

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,*
*Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

Решение актуальных задач в геоакустике, сейсмоакустике и геологии на шельфе моря, связанных с исследованием и анализом донных структур, с целью поиска полезных ископаемых, строительством гидросооружений, подводных трубопроводов, оценки иловых загрязнений для экологического контроля и т.д. наиболее оптимально использовать параметрический профилограф. Все антропогенные воздействия располагающихся в придонном слое акваторий, так или иначе, определяют структуру поверхности дна и характер ее изменения во времени. Исследование заиленных малоразмерных объектов представляет собой сложную научно-техническую задачу, которая может решаться в основном гидроакустическими методами.

Общим принципиальным достоинством параметрических узколучевых профилографов является то, что один и тот же участок среды в пределах узкого луча, одинакового на всех частотах, озвучивается с большим пространственным разрешением, обеспечивая достоверное измерение параметров, обнаружение малоразмерных заиленных объектов в условиях сильной донной реверберации и отражений от тел, таких, например, как валуны и камни. Не высокий энергетический потенциал параметрического излучателя может быть скомпенсирован использованием ЛЧМ сигналов с большой базой и соответствующей временной обработкой в приеме.

Возможно применение параметрического профилографа для поиска трубопроводов, закрытых слоем ила или донного грунта, наблюдения за их состоянием и контроля их положения. Поскольку толщина ила над трубопроводом, как правило, не велика, необходимо использовать высоконаправленных систем для получения высокого разрешения, так как эхо-сигналы от заиленной трубы будут маскироваться более сильными отражениями от дна, обусловленные краем широкой характеристики направленности антенны.

Принцип действия параметрического профилографа основан на нелинейном взаимодействии акустических волн, это дает возможность изучить с высоким разрешением структуру донных осадков и получить сведения о характере донного грунта.

Одним из наиболее важных элементов параметрического профилографа является параметрическая антенна, которая позволяет за счет своей широкополостности, высокой направленности и низкого уровня бокового поля существенно увеличить отношение сигнал/помеха в сложной помеховой обстановке, свести к минимуму уровни донной и объемной реверберации в грунте и повысить информативность.

Важной часть параметрической антенны является антенна накачки, представляющая собой антенную решетку, состоящую из двух подрешеток из элементов с разными резонансными частотами. Подрешетки вставлены друг в друга так, что элементы располагаются в порядке чередования типов. Вокруг антенной решетки располагается приемная антенна в форме кольца. Обе антенны помещены в обтекатель. Антенна параметрического профилографа, разработанная на каф. ЭГАиМТ ИНЭП ЮФУ, представлена на рис. 1.

Рис. 1 -Антенна параметрического профилографа

Параметрический профилограф позволяет излучать сигналы накачки на частотах 150 кГц. Диапазон разностных частот составляет 5-20 кГц. При этом "озвученный" объем на разных частотах будет одинаковым благодаря постоянству характеристики направленности антенны в широком частотном диапазоне. В зависимости от состава грунта и его акустических

свойств (ил, илистая глина, песок и т.д.) глубина профилирования до 200 м с проникновением в грунт до 25 м.

На рис. 2 приведена профилограмма участка шельфа Черного моря в районе бухты Рыбацкой (г. Геленджик).

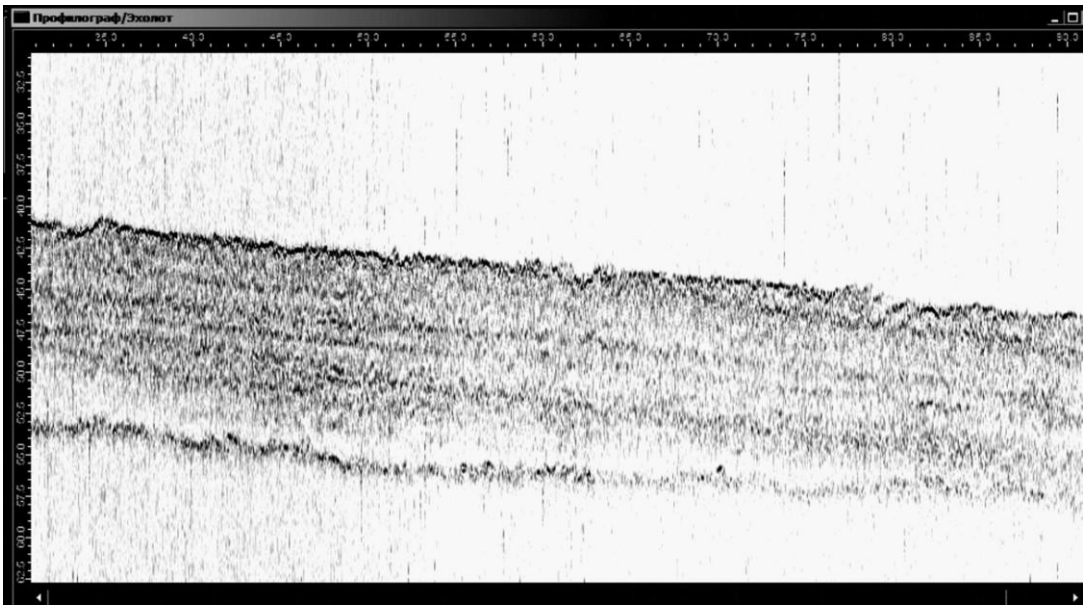



Рис. 2 - Профилограмма участка дна Черного моря

Увеличение дистанции зондирования слоев достигаетсяувеличением длительности импульса без изменения мощности, а увеличение разрешающей способности профилографа по дальности - увеличением девиации частоты.

Параметрический профилограф используют так же в комплексе с гидролокатором бокового обзора для получения 3D модели исследуемого участка дна. Исследуемая площадь покрывается сеткой галсов судна, на борту которого установлена аппаратура гидролокаторов бокового обзора и параметрического профилографа сприемоизлучающей антенной системой. Своеобразная карта дна исследуемого района получается в результате вторичной обработки, которая представляет собой панорамы дна и вертикальных разрезов. Она и позволяет оценить структуру, тип, состав донных осадков, а также определить их изменчивость.

Исходя из этого, в определенных местах (количество точек определяется периодом изменчивости структуры дна) берутся пробы донного грунта с помощью геологических трубок, которые подвергаются подробному физико-химическому анализу.

Параметрический профилограф имеет широкие перспективы дальнейшего развития и совершенствования, а также является необходимой составляющей для изучения структуры донных отложений. Он позволяет отслеживать изменение состояния трубопровода под слоем ила, непосредственно для проведения их ремонта и обслуживания, что является одной из важных проблем в настоящее время.

Комплекс, в состав которого входит гидролокатор бокового обзора и параметрический профилограф, позволяет не только фиксировать с высоким разрешением состояние, структуру и рельеф дна водоемов, получать сведения о свойствах и составе донного грунта, но и получать сведения об экологическом состоянии среды на достаточно больших акваториях и значительно сократить время проведения экологического мониторинга. Поэтому для целей экологического мониторинга данный гидроакустический комплекс является наиболее удобным по многим параметрам.

**Список литературы**

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.

2. Воронин В.А., Ходотов А.В., Скнаря А.В., Тарасов С.П., Трусилов В.Т. Использование гидролокатора бокового обзора со сложным сигналом для экологического мониторинга дна и инженерных подводных сооружений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2004 – море и человек»: Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием. – Таганрог: ТРТУ, 2004. №5 (40). – С. 80-82.

3. Гамильтон Э.Л. Геоакустические модели морского дна. В кн. Акустика морских осадков. Пер. с англ. М, Мир, 1977.

4. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие. - Калининград: Калининград, ун-т, 1997. — 150 с.

5. Ховем К М. Поглощение звука в морских осадках. Акустика дна океана. - М,: Мир, 1984.-454 с.

# Акустические пьезоэлектрические преобразователи для многолучевых ультразвуковых расходомеров газа

***О.М. Богуш, Д.Г. Макаров, Э.М. Пикалев, С.А. Толмачев***

*ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону, Россия*

Принцип действия ультразвукового расходомера газа основан на время-импульсном методе измерения [1]: измеряется время прохождения ультразвукового (УЗ) сигнала, распространяющегося под углом к направлению газового потока. Разность времен распространения сигнала, направленного по потоку и против потока позволяет определить среднюю скорость потока и, следовательно, вычислить его расход.

Важным требованием газовой расходометрии является повышение точности измерения расхода газа. Это, в частности, достигается применением многолучевых расходомеров с параллельными или скрещенными лучами ультразвука [2, 3]. Поскольку скорость потока газа не постоянна по сечению трубопровода, многолучевые схемы измерения позволяют достичь значительно большей точности измерения расхода по сравнению с однолучевыми. Каждый из УЗ лучей осуществляется парой идентичных пьезоэлектрических преобразователей (ПП), которые поочередно работают в режимах излучения и приема УЗ сигнала.

При разработке ПП для многолучевых расходомеров важной проблемой является миниатюризация ПП: для обеспечения размещения 2 – 4 датчиков в одном ряду на узле трубопровода размеры датчика должны быть по возможности малыми. Уменьшение размеров ПП связано с повышением рабочей частоты и снижением чувствительности, т.е., коэффициента преобразования $K_{vv}$ – отношения амплитуды выходного сигнала на приемнике к амплитуде входного сигнала на излучателе.

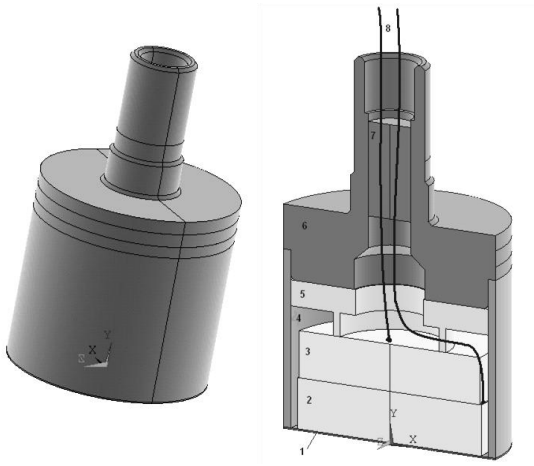
Кроме того, разработка ПП предполагает решение проблем устойчивости ПП к высоким давлениям, расширения температурного рабочего диапазона, повышения помехоустойчивости, расширения динамического диапазона измерений.

Типичная конструкция акустического ПП для газовых расходомеров показана на рис. 1. Преобразователь содержит металлический корпус,

имеющий цилиндрическую полость с замыкающей стенкой (мембраной) на одном конце и открытую на противоположном конце, в которой соосно полости последовательно от мембраны размещены протектор, пьезоэлемент, опорное кольцо и ниппель с отверстием, а также проводники, соединяющие электроды пьезоэлемента с сигнальным кабелем или разъемом. Мембрана может быть сделана за одно целое с корпусом или соединена с ним по контуру сваркой. Пьезоэлемент соединен с мембраной через протектор из материала с низким акустическим сопротивлением, изготовленного на основе эпоксидной смолы с наполнителем из порошка полых стеклосфер. При этом оптимальные размеры пьезоэлемента, протектора, корпуса, опоры подбираются путем моделирования устройства методом конечных элементов [1,4] таким образом, чтобы на рабочей частоте, приблизительно соответствующей радиальному резонансу пьезоэлемента, на поверхности мембраны возбуждались колебания осевого направления, передающие акустическую волну в газовую среду.

Проектирование ПП осуществляется с применением метода конечных элементов, позволяющего исследовать преобразователь как единое неоднородное электроупругое тело со сложной геометрией.

Основная роль в процессе преобразования электрической энергии в звуковую и обратно принадлежит пакету пьезоэлемент-протектор. При подаче на свободный пьезоэлектрический диск гармонического электрического сигнала пьезоэлемент наиболее эффективно возбуждается на частоте радиального резонанса $f_r$. Эта частота в основном определяется радиусом пьезоэлектрического диска. Для тонких пьезоэлементов (толщина диска мала по сравнению с его радиусом) частота $f_r$ обратно пропорциональна радиусу и практически не зависит от толщины диска, однако при толщине, сравнимой с радиусом, частота $f_r$ существенно отклоняется от обратной пропорциональности в сторону понижения частоты.




а б

Рис. 1 - Внешний вид (а) и конструкция преобразователя (б): 1 – мембрана; 2 – протектор; 3 – пьезоэлемент; 4 – гильза; 5 – втулка с опорным кольцом; 6 – основание; 7 – пробка; 8 – проводники.

Протектор – диск того же радиуса, изготовленный из материала с малым акустическим импедансом для наилучшего согласования с газовой средой. В протекторе, жестко связанном с пьезоэлементом, происходит преобразование радиальных колебаний пьезоэлемента в осевые колебания свободной поверхности протектора, которая, таким образом, становится излучателем акустического сигнала в среду, контактирующую с этой поверхностью. Толщину протектора следует подобрать таким образом, чтобы амплитуда средних смещений излучающей поверхности на рабочей частоте была максимальной. Протектор при этом совершает сложное колебательное движение, включающее в себя как радиальные, так и осевые смещения. Поэтому определить его оптимальную толщину с помощью аналитических вычислений не представляется возможным. Однако, моделирование и исследование пакета с помощью метода конечных элементов позволяет путем варьирования размеров найти оптимальный вариант.

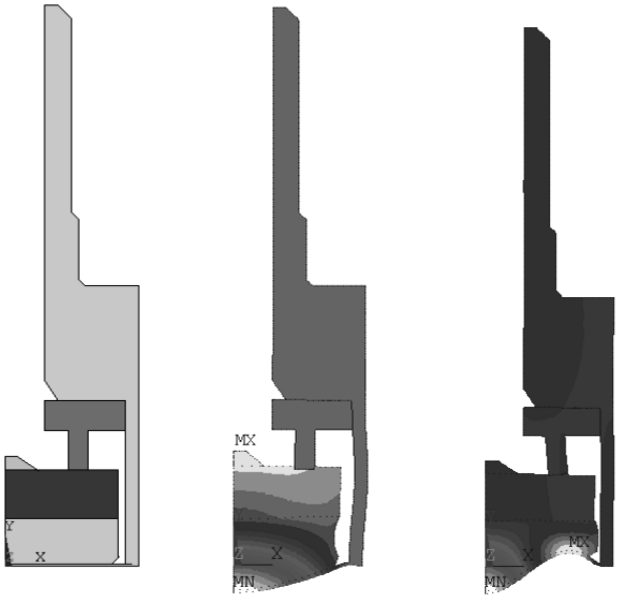
Аналитический расчет для предельного случая слоистой системы с тонкими слоями (толщина слоя намного меньше диаметра пакета) дает, как известно [5], величину $\lambda/4$ в качестве оптимальной толщины согласующего слоя – протектора ($\lambda$ – длина продольной волны в материале протектора).

Однако, когда толщина слоя соизмерима с диаметром пакета, величина λ/4 может служить лишь грубой оценкой толщины протектора, а действительная его оптимальная толщина должна определяться расчетами конечно-элементной модели преобразователя.

Важными деталями преобразователя, играющими существенную роль в формировании акустического сигнала, являются мембрана и гильза. Они образуют металлическую цилиндрическую полость, в которой размещается пакет пьезоэлемент-протектор. В процессе сборки преобразователя пакет вставляется в полость гильзы соосно ей, поджимается основанием к мембране, и гильза соединяется сварным швом с основанием в таком механически напряженном состоянии, что обеспечивает сохранение механического контакта между протектором и мембраной после снятия внешних прижимающих сил. Мембрана выполнена из металлического листа малой толщины (0,2 мм), и в процессе возбуждения звуковых колебаний передает их в контролируемую газовую среду, а в режиме приема передает колебания давления газовой среды на протектор и далее на пьезоэлемент. Благодаря малой толщине мембраны, она не вносит больших изменений в согласование акустических импедансов протектора и газовой среды, но в то же время обеспечивает герметичность преобразователя относительно контролируемой среды и охраняет поверхность протектора от ее разрушительных воздействий.

Исследование модели ПП методом конечных элементов позволяет подобрать геометрические размеры деталей ПП таким образом, чтобы в излучателе наиболее эффективно осуществлялось преобразование электрического сигнала в акустический, а в приемнике – обратное преобразование. При этом в колебательных процессах участвует вся совокупность деталей. Метод конечных элементов дает возможность визуализировать характер колебаний ПП и выбирать наиболее эффективный режим его работы, рис. 2.Далее, проводится исследование частотных характеристик конечно-элементных моделей. При этом:

1) рассчитываются частотные характеристики проводимости преобразователя, что позволяет непосредственно сопоставить расчетные данные с экспериментом и внести необходимые коррективы в модель;




а б в

Рис. 2 - Геометрическая модель преобразователя (а) и характер его колебаний на рабочей моде (б) и на одной из собственных мод с менее эффективным излучением (в)

2) рассчитывается частотная характеристика излучателя $U_{ср}(f)$, где $U_{ср}$ – среднее смещение мембраны излучающего преобразователя в осевом направлении при подаче на его электроды гармонического напряжения единичной амплитуды;

3) рассчитывается частотная характеристика приемника V(f), где V – амплитуда напряжения на электродах приемника при действии на его мембрану гармонического давления единичной амплитуды;

4) вычисляется частотная характеристика результирующего коэффициента преобразования $K_{vv}(f)$ как произведение двух частотных характеристик

$$K_{vv}(f) = B \cdot U_{ср}(f) \cdot V(f) \cdot f^2,$$

где B – некоторый нормирующий коэффициент, зависящий от диаметра мембраны D, расстояния между мембранами излучателя и

приемника L и плотности газа ρ: B = $\pi^2 D^2$ ρ / L. Коэффициент преобразования рассчитывается для стандартного расстояния L = 300 мм.

Этапы 2 – 4 иллюстрируются примером частотных характеристик на рис. 3.

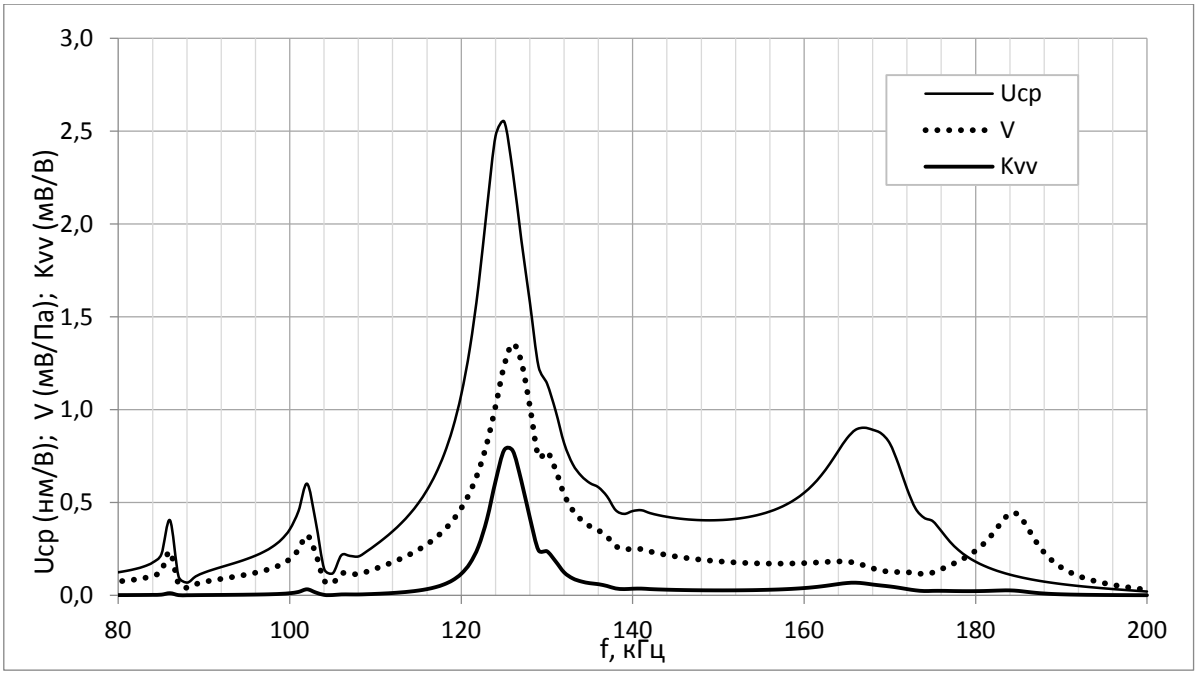



Рис. 3. Иллюстрация метода исследования частотных характеристик: расчетные характеристики излучения $U_{ср}(f)$, приема V(f) и вычисленная на их основе характеристика результирующего коэффициента преобразования $K_{vv}(f)$.

Для достижения поставленной цели подбирается совокупность размеров преобразователя, при которых частотная характеристика $K_{vv}(f)$ имеет вид уединенного доминирующего пика с достаточно высоким максимальным значением. Проводимые нами в течение ряда лет разработки и исследования акустических ПП позволяют представить некоторую сводку результатов в виде диаграмм, рис. 4, отражающих корреляцию между размерами ПП (диаметром датчика D), рабочими частотами f и коэффициентами преобразования $K_{vv}$. Как отмечалось выше, уменьшение размеров связано с ростом рабочей частоты и снижением коэффициента преобразования $K_{vv}$.

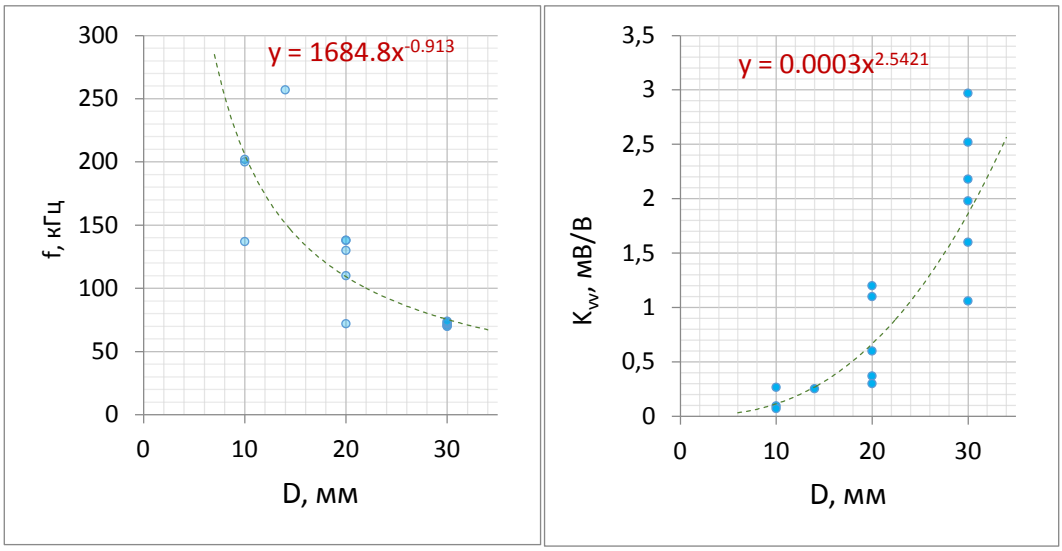
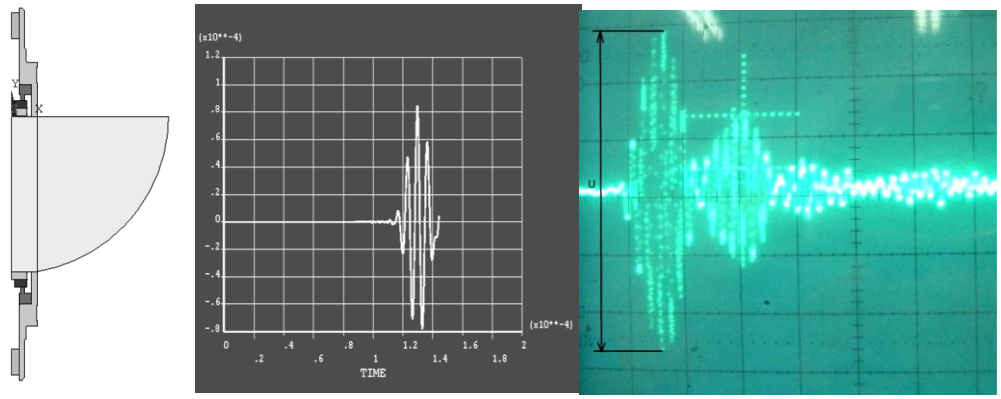



Рис. 4 - Корреляция между диаметром ПП, рабочей частотой f и коэффициентом преобразования $K_{vv}$ для различных моделей преобразователей. Показаны линии тренда, аппроксимируемые степенными функциями.

На пути миниатюризации ПП разработана модель преобразователя с внешним диаметром гильзы 14 мм и диаметром пьезоэлемента 8.2 мм, имеющего рабочую частоту 260 кГц и коэффициент преобразования 0.26 мВ/В. На основе этой модели изготавливаются пьезопреобразователи ПП-228, характеристики которых близки к расчетным. Эти ПП успешно используются на предприятии «Турбулентность». Рассчитана также модель датчика с внешним диаметром гильзы 10 мм и диаметром пьезоэлемента 6.8 мм, имеющего рабочую частоту 200 кГц и коэффициент преобразования 0.26 мВ/В.

Для расчета импульсных характеристик строится модель двух идентичных встречно направленных ПП, разделенных газовой средой. На рис. 6а показана половина осевого разреза такой модели. Газ заполняет объем полусферы с центром на мембране излучателя. На сферической поверхности задается граничное условие единичного импеданса, благодаря чему акустические волны проходят эту поверхность без отражения, что имитирует бесконечную газовую среду. В момент времени t = 0 на электроды излучателя подается прямоугольный импульс напряжения единичной амплитуды, длительность которого равна половине периода

рабочей частоты. Когда акустические волны, возбужденные этим импульсом, достигают мембраны приемника, они вызывают в нем электрический сигнал, по которому регистрируется время прохождения импульса, рис. 6 б, в.




а б в

Рис. 5. а – геометрическая модель двух преобразователей – излучателя и приемника; б – расчетная форма сигнала на приемнике при импульсном возбуждении излучателя; в – экспериментально полученный сигнал на приемнике

При лабораторных испытаниях серии преобразователей ПП-228 установлено:

- рабочая частота пьезоэлектрических преобразователей ПП-228 определенная в гармоническом режиме составляет 260±5кГц.
- электрическая емкостьпреобразователей составляет в среднем 914 пФ.
- коэффициент преобразования в гармоническом режиме с мягким закреплением ПП на расстоянии 200 мм составляет в среднем 0.5 мВ/В.
- коэффициент преобразования в импульсном режиме с мягким закреплением ПП составляет 0.15 мВ/В на частоте 251,4 кГц. В жестком закреплении ПП на частоте 251,4 кГц средний коэффициент преобразования 0.26 мВ/В на расстоянии 80 мм.
- время затухания сигнала до уровня шумов около100 мкс.

ПП-228 испытывались давлением 16 МПа. Коэффициент преобразования практически не изменился после проверки давлением.

В заключении отметим, что многолетние разработки акустических ПП для газовых расходомеров, ведущиеся в ООО «Пьезоэлектрик», привели к созданию ряда моделей ПП, имеющих высокие технические характеристики. Изделия выпускаются большими сериями и успешно работают в составе газовых расходомеров. В то же время потребители выдвигают новые требования по расширению границ применения ПП по температуре среды, давлению, по расширению динамического диапазона, повышению точности измерений, прочности, надежности и т. п., что требует постоянного совершенствования конструкций. Отработанная методика расчета конструкций ПП с применением метода конечных элементов успешно зарекомендовала себя при этих разработках и дает возможность дальнейшего прогресса в совершенствовании датчиков для газовой расходометрии.

**Список литературы**

1. М. В. Богуш. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М.: Техносфера, 2014.

2. I. Krajcin, M. Uhrig, A. Wrath, T. Dietz, V. Hermann. Impact of regulator noise on ultrasonic flow meters in natural gas. NSFMW2007_Impact_Of_Regulator_Noise_On_Ultrasonic_Flow_Meters.pdf, 2015

3. V. Hermann, T. Dietz. Low pressure gas measurement using ultrasonic technology,2015

4. ISHM2008_LowPressMeasurement_by_UltrasonicTech_en.pdf, 2015

5. ANSYS, Theory Ref. Rel. 8.0 / Ed. P. Kothnke // ANSYS, Inc. Houston, 2003.

6. Г. Кайно. Акустические волны. М.: Мир, 1990.

## Вихревые расходомеры газа и пара

***М.В. Богуш***

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

Как правило, все вихревые расходомеры газа, созданные на основе пьезоэлектрических датчиков генераторного типа, являются и расходомерами пара. Этим они выгодно отличаются от расходомеров, основанных на других физических принципах – анемометрических, индуктивных, ультразвуковых. Для измерения расхода пара необходимо обеспечить термостойкость конструктивных элементов датчика расхода и ввести в вычислитель программу расчетамассы пара и переносимой им тепловой энергии.

На рис.1 показаны пьезоэлектрические датчики и созданные на их основе российские вихревые расходомеры пара, а в таблице 1 их основные технические характеристики [1-5].

Вихревые датчики расхода российских приборов в различной степени удовлетворяют требованиям термостойкости. Например, в счетчиках «Dymetic-9421» и «Метран-331» максимальная рабочая температура энергоносителя ограничена 200$^{o}$C [2,3], что обусловлено термостойкостью тензопреобразователя LHP-2,5 канала измерения избыточного давления.

Если в пьезоэлектрических датчиках, регистрирующих процесс вихреобразования, используется высокочувствительная керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС), например, датчики 014М, 108М, 018М, 019М [6], то термостойкость таких изделий не превышает 250-300$^{o}$C. К таким приборам относятся все счетчики, указанные в таблице 1, кроме«Ирга-РВ» в специальном исполнении.

В то же время, если в счетчике пара применяются пьезоэлектрические датчики, выполненные на основе малочувствительной, но термостойкой керамики на основе титаната висмута (ТВ), например, датчики давления 019М или 020М [6], то рабочая температура пара может достигать 500$^{O}$C и выше.

# Пьезоэлектрические датчики и вихревые расходомеры на их основе

Рис.1 - Пьезоэлектрические датчики и вихревые расходомеры газа и пара на их основе

Таблица 1. Основные характеристики российских вихревых расходомеров пара

| Характеристика | Тип счетчика пара | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | СВП. М «Сибна» | Dymetic-9431 «Даймет» | Метран-331 «Метран» | Ирга-РВ «Глобус» | Ирвис-Р4 «Ирвис» | Эмис-Вихрь-200 «Эмис» |
| Диапазон типоразмеров, $D_y$ мм | 50 -200 | 32 -150 | 32 -150 | 32-300<br>20 – 800* | 25-300 | 25-300 |
| Диапазон измерения расхода по всем типоразмерам, $м^3$/ч (т/ч) | 1-1000<br>(0,005 – 60) | 5- 5200 | 5-5200 | 4-10000<br>1,5-80000* | 8 - 12000 | 9 -12900<br>(0,009-345) |
| Динамический диапазон измерений, Qmin : Qmax | 1:20<br>1:80 | 1: 30 | 1: 30 | 1: 20<br>> 1: 40 | > 1: 50 | 1:9; 1:40 |
| Максимальное рабочее давление, МПа | 4,0 | 1,6 | 1,6 | 1,6; 40* | 10 | 4 |
| Диапазон температур энергоносителя, $^{O}C$ | 100… 300 | 100…200 | 100…200 | 100…450<br>(100…575) | 120…250 | -40…550 |
| Диапазон температур окружающей среды, $^{O}C$ | - 40…50 | -40…50 | -40…50 | - 55…80 | - 45…50 | -40…70 |
| Межповерочный интервал, лет | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| Предел допускаемой основной погрешности, %<br>Расхода:<br>От 0,1 Qmax до 0,9Qmax<br>От Qmin до 0,1Qmax<br>Массы (объема)<br>Тепловой энергии | <br><br>-<br>± 2,0<br>± 3<br>± 4 | <br><br>± 1,5<br>± 2<br>± 2,5<br>- | <br><br>± 1,5<br>± 2<br>± 2,5<br>- | <br><br>± 1<br>± 1,5<br>-<br>- | <br><br>± 1<br>± 1,3<br>-<br>- | <br><br>± 1,35<br>± 2,5<br>-<br>- |

Значительные проблемы возникают при измерении расхода насыщенного пара, когда одновременно в трубопроводе существует газовая и жидкая фаза. Вода концентрируется вдоль стенок трубы и препятствует нормальному функционированию датчиков давления, установленных заподлицо со стенкой трубы [4,7]. Специалисты тюменской фирмы ИПФ «Сибнефтеавтоматика» предложили способ преодоления этой проблемы за счет выдвижения датчика давления внутрь трубы вместе с жестко охватывающей его кольцевой втулкой с коническим по форме выступом.

Отметим, что расходомеры «Ирга-РВ» и «Эмис-Вихрь-200», лишены этого дефекта т.к. крыло ДИМ 108М выступает внутрь трубы, где преобладает газообразная фаза.

Единственной альтернативой вихревым расходомерам на рынке приборов учета расхода пара являются приборы, основанные на измерении перепада давления на сужающих устройствах [1,6]. Однако, эти приборы характеризуются динамическими диапазонами 1:5, погрешностью измерений до $\pm$ 5%, а при измерении насыщенного пара скорее дают качественную картину, чем количественную оценку [7,8].

Анализ таблицы 1 показывает очевидные преимущества вихревых счетчиков пара по сравнению с диафрагмами и другими сужающими устройствами: широкий динамический диапазон, высокая точность. измерений. Для вихревых приборов также характерна высокая стабильность метрологических характеристик во времени, более низкие потери давления.

Все это ведет к постепенному увеличению доли вихревых счетчиков на рынке средств учета расхода пара, которая уже сейчас составляет более 60% среди российских производителей [9,10**].**

Весьма значимым фактором, способствующим росту конкуренции, является проникновение на российский рынок международных концернов - мировых лидеров в разработке и производстве высокоточных измерительных приборов: корпорации Emerson и EngineeringMeasurementsCompany (EMCO), США, Schlumberger**,** Франция,Krohne иEndress+Hauser,Германия, Danfoss,Швеция, YOKOGAVA, Япония и других [5,11].

Как правило, вихревые приборы ведущих зарубежных фирм являются одновременно счетчиками и жидкости, и газа, и пара.

Сравним отечественные и зарубежные приборы по наиболее проблемно измеряемому параметру – расходу пара. Основные технические характеристики вихревых счетчиков пара ведущих зарубежных производителей Европы, США и Японии приведены в таблице 2 [12,15].

Сравнивая метрологические и эксплуатационные характеристики изделий, представленных в таблицах 1 и 2 отметим:

- типоразмерный ряд зарубежных приборов, как правило, шире в сторону как больших, так и малых расходов; при этом для малых расходов динамический диапазон измерений существенно сужается до 1:7 или 1:10;
- максимальная рабочая температура зарубежных приборов в специальном исполнении выше, чем у большинства российских аналогов и достигает 400-450$^{o}$C;
- зарубежные приборы имеют криогенное исполнение, допускающее температуру энергоносителя до минус 200$^{o}$C;
- межповерочный интервал зарубежных приборов, как правило, не регламентируется; в технической документации, например фирмы EMCO, США указывается, что расходомеры VortexRhD имеют пожизненную градуировку вследствие того, что геометрия проточной части прибора со временем не изменяется. Лишь фирма YOKOGAVA, по-видимому, после
- сертификации в России, вынуждена была ввести межповерочный интервал прибора Digital YEWFLO - 4 года.

Однако, динамические диапазоны российских вихревых расходомеров, как правило, шире, а погрешности измерений не хуже, чем у зарубежных образцов.

При этом предприятие ЗАО «Эмис», Челябинск анонсирует вихревые расходомеры с рабочей температурой до 550$^{o}$C (2Эмис-Вихрь-200), аООО «Глобус», Белгород предлагает специальные исполнения вихревых расходомеров на условный проход 500 - 800 мм или на рабочую температуру до575$^{o}$C («Ирга-РВ» [1,15]), не имеющие аналогов за рубежом.

Таблица 2. Основные характеристики вихревых счетчиков пара ведущих зарубежных производителей

| Характеристика | Тип датчика расхода пара | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Vortex RhD EMCO, США | WFM5095, OPTISWIRL4070C Krohne, Германия | Prowirl, Endress+Hauser Германия | YEWFLO, YOKOGAVA Япония |
| Диапазон типоразмеров, $D_y$ мм | 25 – 400 | 10 -200 | 15 -400 | 15-400 |
| Диапазон измерения расхода по всем типоразмерам, $м^3$/ч (т/ч) | (0,014 – 104) | (0,005- 57) | 0 -20000 | 4,8 – 443017 (0,006-268) |
| Динамический диапазон измерений, Qmin : Qmax | 1:10; 1:35 | 1:7, 1:12 | 1: 30 | 1:10; 1:25 |
| Максимальное рабочее давление, МПа | 10 | 1,6 | 4,0 (35) | 1,5 – 22,4 |
| Диапазон температур энергоносителя, $^{O}C$ | -40…400 | -40…240 | -200…400 | -40…260 (-200…100) (-40…450) |
| Диапазон температур окружающей среды, $^{O}C$ | -29…60 | -40…65 | -40…50 | -40…85 |
| Диапазон температур окружающей среды, $^{O}C$ | -29…60 | -40…65 | -40…50 | -40…85 |
| Предел допускаемой основной погрешности, % | | | | |
| Расхода | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ±(0,7 -1,5) |
| Массы (объема) | ± 1,5 | ±2 | - | - |
| Тепловой энергии | ± 2,7 | - | - | - |

Все это позволяет сделать вывод о том, что по техническому уровню вихревые расходомеры российских производителей, созданные на основе пьезоэлектрических датчиков, не уступают лучшим зарубежным образцам, а по некоторым характеристикам, в частности по максимальным диаметрам условного прохода и предельным рабочим температурам, превосходят их.

Отметим, что эксклюзивным поставщиком пьезоэлектрических датчиков для вихревых расходомеров газа и пара для российских приборов, указанных в табл.1 является ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону [16].

**Список литературы**


1. Богуш М.В. Современные пьезоэлектрические датчики для вихревых расходомеров//Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика – 2007. - № 11. - с 32-37.
2. Горбунов И.А., Хоружев Г.М. Опыт эксплуатации счетчиков газа и пара на базе вихревого расходомера-счетчика «Ирга-РВ». Сборник трудов VII Всероссийского совещания - выставки по энергосбережению. Екатеринбург, 2006 г.
3. Абрамов Г.С., Барычев А.В., Зимин М.И. Практическая расходометрия в промышленности – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2000. - 472 с.
4. 4. Вихревые расходомеры Vortex серии PhDтм. www.promatis.ru/_files/emco.pdf. ЗАО «Проматис».- 2007.
5. Вихревой расходомер OPNISWIRL 4070C//Датчики и системы.- 2006.- №12.- С.65.
6. Вихревой расходомер для жидкостей, газа, насыщенного и перегретого пара Prowirl серии PROline. www.automatization.ru/equip-db/device.php?id=50310. – ЗАО "Геолинк Консалтинг". – 2015.
7. Вихревые расходомеры DY (digitalYEWFLO) и YF100 (YEWFLO). tehnosystems.ru/katalog.php?id=27. ЗАО «Техносистемы». – 2015.
8. Богуш М.В. Развитие вихревой расходометрии в России// Датчики и системы – 2007. - №9. - с 2-9.
9. Богуш М.В. Успехи вихревой расходометрии//Приборы – 2007. - №8. - с. 32-39.

10. Расходомеры счетчики. Тематический каталог № 3 . Выпуск 1. ПГ Метран. Челябинск, изд-во «Книга». – 2006. 187 с.

11. Счетчик пара вихревой Dymetic-9431. www.dymet.ru. ЗАО «Даймет».- 2015.

12. Зимин М.И., Баранов С.Л., Вашурин В.П. Счетчик пара вихревой типа СВП//АТиС в НП.- 1999 - №7.- с.12-15.

13. Зимин М.И., Вашурин В.П. Методы и средства, применяемые для измерения расхода пара и переносимой им тепловой энергии."АТиС в НП", №6, 2003 с 17-18.

14. Бутузов В.А., Репин Л.А. Приборы учета тепловой энергии пара с вихревыми расходомерами//Новости теплоснабжения.- № 1(17)-2002,С.47– 50.

15. www.irga.ru. Сайт ООО Глобус г. Белгород, 2015.

Приборы для измерения давления, уровня, расхода, плотности, температуры. www.piezoelectic.ru, ООО «Пьезоэлектрик», 2015

## Компенсация температурного изменения коэффициента преобразования по заряду пьезоэлектрического виброизмерительного преобразователя

***Вл.В. Янчич, Д.В. Джения, А.А. Иванов***

*НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета,*

*г. Ростов-на-Дону, Россия*

При измерении параметров вибрации наиболее часто приходится сталкиваться с температурными воздействиями на виброизмерительный преобразователь (ВИП). Температура окружающей среды непосредственно сказывается на значении коэффициента преобразования ВИП, вызывая дополнительную температурную погрешность измерений. В общем случае, в пределах рабочего диапазона температур, это связано с обратимыми температурными изменениями параметров пьезокерамических материалов (ПКМ) и дополнительным влиянием элементов конструкции ВИП на условия работы пьезоэлемента [1].

Использование возрастания пьезомодуля и диэлектрической проницаемости ПКМ при повышении температуры и возможность управления коэффициентом преобразования операционного усилителя (ОУ) согласующего зарядового усилителя (СЗУ) за счет изменения электрической емкости цепи его отрицательной обратной связи позволяет снизить дополнительную температурную погрешность пьезоэлектрического датчика [2]. В данном случае цепь отрицательной обратной связи ОУ СЗУ состоит из дополнительной секции пьезоэлемента с параллельно подключенным к нему шунтирующим конденсатором, выбор емкости которого позволяет установить режим компенсации температурного изменения коэффициента преобразования по заряду [3, 4]:

$$\frac{C_{\text{ос},T}}{C_{\text{ос},0}} = \frac{K_{\text{з},T}}{K_{\text{з},0}} \approx \frac{d_{31,T}}{d_{31,0}}, \qquad (1)$$

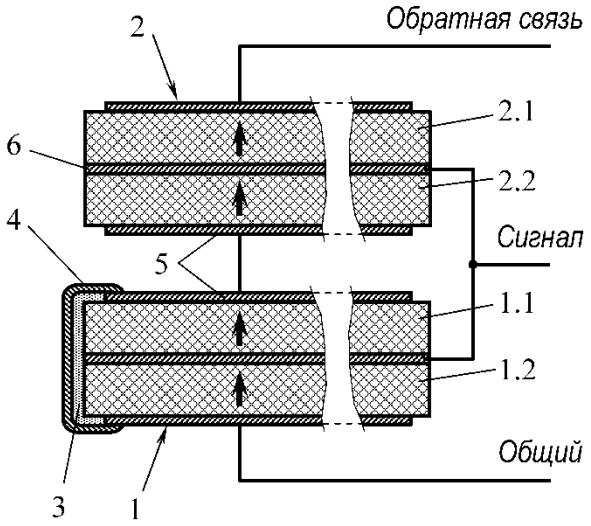
где $C_{\text{ос},T}$, $C_{\text{ос},0}$ – значения полной электрической емкости цепи отрицательной обратной связи при текущей и нормальной температурах;

$K_{\text{з,Т}}$, $K_{\text{з},0}$, – значения коэффициента преобразования по заряду при текущей и нормальной температурах без термокомпенсации;

$d_{31,T}$, $d_{31,0}$ – значения пьезомодуля при текущей и нормальной температурах.

Так как полная емкость цепи отрицательной обратной связи в данном случае представляет сумму названных емкостей, то при выбранной емкости шунтирующего конденсатора не представляется возможным получить заданное исходное (при нормальной температуре) значение коэффициента преобразования ОУ. Устранение этого недостатка возможно при использовании измененной схемы цепи отрицательной обратной связи.

Исследование проводилось на образцах ВИП типа АК317-25 (разработка НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ) [1] с измененной схемой коммутации электродов пьезоэлементов ВИП (рис. 1).




1, 2 – биморфный пьезоэлемент; 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 – слои пьезоэлемента;
3 – изолирующее покрытие; 4 – токопроводящая перемычка;
5 – внешний электрод; 6 – внутренний электрод

Рис. 1 - Порядок коммутации электродов пьезоэлементов (*а*) и электрическая схема преобразователя ВИП (*б*):

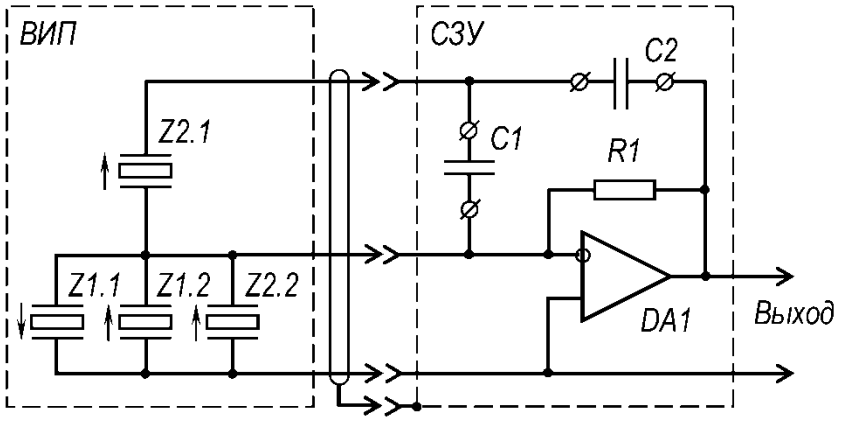



Рис. 2 - Упрощенная электрическая схема СЗУ с подключенным ВИП:Z1.1, Z1.2, Z2.1, Z2.2 – слои пьезоэлемента (нумерация соответствует рис.1)

Для компенсации температурного изменения коэффициента преобразования по заряду используется изменяющаяся с температурой электрическая емкость слоя 2.1 биморфного пьезоэлемента с электрической емкостью 5,5–7 нФ, включенного в цепь отрицательной обратной связи ОУ СЗУ (рис.2).

В цепь отрицательной обратной связи ОУ включены два конденсатора $C1$ и $C2$. Выбор значений их емкостей позволяет не только выполнить условие (1), но и получить заданное значение полной емкости $C_{\text{ос},0}$ в цепи отрицательной обратной связи ОУ СЗУ, определяющее его коэффициент преобразования при нормальной температуре:

$$\frac{1}{C_{\text{ос},0}} = \frac{1}{C_{\text{п},0} + C1} + \frac{1}{C2}, \tag{2}$$

$$\frac{1}{C_{\text{ос},T}} = \frac{1}{C_{\text{п},T} + C1} + \frac{1}{C2}. \tag{3}$$

где $C_{\text{п},0}$, $C_{\text{п},T}$ – электрические емкости компенсационного слоя пьезоэлемента $Z2.1$ при нормальной и текущей температурах.

Выполнение (1), (2), (3) являются условием полной термокомпенсации при заданной текущей температуре.

Усредненные результаты испытаний приведены на рис. 3, 4 и в таблице 1.

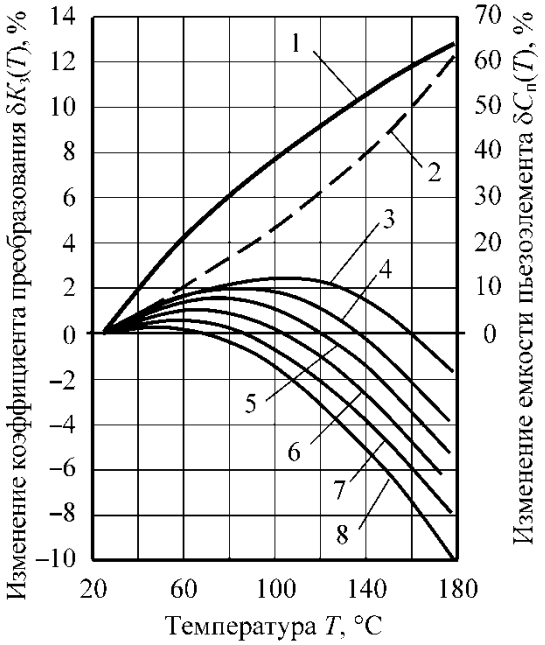



Рис. 3 - Температурная зависимость параметров ВИП (ПКМ ЦТС-19): 1 – $\delta K_з(T)$ без термокомпенсации; 2 – $\delta C_п(T)$; 3–8 – при различных значениях емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$

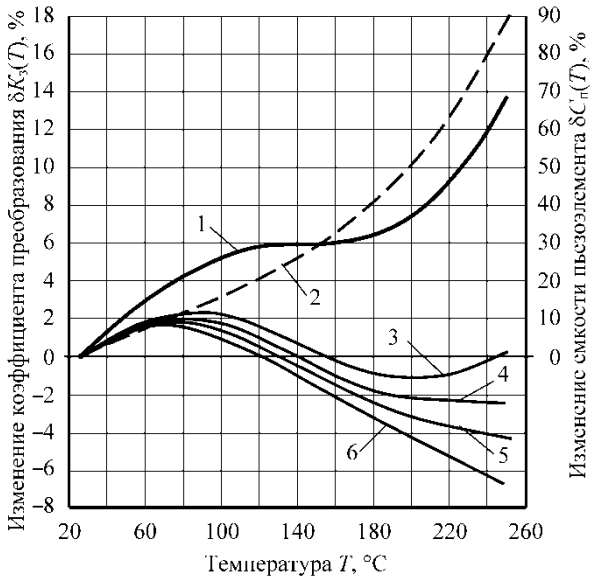



Рис. 4 - Температурная зависимость параметров ВИП (ПКМ ЦТС-83): 1 – $\delta K_з(T)$ без термокомпенсации; 2 – $\delta C_п(T)$; 3–6 – при различных значениях емкостей $C1$ и $C2$

Таблица 1. Максимальное относительное изменение коэффициента преобразования по заряду ВИП в различных диапазонах температур

| ПКМ пьезоэлемента | Диапазон температур, °С | $\delta K_з$, % | $\delta K_з^{(T)}$, %, не более | $\frac{\delta K_з}{\delta K_з^{(T)}}$ | Оптимальная емкость конденсаторов, нФ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $C1$ | $C2$ |
| ЦТС-19 | 25–120 | 9,2 | ±1,1 (кривая 6) | 8,4 | 9,74 | 53,30 |
| | 25–160 | 11,8 | ±2,1 (кривая 4) | 5,6 | 7,90 | 23,0 |
| ЦТС-83 | 25–180 | 6,3 | ±2,0 (кривая 4) | 3,1 | 9,74 | 23,0 |
| | 25–250 | 13,7 | ±2,4 (кривая 4) | 5,7 | 9,74 | 23,0 |
| Примечания: 1) $K_з$ – коэффициент преобразования без термокомпенсации. 2) $K_з^{(T)}$ – коэффициент преобразования с термокомпенсацией при оптимальном значении емкостей $C1$ и $C2$. | | | | | | |

Выбранные значения максимальных температур 160 °С для ПКМ ЦТС-19 и 250 °С для ЦТС-83 соответствуют рекомендуемым предельным температурам при длительной работе ВИП.

В процессе проведения испытаний установлено:

– применение термокомпенсации позволило снизить относительное температурное изменение коэффициента преобразования по заряду, в

зависимости от марки ПКМ и диапазона рабочих температур, от 3,1 до 8,4 раз;

– изменение длины соединительного кабеля между ВИП и СЗУ от 1,5 до 10 м, благодаря значительной суммарной электрической емкости элементов $Z2.1$ и $C1$, не оказывает заметного влияния на относительное температурное изменение коэффициента преобразования по заряду;

– двух-трехкратный прогрев ВИП с короткозамкнутыми электродами пьезоэлементов до максимальной рабочей температуры позволяет устранить необратимые изменения и улучшить повторяемость параметров в условиях воздействия повышенных температур.

Учитывая характер изменения пьезомодуля и диэлектрической проницаемости ПКМ при пониженных температурах, есть основание полагать, что относительное изменение коэффициента преобразования в режиме термокомпенсации, по крайней мере, до температур минус 40–60 °С, не превысит значений, полученных при повышенных температурах.

**Список литературы**

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

2. Пат. № 2099678 РФ. G01L9/08. Пьезоэлектрический преобразователь давления в электрический сигнал / Р. А. Шакиров. – опубл. 20.12.1997.

3. Янчич В. В., Панич А. Е., Джения Д. В. Снижение температурной погрешности // Сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – С. 133–137.

4. Янчич В. В., Панич А. Е. Управление характеристиками пьезоэлектрических датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Междунар. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 329–334.

# Исследование математических моделей трехкоординатных виброизмерительных преобразователей с четырехсекционными пьезоэлементами

***Вл.В. Янчич, В.Н. Митько***

*НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета,*
*г. Ростов-на-Дону, Россия*

Трехкоординатные пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (ВИП) используются для одновременного измерения проекций вектора виброускорения на оси заданной системы координат при испытании и контроле режимов работы сложных технических объектов.

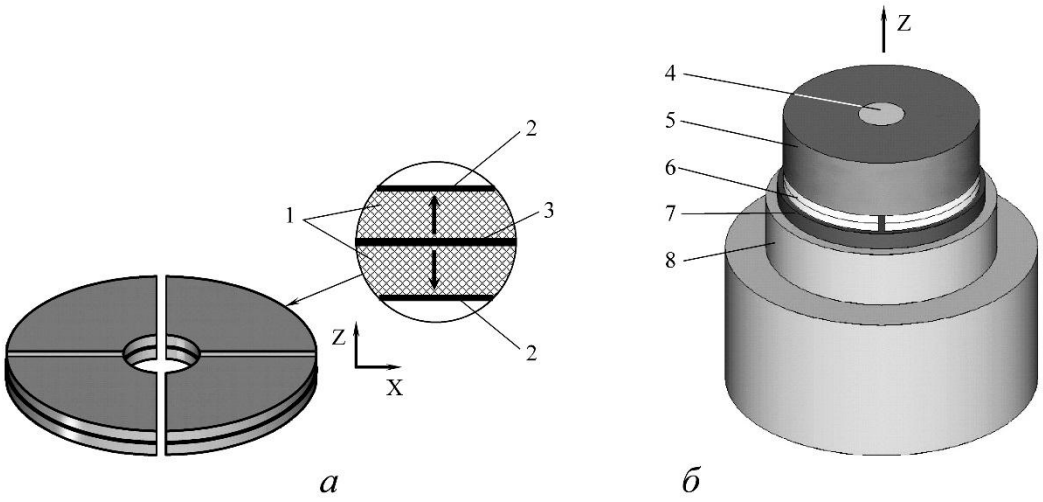
Одна из перспективных конструкций трехкоординатного ВИП состоит из четырехсекционного пьезоэлемента с единым инерционным элементом[1, 2]. Это позволяет получить общий, для трех координат, центр чувствительности, что повышает точность измерения результирующего ускорения пространственной вибрации.

С целью изучения особенностей работы и оценки основных характеристик таких ВИППроведено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов, реализованного в программе ANSYS Multiphysics. Рассмотрены два конструктивных типа электромеханического преобразователя ускорения: собранного из отдельных элементов (составная конструкция) [2] и выполненного в виде монолитного блока из пьезокерамики (монолитная конструкция) [3].

Исследовались характер деформаций конструкции при воздействии виброускорения, степень влияния массы инерционного элемента при неизменном его диаметре и высоты основания. В рассматриваемых моделях полагалось, что все элементы конструкции жестко соединены друг с другом по граничным поверхностям. Частоты продольного и поперечного установочных резонансов определялись методом модального анализа ANSYS при условии жесткого закрепления нижней поверхности эквивалента основания.

В модели ВИП с составной конструкцией преобразователя (рис. 1) пьезоэлемент ∅17×1,5 ммиз пьезокерамики ЦТС-83, состоящий из двух

параллельно включенных слоев с электродами, разрезан на четыре отдельные секции, установленные на общем алундовом изоляторе. Элементы конструкции упруго поджаты шпилькой диаметром 4 мм между инерционным элементом из сплава ВНМ и эквивалентом основания корпуса ВИП ∅27×18 мм из стали.




*а* *б*

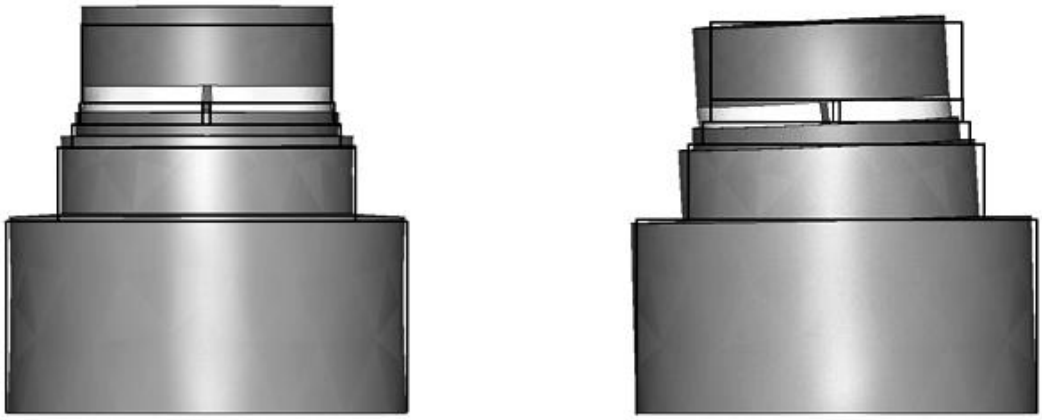
1 – пластина из пьезокерамики; 2, 3 – внешний и внутренний электроды; 4 – шпилька; 5 – инерционный элемент; 6 – пьезоэлемент; 7 – изолятор; 8 – эквивалент основания корпуса ВИП

Рис. 1 - Четырехсекционный пьезоэлемент (*а*) и расчетная модель ВИП с составным преобразователем (*б*)

Некоторые результаты расчета представлены в таблицах 1, 2 и на рис. 2.

Таблица 1. Значения механических напряжений при массе инерционного элемента 20 г и ускорении 1 м·с$^{-2}$

| Напряжение на поверхности секций пьезоэлемента | Ускорение по оси Z | Ускорение по оси X |
|---|---|---|
| Продольное $T_{zz}$, Па | От минус 25 до минус 243 | От 514 до минус 559 |
| Поперечное $T_{rr}$, Па | От 50 до минус 167 | От 320 до минус 358 |



*а* *б*

Рис. 2 - Форма деформации ВИП с составным преобразователем на частотах продольного (а) и поперечного (б) резонансов

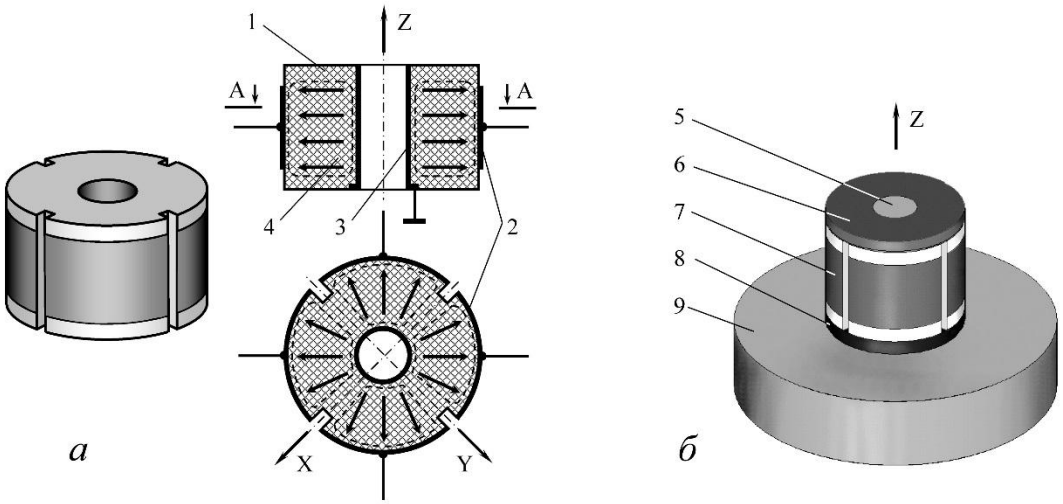
Таблица 2. Рассчитанные значения характеристик ВИП с преобразователем составной конструкции

| Параметр | Масса инерционного элемента, г | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Частота продольного установочного резонанса, кГц | 65,4 | 59,4 | 54,2 | 49,9 | 46,3 | 43,2 |
| Частота поперечного установочного резонанса, кГц | 30,6 | 26,8 | 23,7 | 21,1 | 19,0 | 17,1 |
| Коэффициент преобразования секции пьезоэлемента,пКл·м$^{-1}$·с$^2$: | | | | | | |
| по оси Z | 0,53 | 0,96 | 1,38 | 1,81 | 2,24 | 2,66 |
| по осям X, Y | 0,17 | 0,40 | 0,76 | 1,22 | 1,79 | 2,47 |
| Электрическая емкость секции пьезоэлемента, нФ | 1,48 | | | | | |
| Максимальная рабочая частота, кГц | 9,2 | 8,0 | 7,1 | 6,3 | 5,7 | 5,1 |

Верхняя граница рабочего диапазона частот определялась как $0{,}3f_{р,мин}$, где $f_{р,мин}$– минимальная частота установочного резонанса ВИП [4].

Установлено, что высота основания заметно влияет на частоту установочного поперечного резонанса. Например, при массе инерционного элемента 20 г, уменьшение высоты фланца основания с 13 до 7 мм приводит к возрастанию этой частоты на 28 %, что соответственно повышает верхнюю границу рабочего диапазона частот.

Монолитный преобразователь (рис. 3) цилиндрической формы ∅9,5×7 мм с осевым отверстием ∅3,5 мм выполнен из пьезокерамики ЦТС-83. Внешний электрод разделен продольными канавками на четыре секции с выводами. Функцию инерционного элемента выполняет собственная масса блока. С целью повышения коэффициентов преобразования может также использоваться масса дополнительного инерционного элемента из сплава ВНМ. Все элементы конструкции упруго поджаты шпилькой диаметром 3 мм через алундовый изолятор к эквиваленту стального основания ∅22×5 мм.




1 – блок из пьезокерамики; 2, 3 – внешний и внутренний электроды; 4 – поляризованная область; 5 – шпилька; 6 – дополнительный инерционный элемент; 7 – монолитный преобразователь; 8 – изолятор; 9 – эквивалент основания корпуса ВИП

Рис. 3 - Монолитный преобразователь (*а*) и расчетная модель ВИП на его основе (*б*)

Наиболее значимые результаты расчета основных характеристик ВИП с монолитным преобразователем представлены на рис. 4 и в таблице 3.

Рис. 4 - Форма деформации монолитного преобразователя без дополнительного инерционного элемента на частотах продольного (а) и поперечного (б) резонансов

Как показали расчеты, при работе преобразователя радиальные механические напряжения $T_{rr}$ пренебрежимо малы по сравнению с продольными $T_{zz}$. Поэтому основной вклад в генерируемый заряд вносит поперечный пьезоэффект (пьезомодуль$d_{31}$). При воздействии ускорения 1 м·с$^{-2}$ по оси Z значения продольных механических напряжений $T_{zz}$ на поверхностях блока лежат в интервале от 4,86 до минус 68,3 Па, а по осям X, Y– от 135,1 до минус 131,8 Па.

Таблица 3. Рассчитанные значения характеристик ВИП с преобразователем монолитной конструкции

| Параметр | Масса дополнительного инерционного элемента, г | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Частота продольного установочного резонанса, кГц | 96,4 | 76,1 | 63,0 | 54,7 | 48,9 |
| Частота поперечного установочного резонанса, кГц | 40,2 | 28,2 | 21,5 | 17,4 | 14,5 |
| Коэффициент преобразования секции блока, пКл·м$^{-1}$·с$^2$: | | | | | |
| по оси Z | 0,11 | 0,17 | 0,27 | 0,35 | 0,44 |
| по осям X, Y | 0,16 | 0,36 | 0,63 | 0,97 | 1,37 |
| Электрическая емкость, нФ | 0,458 | | | | |
| Максимальная рабочая частота, кГц | 12,1 | 8,5 | 6,5 | 5,2 | 4,4 |

Следует отметить, что в рассмотренных конструкциях преобразователей электрические заряды, генерируемые на электродах отдельных секций, одновременно используются в электронной системе обработки сигналов и, следовательно, суммируются. В этой связи результирующий коэффициент преобразования ВИП в четыре раза превосходит приведенные в таблицах 2, 3 значения коэффициентов преобразования отдельной секции пьезоэлемента.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных при испытании макетных образцов ВИП с преобразователями составной и монолитной конструкции, показали их достаточное соответствие. Это позволило использовать результаты моделирования при разработке трехкоординатных ВИП для систем виброконтроля и диагностики промышленного оборудования.

**Список литературы**

1. Митько В. Н., Крамаров Ю. А., Панич А. А.Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении// Пьезоэлектрическое приборостроение. –Т. 6. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 240 с.

2. Янчич В. В., Джения Д. В., Янчич Вл. В. и др. Трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр // Сб. тр. Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 175–178.

3. Янчич В. В., Янчич Вл. В. Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития). – LAPLAMBERTAcademicPublishing, Saarbrucken, Deutschland, 2013. – 142 с.

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

# Специализированная оснастка для испытания трехкоординатных виброизмерительных преобразователей

***В.Н. Костюков[1], С.Н. Ковалев[2], Вл. В. Янчич[2], А.А. Иванов[2], Д.В. Дженя[2]***

*[1] НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия,*

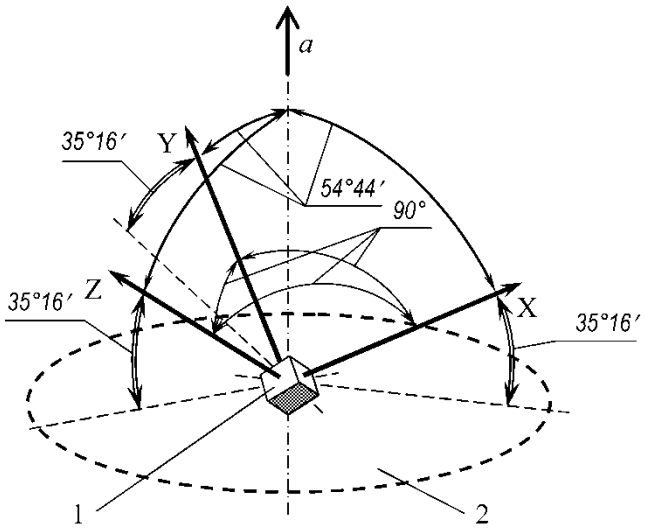
*[2] НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Для определения значения и направления в пространстве вектора виброускорения необходимо одновременное измерение трех его составляющих или их проекций на три оси заданной системы координат, что особенно важно в условиях нестационарной пространственной вибрации [1]. С этой целью используются либо три однонаправленных, либо специальные трехкоординатные (трехкомпонентные) виброизмерительные преобразователи (ВИП) с ортогональной ориентацией измерительных осей. В последнее время в системах виброконтроля и диагностики сложных технических объектов все большее применение получают пьезоэлектрические трехкоординатные ВИП [2].

Однако испытание и поверка трехкоординатных ВИП сопряжена с рядом трудностей в связи с недостаточным распространением необходимого оборудования. Так как отсутствуют прецизионные трехкоординатные возбудители виброколебаний, то измерения производятся путем поочередной ориентации каждой из измерительных осей ВИП с использованием однокоординатного возбудителя. Как показывает практика, такая методика пригодна для трехкоординатных ВИП с тремя автономными преобразователями и приемлема для ВИП с одним трехкоординатным преобразователем [3–5] только в случае использования возбудителя виброколебаний с малым (не более 1 %) значением относительного коэффициента поперечных колебаний (ОКПК).

Разработанная в НКТБ «Пьезоприбор» совместно с НПЦ «Динамика» специализированная оснастка, предназначеннаядля испытания трехкоординатного ВИП на однокомпонентном вибростенде, позволяет одновременно определять коэффициенты преобразования ВИП по трем его измерительным осям.

Методика испытаний трехкоординатного ВИП основана на его ориентированном креплении относительно стола возбудителя виброколебаний таким образом, что бы каждая из измерительных осей испытуемого ВИП имела одинаковый наклон к вектору возбуждаемых колебаний, который составляет 35°16′ (рис. 1).




1 – испытуемый ВИП; 2 – плоскость стола возбудителявиброколебаний;
*a* –направление ускорениястола; X, Y, Z–направления измерительных осей испытуемого ВИП

Рис. 1 - Ориентация испытуемого ВИП при испытании

Значение коэффициентов преобразования $K_{X,Y,Z}$по каждой из трех измерительных осей определяются по формуле:

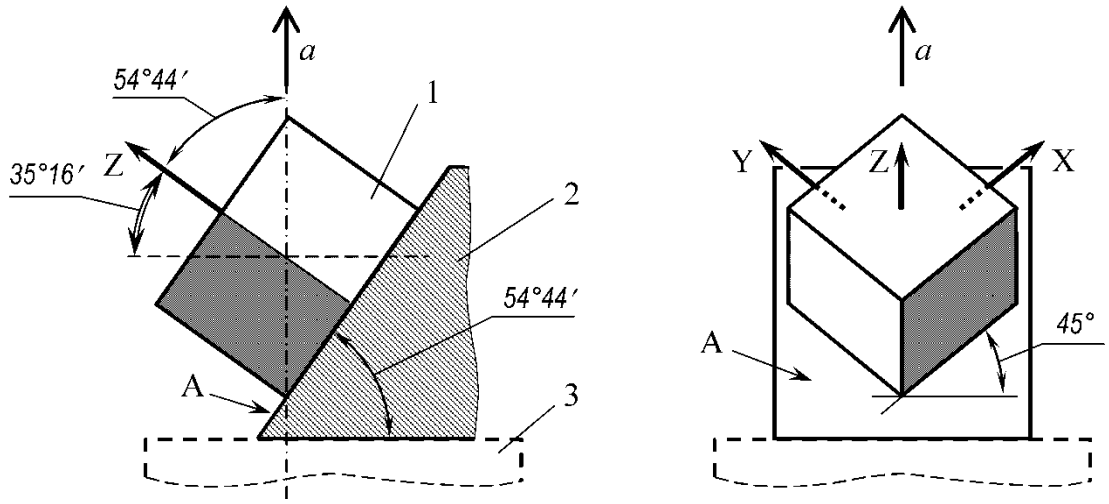
$$K_{X,Y,Z} = \frac{U_{\text{вых}}}{a \cdot \cos\beta} = \frac{U_{\text{вых}}}{0{,}5774\,a}, \qquad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение, измеренное на выходе соответствующего канала ВИП;

*a* –значение действующего ускорения;

β = 54°44′ – угол наклона измерительных осей к направлению ускорения.

Необходимая ориентация испытуемого ВИП обеспечивается использованием специального узла крепления (рис. 2, 3).




1 – испытуемый ВИП; 2 – узел крепления испытуемого ВИП;
3 – стол возбудителя виброколебаний; А – установочная поверхность

Рис. 2 - Ориентация испытуемого ВИП на узле крепления:

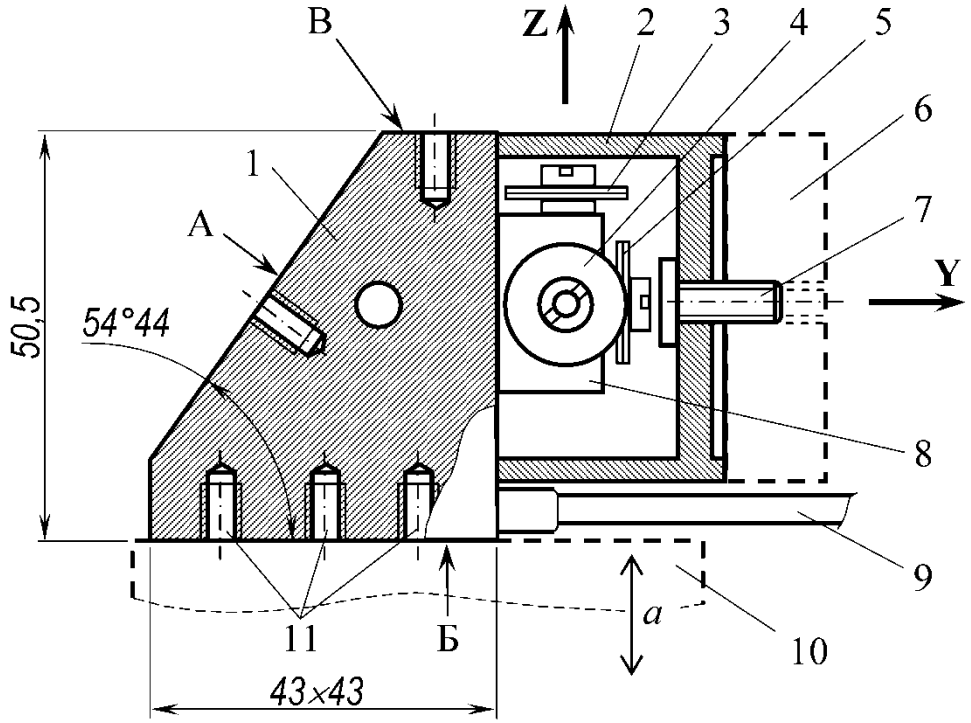



Рис. 3 - Конструкция узла крепления испытуемого ВИП

Узел крепления выполнен в виде призмы 1 с наклонной под углом 54°44′ поверхностью А, снабженной группой резьбовых отверстий для крепления испытуемых ВИП с различными посадочными размерами. Для измерения трех компонентов виброускорения узла крепления на призме

смонтирован контрольный трехкоординатный ВИП, состоящий из ортогонально ориентированных на общем основании 8 трех биморфных пьезоэлементов 3–5 и соединительного кабеля 9. Зафиксированный на крышке 2 винт 7, при необходимости может использоваться для крепления одной или двух балансировочных масс 6. Поверхностью Б призма крепится шпилькой к столу 10 возбудителя виброколебаний с использованием одного из резьбовых отверстий 11. Поверхность В предназначена для крепления эталонного ВИП при калибровке.

Необходимая для точных измерений минимизация уровней поперечных колебаний узла крепления при использовании возбудителей виброколебаний с небольшой массой подвижной системы (например, распространенной модели 4809 фирмы Brüel&Kjær) осуществляется при установленном испытуемом ВИП выбором рабочей частоты совместно с балансировкой путем использования одного из крепежных отверстий 11 и балансировочной массы.

В комплект оснастки входят:узел крепления ВИП, согласующий трехканальный зарядовый усилитель (УС-3) для подключения контрольного трехкоординатного ВИП; две балансировочные массы 30 и 60 г; элементы крепления (рис. 4).

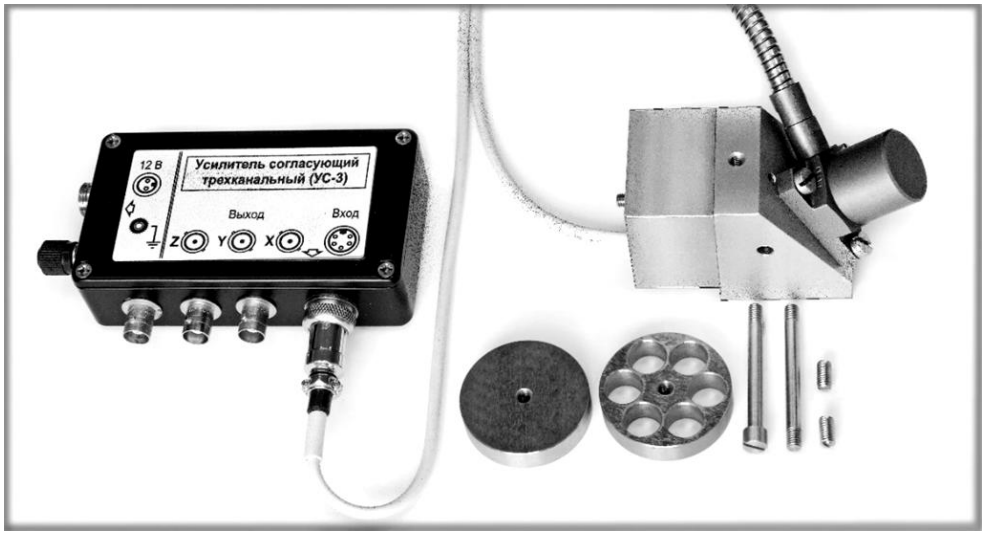



Рис. 4 - Внешний вид комплекта оснастки

Коэффициент преобразования контрольного трехкоординатного ВИП с УС-3 17 мВ·м$^{-1}$·с$^{2}$, относительный коэффициент поперечного

преобразования не более 1,4 %, неравномерность АЧХ в диапазоне частот от 3 до 3000 Гц не превышает 1,5 %. Габаритные размеры узла крепления испытуемого ВИП 43×50,5×71 мм, масса не более 280 г.

При использовании возбудителя виброколебаний модели 4809 балансировка и выбор рабочей частоты из диапазона 20–250 Гц позволяют более чем на порядок снизить относительный коэффициент поперечных колебаний до значений 1–1,5 %. При этом отклонение измеренного с помощью данного комплекта модуля вектора ускорения от фактического значения при испытании трехкоординатных ВИП составляет от 1,5 до 5,5 %, включая их собственную погрешность.

**Список литературы**

1. Кобяков И., Сперанский А., Хориков А. и др.Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств // Двигатель. – 2005. – № 2 (38). – С. 8–11.

2. Янчич В. В., Янчич Вл. В. Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития). – LAPLAMBERTAcademicPublishing, Saarbrucken, Deutschland, 2013. – 142 с.

3. Патент РФ № 2229136. G01P15/09. Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом / Кобяков И.Б. Опубл. 22.11.2002.

4. Янчич В. В., Иванов А. А., Костюков В.Н. Трехкомпонентные пьезоэлектрические акселерометры для векторной виброметрии промышленных объектов // Тр. VI Междунар. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». – Ростов н/Д: Изд-во Рост. пед. ун-та, 2008. – С. 157–162.

5. Янчич В. В., Джения Д. В., Янчич Вл. В. и др. Трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр // Сб. тр. Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 175–178.

**Влияние элементов конструкции на характеристику направленности высокочастотной гидроакустической антенной решётки**

***С.Н. Галий, В.К. Доля, В.Н. Митько***

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

Одним из наиболее важных параметров гидроакустических устройств наблюдения подводной обстановки (многолучевые эхолоты, эхолокаторы секторного обзора и т.д.) является величина сектора обзора (сканирования), которую в большинстве случаев стремятся сделать как можно большей. Сектор обзора при применении плоских АР ограничивается несколькими факторами: рост боковых лепестков при отклонении основного лепестка ХН, расширения основного лепестка в связи с уменьшением действующего раскрывай в направлении поворота и наличия направленных свойств элементов АР. Таким образом сектор сканирования во многом определяется характеристикой направленности (ХН) в плоскости сканирования отдельного элемента антенной решетки (АР), а также шагом расположения и возможным взаимным влиянием элементов АР. Как правило на практике АР изготавливают из элементов, расположенных в плоскости сканирования, с шагом $\lambda_в/2$ ($\lambda_в$ – длинна волны на рабочей частоте). Предполагается, что в этом случае ширина ХН элемента будет не менее 100°, что в конечном итоге обеспечит сектор сканирования того же порядка, при допустимом уровне боковых лепестков.

Однако, экспериментальные исследования, проведенные для нескольких высокочастотных АР, показали, что ширина ХН по уровню минус 3дБ отдельных элементов АР с волновым размером ~$\lambda_в/2$ колеблется от 50° до 60°. Реализация наиболее простой идеи расширения ХН путем значительного уменьшения волнового размера элемента (вплоть до $\lambda_в/10$) не приводит к ожидаемому результату и, следовательно, не может быть использована на практике.

Целью настоящей работы является анализ возможных причин, приводящих к значительному сужению ХН отдельного элемента в составе АР, и выработка рекомендаций по конструированию АР.

В данной работе рассматривается АР под следующие технические требования:

– рабочая частота 1 и 2 диапазона 200, 400 кГц;

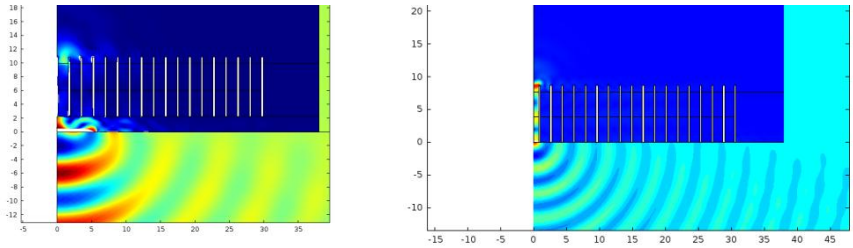
– сектор сканирования, не менее 90°;

– ширина ХН в плоскости перпендикулярной плоскости сканирования 27°

Исследования режимов работы элемента АР и АР в целом, проводились путем численного решения двумерной (плоско-деформированной) краевой задачи методом конечных элементов. С целью подтверждения адекватности двухмерной задачи, некоторые расчеты повторно проведены на полной трехмерной модели, так же проведено натурные испытания макетных образцов АР. Расчет характеристик элемента АР и АР в дальней зоне (ХН и АЧХ чувствительности) выполняется с использованием интеграла Гельмгольца-Кирхгофа [1]. Окончательно заключений о справедливости результатов, полученных численным решением, принимались после проведения измерений ХН макетных образцов.

Расчетная модель представлена на рисунке 1. Для ускорения процесса расчета, модель представлена в виде половины АР с заданными соответствующими условиями симметрии. Модель состоит из элементов АР – пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), общей герметизирующей прокладки (далее прокладки), полиуретанового демпфера и водной среды. Детали конструкции АР (проводники, крепежные элементы и т.д.), не оказывающие значительного влияния на параметры АР, не включены в расчетную модель.

Работа АР в двух частотных диапазонах обеспечивается применением монолитных ПЭП оптимальных геометрических размеров [2] с поперечной поляризацией и секционированными электродами [3], позволяющими эффективно возбуждать ПЭП на первой (200 кГц) и второй (~400 кГц) моде колебаний без применения коммутирующих устройств. ПЭП в АР расположены с шагом 1.8 мм, т.е. с шагом $\lambda_в$ =¼ и $\lambda_в$ ≈½ для первого и второго диапазона соответственно. Расчет параметров ПЭП в первом частотном диапазоне ведется для двух центральных электрически параллельно соединенных ПЭП (рис.1,а), во втором диапазоне для одного центрального (рис.1,б), все остальные ПЭП электрически закорочены.

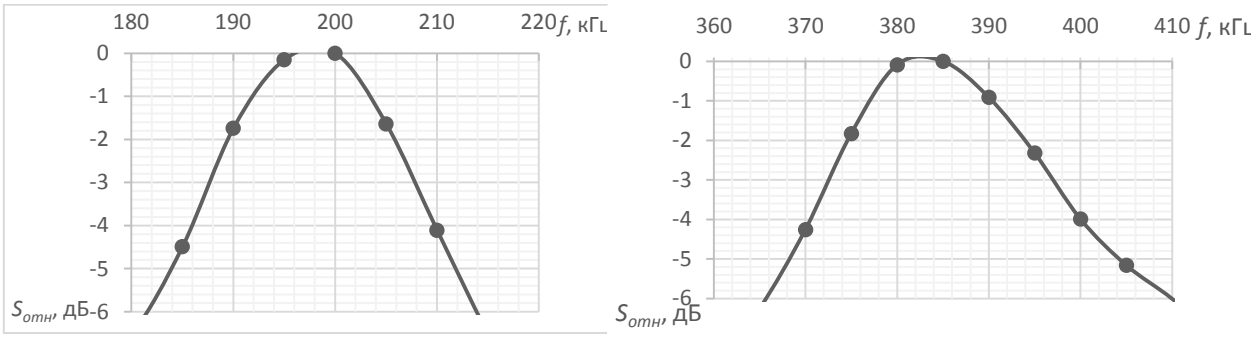


а б

1 – ПЭП, 2 – герметизирующая прокладка, 3 – полиуретановый демпфер, 4 – вода, 5 – линия симметрии, 6 – линия задания импедансного граничного условия, 7 – линия расчета интеграла Гельмгольца- Кирхгофа

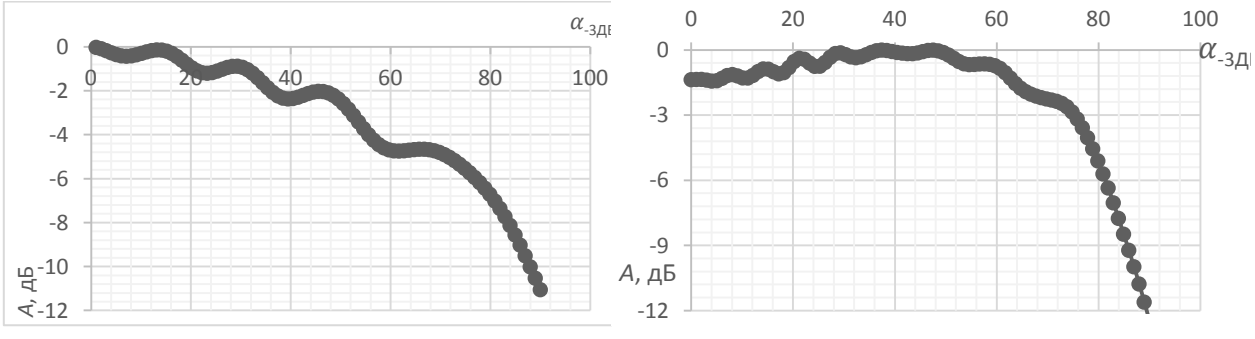
Рис. 1 – Расчетная модель АР с результатами расчета (относительное смещение и абсолютное давление)

Изначально проведен расчет только теоретически возможного варианта конструкции АР, в которой ПЭП непосредственно контактируют со средой (общая герметизирующая прокладка отсутствует). Полученные данные (рис. 2, 3, 4) использованы для оценки влияния прокладки на параметры ПЭП и АР в целом




а б

Рис. 2 –АЧХ ПЭП в составе АР: а – первый, б – второй частотный диапазон




а б

Рис. 3 –ХН ПЭП в составе АР: а – первый, б – второй частотный диапазон

Результаты расчета показали, что параметры ПЭП соответствуют ожидаемым – ширина ХН и сектор сканирования АР более 100°.

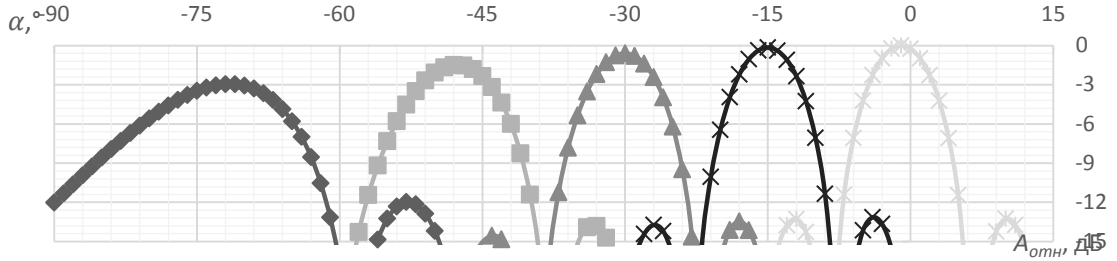
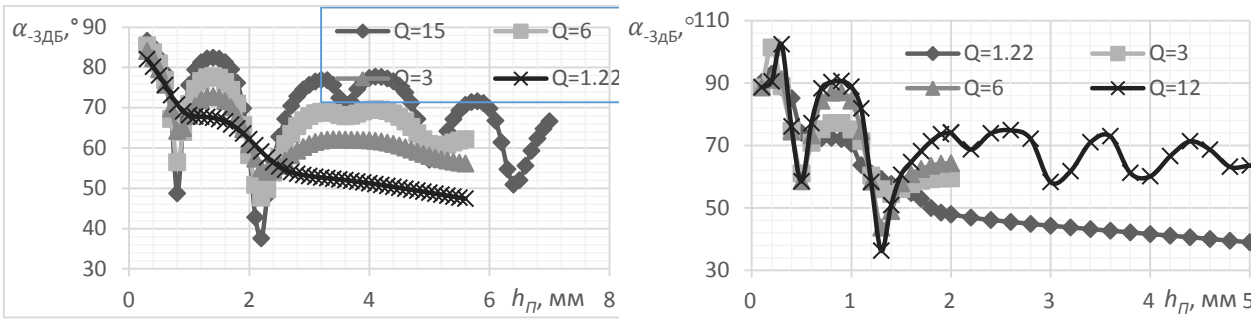



Рис. 4 – Компенсированные ХН АР по направлению 15°, 30°, 45°, 65°

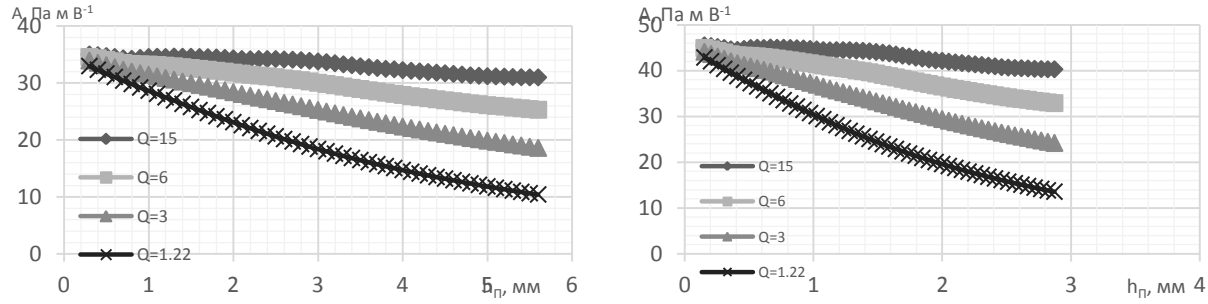
В второй модели АР герметизирующая прокладка выполнена в виде монолитной пластины из полиуретана. Использование относительно простой конструкции прокладки продиктовано соображениями технологичности, а значит и высокой повторяемости параметров ПЭП в составе АР. В качестве материала прокладки использован полиуретан типа СПБ-ХП-80, отличительной особенностью данного типа полиуретана является его малая механическая добротность (Q≈1.2). В виду того, что в качестве прокладки возможно применение других марок полиуретана (СКУ-ПФЛ-100, ТФ-235, ПУ-ЗК и т.д.) обладающих близкими по значению параметрами ($\rho$, $c_l$, $c_t$), но более высокодобротных. Проведены так же расчеты для ряда значений добротностей материала прокладки ($Q$ = 1.2, 3, 6, 12). Результаты расчета представлены на рисунке 5, 6, . На графике (рисунок 5) отчетливо видны области значений $h_П$=*0.5, 1.3 мм* (при $Q$>3), когда наблюдаются значительное сужение ширины ХН. Рассмотрев характер колебания излучающей поверхности прокладки (рисунок 7), можно сделать вывод о том, что причиной сужения ширины ХН является возникающие, при определенных значениях – $h_П$, «паразитные» поперечные колебания поверхности прокладки.

Применение низкодобротного ($Q$<1.2) материала прокладки приводит к демпфированию поперечных паразитных колебаний тем самым «сглаживая» зависимость ширины ХН от $h_П$. Кроме того, ширина ХН ПЭП монотонно убывает при увеличении величины $h_П$, предположительно из-за увеличения вносимых потерь материалом прокладки. Так же можно отметить снижение чувствительности ПЭП при увеличении $h_П$(рисунок 6) что несомненно напрямую связано с добротностью материала прокладки.



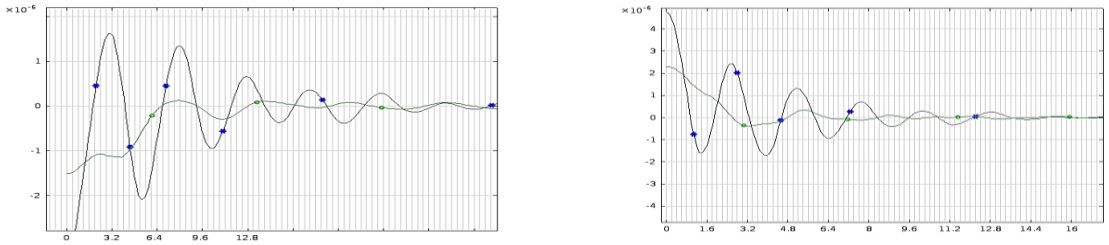

а б

Рис. 5 – Ширина ХН ПЭП при различных значения механической добротности материала прокладки: а – первый, б – второй частотный диапазон




а б

Рис. 6 – Чувствительность ПЭП от $h_П$, при различных значения механической добротности материала прокладки: а – первый, б – второй частотный диапазон



а б

Рис. 7 – Смещение излучающей поверхности прокладки: а – первый (при $h_П$=*1.0, 2.6 мм* ), б – второй частотный диапазон (при $h_П$=*0.55, 1.3 мм* )

Зависимость ширины ХН от толщины прокладки (рисунок 5) для первого и второго частотного диапазона носит одинаковый характер, если нормировать величину $h_П$ в длинах волн в материале накладки, таким образом дальнейшее расчеты будут вестись для одного частотного диапазона.

Проведен расчет трехмерной конечно элементной модели параметров ПЭП в составе АР, в которой ПЭП установлены на общей герметизирующей прокладке, материал прокладки полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100. На

рисунке 8 представлен график зависимость ширины ХН от толщины прокладки.

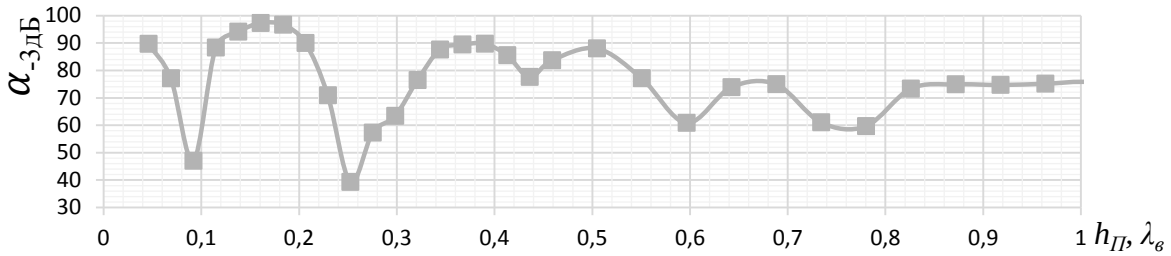



Рис. 8 – Зависимость ширины ХН ПЭП от толщины прокладки

Для подтверждения полученных теоретических результатов моделирования изготовлен макетный образец 8 элементной АР, прокладка изготовлена из полиуретана марки СКУ-ПФЛ-100, изменение толщины прокладки производилось шлифовкой. На рисунка 11, 12 приведены экспериментальные данные для 2 центральных элементов АР. Исследование проведено для нескольких значений толщин накладок в диапазоне от 0.5 до 0.23 длин волн в материале прокладки

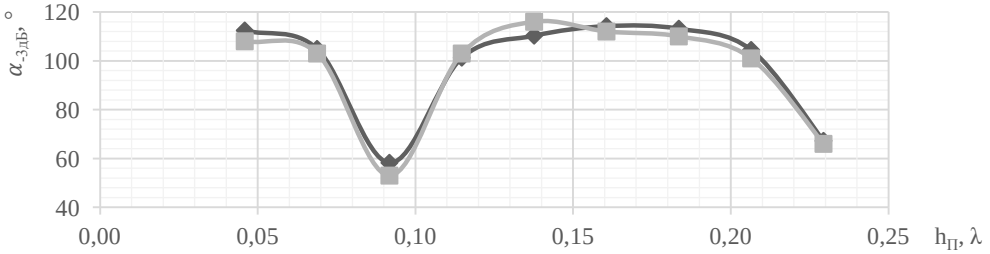



Рис. 9 – Зависимость ширины ХН элемента АР макетного образца от толщины прокладки

Выводы.

1. На режим работы элемента АР и его характеристики большое влияние оказывает толщина прокладки и параметры материала, из которого она изготовлена.

2. Значение механической добротности материала прокладки оказывает влияние на характер зависимости ширины ХН от толщины прокладки. В качестве материала прокладки наилучше применять высокодобротные материалы, способные обеспечить широкую ХН ПЭП при определенных значениях $h_П$. Кроме того при использовании высокодобротных материалов, для изготовления прокладки, ПЭП будет обладает большей чувствительность в сравнении с прокладкой из низкодобротного материала, при равных толщинах прокладки.

3. Наличие провалов значений ширины ХН, при определенных значениях $h_П$, ограничивает частотный диапазон АР, в котором сохраняется широкий сектор сканирования. Данный факт особенно необходимо учитывать для АР, работающих в нескольких частотных диапазонах. Предлагается выбирать толщину прокладки $h_П$, при котором значение ширины ХН остается большим для заданных частотных диапазонов.

4. Результаты проведенных натурных экспериментов на макетном образце АР показали хорошее совпадение с данными полученными при численном решении двух и трехмерных краевых задач. Разработанные модели АР и методики анализа работы ПЭП в составе АР и АР в целом, позволяют оценить влияние общей герметизирующей прокладки и проводить оптимизацию ее параметров. Кроме того, предлагается на разработанных моделях продолжить исследования по оценки влияния элементов конструкции на параметры высокочастотных ПЭП и АР в целом не только для плоских АР, но и для других типов антенн (дуговые, цилиндрические и т.д.).

**Список литературы**

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука. 2004

2. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1972.

3. ГалийС.Н., ДоляВ.К., Митько В.Н. Оптимизация высокочастотного широкополосного гидроакустического преобразователя линейной антенной решетки. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестер-История, 2014.

4. Митько В.Н., Иванов И.М., Милославский Ю.К. Многочастотный пьезоэлектрический преобразователь. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестер-История, 2014.

# Алгоритм измерения электрических параметров микрофона с кабелем

***А.В. Боев, А.В. Фомушкин***

*НКТБ «Пьезоприбор» Южный Федеральный Университет,*

*г. Ростов-на-Дону, Россия*

Для реакторов типа РБМК стоит задача акустического контроля течи теплоносителя, для этого во всех ответственных зонах реакторного блока располагаются микрофоны. Условия, в которых работают микрофоны, включают в себя температуру до 280 °С и ионизирующее излучение. Это накладывает ограничения на материалы и конструкцию микрофона, а также делает невозможным размещение электроники рядом с микрофоном. Микрофон подсоединяется к специализированному усилителю радиационно стойким высокотемпературным кабелем типа КНМСС длиной до 50 метров, при этом кабель приваривается к выводам микрофона.

В процессе эксплуатации необходимо проводить периодическую проверку метрологической исправности микрофона. При этом непосредственные измерения параметров микрофона невозможны. Отсоединение микрофона для непосредственного измерения его параметров также невозможно, нахождение рядом с микрофоном для его озвучивания эталонным источником шума возможно только во время плановой остановки реактора и связано с получение повышенной дозы ионизирующего излучения обслуживающим персоналом. Таким образом, необходимо проводить измерение электрических параметров микрофона и кабеля имея доступ только к удаленному от микрофона концу кабеля. Так как применяемый кабель имеет значительную длину и неидеальные частотные характеристики в необходимом диапазоне частот (до 20 кГц), импедансом кабеля при измерении импеданса микрофона пренебречь нельзя.

## Измерение параметров кабеля

Подразумевается использование симметричного кабеля состоящего из 2-х жил в общем экране. Используемый кабель типа КНМСС 2х0,6 d=5,0 (по 16-505-564-75 ТУ) относится к таким кабелям.

Так как производится измерение параметров кабеля с уже

подключенным микрофоном (пьезоэлемент микрофона подключен к двум сигнальным проводникам, а экран брошен), то проводим измерение импеданса кабеля между двумя замкнутыми жилами и экраном в полосе от 2 кГц до 20 кГц с шагом 5 Гц получаем развертку по частоте проводимости$Y_{mcs_i}$, i=1..3601 и 20 измерений на частоте 1 кГц$Y_{mcs1_i}$, i=1..20.

Теперь чтобы вычислить фактические параметры кабеля проводится его моделирование. Модель кабеля представляется в виде эквивалентной цепочки из:

– погонной индуктивности жил кабеля$L$,

– погонной емкости между жилами и экраном$C_{cs}$,

– погонного сопротивления жил кабеля$R_c$,

– погонного переходного сопротивления$G$(сопротивления изоляции).

Цепочка (кабель) имеет длину$l$.

С помощью телеграфных уравнений [1, с.350] для цепи с распределенными параметрами имеем:

$$U_1 = U_2\cosh(\gamma l) + \hat{Z} I_2 \sinh(\gamma l), I_1 = I_2\cosh(\gamma l) + \frac{U_2}{\hat{Z}} I_2 \sinh(\gamma l), (1)$$

где$I_1$,$U_1$- комплексные ток и напряжение в начале линии,$I_2$,$U_2$- комплексные ток и напряжение в конце линии,$\hat{Z}$- характеристическое (волновое) сопротивление,$\gamma$- коэффициент (постоянная) распространения,

$$\hat{Y} = \sqrt{\frac{Y_0}{Z_0}} = \sqrt{\frac{G_0 + i\omega C_0}{R_0 + i\omega L_0}}, \gamma = \sqrt{Y_0 Z_0} = \sqrt{(G_0 + i\omega C_0)(R_0 + i\omega L_0)}$$

где$Z_0$- комплексное продольное сопротивление,$Y_0$- комплексная поперечная проводимость.

При измерении брошенного кабеля (на конце кабеля ничего нет, концы брошены в воздухе, это наш случай)$I_2 = 0$, получаем

$$U_1 = U_2\cosh(\gamma l), I_1 = \frac{U_2}{\hat{Z}} \sinh(\gamma l),$$

отсюда импеданс в начале кабеля

$$Z = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2\cosh(\gamma l)}{\frac{U_2}{\hat{Z}} \sinh(\gamma l)} = \hat{Z} \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)}$$

отсюда для удобства вычислений проводимость в начале кабеля$Y = \tanh(\gamma l)\hat{Y}$,где$\hat{Y}$- волновая проводимость,$\gamma$- коэффициент (постоянная) распространения.

В наших обозначениях мы получаем$Y_{ccs} = \tanh(\gamma_{cs} l)\hat{Y_{cs}}$,где$\hat{Y_{cs}}$- волновая проводимость,$\gamma_{cs}$- коэффициент (постоянная) распространения для режима измерения между двумя замкнутыми жилами и экраном,$Y_{ccs}$- вычисленная проводимость для режима измерения между двумя замкнутыми жилами и экраном.

$$\hat{Y_{cs}} = \frac{G_{cs} + i\omega C_{cs}}{R_{cs} + i\omega L_{cs}}, \gamma_{cs} = \sqrt{(G_{cs} + i\omega C_{cs})(R_{cs} + i\omega L_{cs})},$$

Таким образом, зная погонные параметры кабеля, мы можем рассчитать импеданс в начале кабеля и сравнить его с измеренным.

Беря за отправную точку паспортные параметры кабеля и известную длину из документации на канал, мы начинаем варьировать параметры:

- погонную емкость между жилами и экраном$C_{cs}$,
- погонное сопротивление жил кабеля$R_c$,
- погонное переходное сопротивление$G$,
- длину кабеля$l$.

Индуктивность$L$оставляем неизменной, так как она слабо подвержена изменению со временем.

Варьируя изменяемые параметры мы приближаем расчетный импеданс кабеля к измеренному, вычисляя таким образом фактические значения параметров$C_{cs}$,$R_c$,$G$и$l$. Для этого вводим функцию ошибки:

$$E(C_{cs}, R_c, G, l) = \sum_{i=1}^{3601} ((\Re(Y_{ccs}(f_j, C_{cs}, R_c, G, l)) - \Re(Y_{mcs}(f_j)))^2 + (\Im(Y_{ccs}(f_j, C_{cs}, R_c, G, l)) - \Im(Y_{mcs}(f_j)))^2)$$

где$Y_{ccs}(f_j, C_{cs}, R_c, G, l)$- вычисленная в модели проводимость кабеля с параметрами $C_{cs}$,$R_c$,$G$и$l$на частоте$f_j$(индуктивность$L$принята константой), $Y_{mcs}(f_j)$- измеренная проводимость на частоте$f_j$,$\Re(Y)$- реальная часть проводимости$Y$, $\Im(Y)$- мнимая часть проводимости$Y$.

Задача минимизации функции ошибки$E(C_{cs}, R_c, G, l)$решается с

помощью алгоритма многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта.

Минимизировав функцию ошибки мы находим фактические значения параметров $C_{cs}$,$R_c$,$G$и$l$для данного включения.

**Измерение параметров микрофона**

Проводим измерение импеданса между двумя жилами кабеля с подключенным микрофоном при брошенном экране в полосе от 2 кГц до 20 кГц с шагом 5 Гц получаем развертку по частоте проводимости$Y_{mcc_i}$, i=1..3601 и 20 измерений на частоте 1 кГц $Y_{mcc1_i}$, i=1..20.

**Получение импеданса микрофона**

Чтобы получить импеданс микрофона$Y_{m_i}$и$Y_{m1_i}$«вычитаем» из измеренного импеданса микрофона с кабелем$Y_{mcc_i}$и$Y_{mcc1_i}$импеданс кабеля$Y_{cc_i}$и $Y_{cc1_i}$между жилами вычисленный опираясь на полученные на предыдущем этапе значения параметров кабеля. Для этого обратимся опять к упомянутым ранее уравнениям для цепи с распределенными параметрами (1). Из них получаем

$$Y_2 = Y_1 \frac{\frac{\hat{Y}}{Y_1}\sinh(\gamma l) - \cosh(\gamma l)}{\frac{Y_1}{\hat{Y}}\sinh(\gamma l) - \cosh(\gamma l)},$$

где$Y_2$- проводимость на конце кабеля,$Y_1$- проводимость в начале кабеля,$\hat{Y}$- волновая проводимость,γ- коэффициент (постоянная) распространения.

Так как на конце кабеля у нас закреплен микрофон, то в наших обозначениях мы получаем:

$$Y_m = Y_{mcc} \frac{\frac{\hat{Y_{cc}}}{Y_{mcc}}\sinh(\gamma_{cc} l) - \cosh(\gamma_{cc} l)}{\frac{Y_{mcc}}{\hat{Y_{cc}}}\sinh(\gamma_{cc} l) - \cosh(\gamma_{cc} l)}, (2)$$

где$Y_m$- проводимость микрофона,$Y_{mcc}$- проводимость в начале кабеля,$\hat{Y_{cc}}$- волновая проводимость,$\gamma_{cc}$- коэффициент (постоянная) распространения.

Здесь$Y_{mcc}$,$\hat{Y_{cc}}$и$\gamma_{cc}$для режима измерения между двумя жилами при брошенном экране.

$$Y_{cc}^{\wedge} = \sqrt{\frac{G_{cc} + i\omega C_{cc}}{R_{cc} + i\omega L_{cc}}}, \gamma_{cc} = \sqrt{(G_{cc} + i\omega C_{cc})(R_{cc} + i\omega L_{cc})}$$

Электрические погонные параметры кабеля при измерении импеданса между замкнутыми жилами и экраном и при измерении между двумя сигнальными жилами при брошенном экране связаны следующими отношениями:

$$C_{cc} = K_C C_{cs}, R_{cc} = K_R R_{cs}, L_{cc} = K_L Lcs, G_{cc} = K_G G_{cs}$$

Исходя из конструкции кабеля коэффициенты имеют следующие значения:$K_C = 4.3, K_R = 4.0, K_L = 4.0, K_G = 0.5$

Таким образом, из (2) мы получаем импеданс микрофона$Y_m$.

**Вычисление электрических параметров микрофона**

Известна эквивалентная схема микрофона МПВ-03м. Зная параметры эквивалентной схемы, мы можем вычислить импеданс микрофона$Y_{mc}$каким он должен быть:

$$Y_{mc}(f) = \frac{1}{R_d + iQR_d(\frac{f}{F_r} - \frac{F_r}{f})} + i\omega C_0 (3)$$

где$f$- частота,$R_d$- сопротивление динамической ветви микрофона,$Q$- добротность микрофона,$F_r$- частота резонанса микрофона,$C_0$- статическая емкость микрофона.

Но известен только измеренный импеданс микрофона$Y_m$. Введем функцию ошибки:

$$E(Q, F_r, R_d, C_0) = \sum_{i=1}^{3601} (\Im(Y_{mc}(F_j, Q, F_r, R_d, C_0)) - \Im(Y_m(f_j)))^2$$

Как видно здесь учитывается только мнимая часть проводимости, так как на практике реальная часть очень зашумлена и приводит к большим ошибкам.

Варьировать будем следующие параметры микрофона:

- добротность $Q$,
- частоту резонанса$F_r$,
- сопротивление динамической ветви$R_d$,
- емкость$C_0$.

Задача минимизации функции ошибки$E(Q, F_r, R_d, C_0)$решается с помощью упоминавшегося ранее алгоритма многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта.

Перед запуском алгоритма оптимизации мнимая часть$Y_m$фильтруется для уменьшения шумов и улучшения сходимости алгоритма.

Начальные значения параметров находятся следующим образом:
начальное значение емкости$C_0$находится по формуле

$$C_0 = \frac{4\pi}{4\pi^2(f_b^2 - f_a^2)} \int_{f_a}^{f_b} \Im(Y_m) df \approx \frac{1}{\pi(f_{N-1}^2 - f_0^2)} \sum_{j=0}^{N-1} \Im(Y_{m_i}) \Delta f,$$

– начальное значение частоты основного резонанса$F_r$находится как частота абсолютного максимума реальной части$Y_m$,

– начальное значение сопротивления динамической ветви$R_d$находится как величина обратная к значению реальной части проводимости в точке основного резонанса$F_r$,

– начальное значение добротности$Q$находится как отношение частоты основного резонанса$F_r$к ширине купола основного резонанса на половине высоты купола.

Минимизируя функцию ошибки$E(Q, F_r, R_d, C_0)$мы приближаем расчетный импеданс микрофона$Y_{mc}(f, Q, F_r, R_d, C_0)$к измеренному$Y_m(f)$. Таким образом мы находим фактическое значение параметров$Q$,$F_r$, $R_d$и$C_0$.

**Вывод**

В результате вышеописанной процедуры определены все значимые параметры кабеля и микрофона, что позволяет проверить их на соответствие требованиям ТУ, а также оценить их изменение относительно результатов предыдущих проверок и принять решение о метрологической исправности микрофона.

**Список литературы**

1. "Теоретические основы электротехники". Том 1. Основы теории линейных цепей. П.А. Ионкин. Москва, 1976

**Повышение точности определения добротности по дискретным значениям частотной характеристики пьезорезонаторов**

***В.Л. Земляков, С.Н. Ключников, Ю.А. Ерусалимский***

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

Традиционно значение добротности *Q*используют для оценки резонансных свойств пьезорезонаторов. При этом стандарт[1] позволяет определять *Q* с погрешность до 10-12%. Однако, в последнее время появились работы, в которых значение *Q*используют для определения других параметров пьезорезонатора, например, *Q* используют для определения модуля пьезоматериала, из которого он изготовлен. Это требует более высокой точности определения *Q*.

Измерение *Q* чаще всего проводится по частотным характеристикам проводимости пьезорезонатора. В современных средствах измерений, построенных с применением средств цифровой техники, эти характеристики определяют в дискретных точках.

Для получения высокой точности определения добротности по результатам измерений проводимости в дискретных точках, интервал между точками должен быть очень маленьким, что приводит к большому объему измерений и, как следствие, большим затратам времени.

В работе предложен простой алгоритм сокращения объема измерений для определения добротности с высокой точностью по ширине резонансной кривой $\Delta\omega$ активной составляющей проводимости пьезорезонаторов в области резонанса.

Рассмотрим постановку задачи.

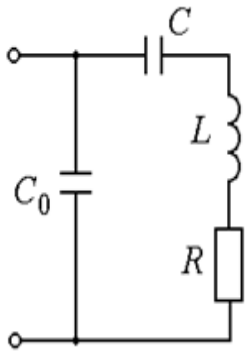
Пьезорезонатор в области резонанса описывается эквивалентной электрической схемой (рис. 1, *а*).

Зависимость активной составляющей проводимости пьезорезонатора от частоты $G(\omega)$ описывается формулой [1].

$$G(\omega) = \frac{R}{R^2 + \left(\omega L - 1/\omega C\right)^2} \qquad (1)$$

График этой зависимости, в области частоты резонанса $\omega_p$ в диапазоне частот $\omega_1 \div \omega_2$, приведен на рис. 1, *б*(сплошная и пунктирная линии соответствуют разной добротности пьезорезонатора).

*а*




*б*

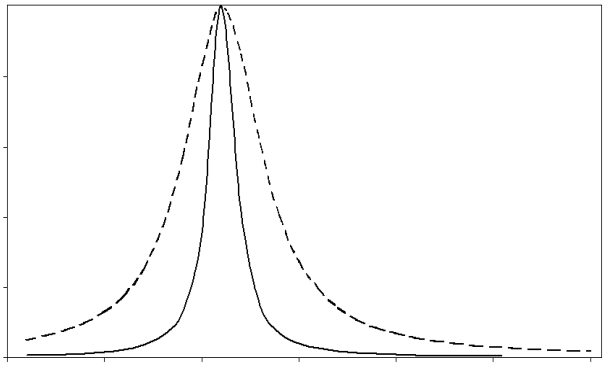



Рис. 1 – Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора и зависимость активной составляющей проводимости от частоты

Наиболее точное определение добротности по измеренной зависимости заключается в определении ширины резонансной кривой на уровне 0,5 и расчете добротности по формуле[9]:

$$Q = \omega_p / \Delta\omega \qquad (2)$$

Однако, при небольшом числе точек измерений, попадание в точку с уровнем 0,5 является редким событием. Замена же уровня 0,5 ближайшим измеренным значением (обычный способ) приводит к погрешности, которая может составлять заметную величину.

Для уменьшения погрешности определения добротности, соединим соседние ближайшие к уровню 0,5 от максимума точки прямой, воспользовавшись известной из аналитической геометрии формулой для построения прямой линии по двум точкам

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \qquad (3)$$

в которой индексы «1» и «2» относятся к соседним точкам ближайшим к уровню 0,5.

На этой прямой можно задать уровень 0,5 и определить соответствующую этому уровню частоту.

Полученные уточнённые значения частот позволяют определять добротность по формуле (2) с высокой точностью.

Рассмотрим компьютерный эксперимент.

Для схемы (рис. 1, *а*) с параметрами элементов: $C_0$ = 10 nF, $C$ = 1 nF, $L$ = 10mH, $R$ =20 Ом, $Q$ = 158,11, была рассчитана частотная зависимость активной составляющей проводимости в дискретных точках в области

резонанса. Данные представлены в таблице 1. Соседние точки, ближайшие к уровню 0,5, выделены цветом.

По данным таблицы 1 построены графики (рис. 2). Линия 1 соответствует активной составляющей проводимости. Уровень 0,5 от максимального значения показан на этом рисунке линией 2. Линия 3 соответствует прямой, проведенной через соседние точки, ближайшие к уровню 0,5.

Таблица 1. Результаты моделирования

| *f* , *кГц* | *G* , *мСм* | 0,5**G* | *f* , *кГц* | *G* , *мСм* | 0,5**G* |
|---|---|---|---|---|---|
| 50,07 | 11,86 | 25 | 50,37 | 49,55 | 25 |
| 50,12 | 15,71 | 25 | 50,42 | 42,82 | 25 |
| 50,17 | 21,27 | 25 | 50,47 | 32,84 | 25 |
| 50,22 | 29,10 | 25 | 50,52 | 24,11 | 25 |
| 50,27 | 38,95 | 25 | 50,57 | 17,73 | 25 |
| 50,32 | 47,73 | 25 | 50,62 | 13,30 | 25 |

Используя данные таблицы 1 по формуле (3) были найдены значения частот, соответствующих уровню 0,5 на прямой (линия 3). В результате, до частоты резонанса это 50,19 кГц, после частоты резонанса – 50,51 кГц.

Результаты расчета добротности по формуле (2) приведены в таблице 2.

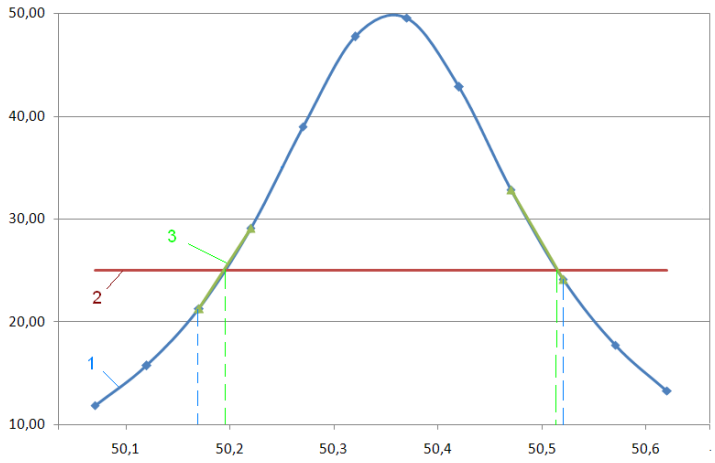



Рис. 2 – Графики, построенные по данным таблицы 1

Таблица 2. Результаты расчета добротности

| $Q$ | $Q_{0,5}$ | $\Delta_{0,5}$% | $Q_{0,5y}$ | $\Delta_{0,5y}$% |
|---|---|---|---|---|
| 158,11 | 143,91 | 8,9 | 157,41 | 0,4 |

Использованы обозначения:

$Q_{0,5}$ – значение добротности, полученное по частотам, соответствующим точкам активной составляющей проводимости, ближайшим к уровню 0,5 от максимального значения,

$Q_{0,5y}$ – значение добротности, полученное предлагаемым алгоритмом, в котором частоты, соответствующие уровню 0,5 определяются по прямой, соединяющей две соседние точки активной составляющей проводимости,

Δ% - относительная погрешность определения добротности.

Полученные теоретические результаты подтверждают правильность работы предлагаемого алгоритма.

Экспериментальные исследования предложенного алгоритма проводились с помощью программно-аппаратного комплекса, построенного на основе LabView.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3:

$N$ – количество точек измерения в заданном частотном диапазоне.

$Q_{изм}$ – добротность пьезокерамического элемента, измеренная с помощью аппаратуры «Цензурка-МА».

$t$ – время затраченное на проведение исследования при заданных условиях измерения.

Остальные обозначения соответствуют введенным ранее в таблице 2.

Таблица 3 - Результаты экспериментальных исследований

| $N$ | $Q_{изм}$ | $Q_{0,5}$ | $\Delta_{0,5}$% | $Q_{0,5y}$ | $\Delta_{0,5y}$% | $t$, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | 117 | 126,4 | **8,0** | 115,8 | **1,0** | 4 |
| **30** | 117 | 122,1 | **4,4** | 116,8 | **0,2** | 8,5 |
| **60** | 117 | 115,9 | **1,0** | 116,9 | **0,1** | 16 |

Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм позволяет определять добротность с погрешностью порядка 1% при наличии всего 15 точек в заданном частотном диапазоне. Определение добротности обычным способом с такой погрешностью требует увеличения числа отсчетов по частоте до 60 точек, что приводит к увеличению времени измерений в четыре раза.

**Список литературы**

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987

2. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с.

# Использование LabVIEW для построения програмно-аппаратных комплексов измерения параметров пьезоэлементов и преобразователей

***С.Н. Ключников, Я.В. Молчанова***

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

В XX веке достаточно хорошо были изучены свойства пьезокерамических элементов (ПКЭ) и пьезокерамических преобразователей, что привело к их активному использованию в различных областях. В настоящее время пьезоэлектрические преобразователи широко используются для ультразвуковой диагностики в медицине, в авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе. Использование пьезоэлементов и преобразователей в различных областях народного хозяйства, науки и техники обуславливает высокую актуальность измерения их параметров при исследовании опытных образцов, при серийном производстве и в процессе эксплуатации.

Для определения параметров ПКЭ используются различные методы, которые требуют проведения измерений частотных характеристик исследуемого образца.Проводимость на произвольной частоте является величиной комплексной и характеризуется как модулем, так и фазой, или может быть представлена в виде суммы активной и реактивной составляющих: $Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega)$.

Для измерения частотных характеристик проводимости ПКЭ часто применяются схемы измерений, использующие делители напряжения: когда последовательно с ПКЭ устанавливается добавочный резистор [1].

Возможный вариант схемы измерения проводимости показан на рис. 1 [2].

Для измерения параметров используются как стандартные приборы, согласно рис. 1, так и специальные комплексы, разрабатываемые ведущими предприятиями в области пьезоэлектрического приборостроения (НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, ООО «Аврора-Элма» и др.).

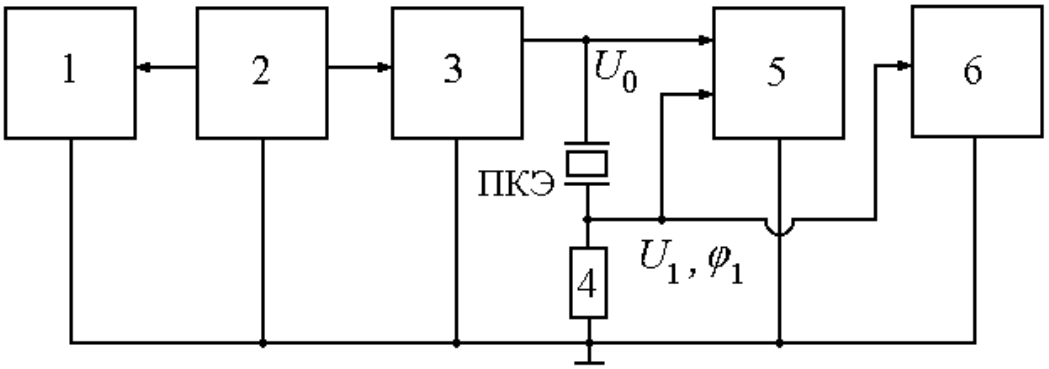



Рис. 1 - Структурная схема измерений проводимости ПКЭ
(1 − частотомер, 2 − генератор синусоидальных сигналов, 3 − усилитель мощности с низким выходным сопротивлением, 4 − блок резисторов, 5 − фазометр, 6 − вольтметр)

Современные средства разработки прикладного программного обеспечения предоставляют широкий выбор инструментов, как для опытных программистов, так и для новичков в программировании [3]. Одним из таких современных средств разработки инженерных комплексов является LabViEW (LaboratoryVirtualInstrumentEngineeringWorkbench). LabVIEW позволяет разрабатывать прикладное программное обеспечение для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения информации и результатов расчетов, а также моделирования как отдельных объектов, так и автоматизированных систем в целом [4].

В соответствии с представленной на рис. 1 структурной схемой для измерения параметров ПКЭ средствами LabView необходимо воздействовать на исследуемый образец синусоидальным сигналом, и по измеренным сигналам с нагрузочного сопротивления и ПКЭ рассчитывать параметры.

На рис. 2 представлена «лицевая панель» разработанного комплекса измерения параметров пьезоэлементов на вкладке «проведение измерений».

С помощью элемента *Tabcontrol* лицевая панель была разбита на несколько вкладок, отвечающих за проведение измерений,

отображениеизмеренных графиков модуля и активной составляющей проводимости и отображение найденных параметров.

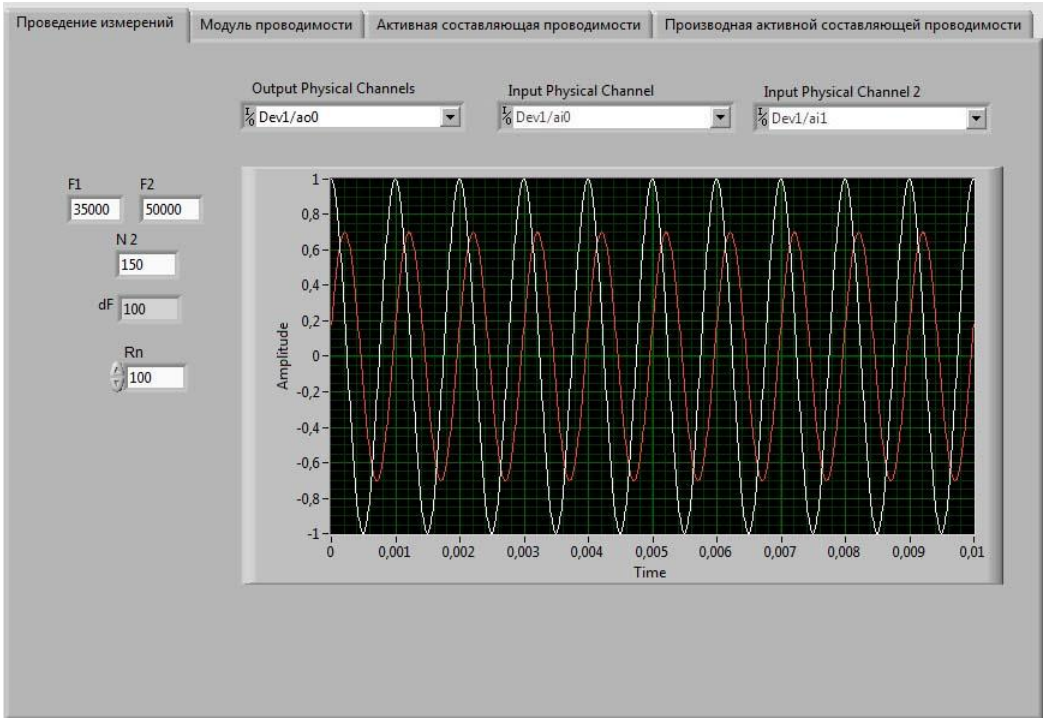



Рис. 2 - Лицевая панель разработанного комплекса на вкладке проведение измерений

В левой области лицевой панели располагаются следующие элементы управления: окна ввода частотного диапазона измерений; поле ввода количества точек измерений; элемент отображения шага по частоте в соотвествии с заданными условиями измерений; элемент ввода величины нагрузочного сопротивления.Для ввода границ частотного диапазона используются стандартные объекты *Numericcontrol* .

Границы диапазона измерений следует выбирать таким образом, чтобы в области резонанса четко наблюдались характерные точки.По центру располагается графический индикатор, отображающий синусоидальный сигнал воздействия на исследуемый образец и измеренные сигналы с нагрузки и с исследуемого пьезоэлемента.В верхней области лицевой панели располагаются элементы выбора физических портов ввода и вывода сигналов.

На рис. 3 показан вид лицевой панели разработанного программно-аппаратного комплекса на вкладке модуль проводимости.

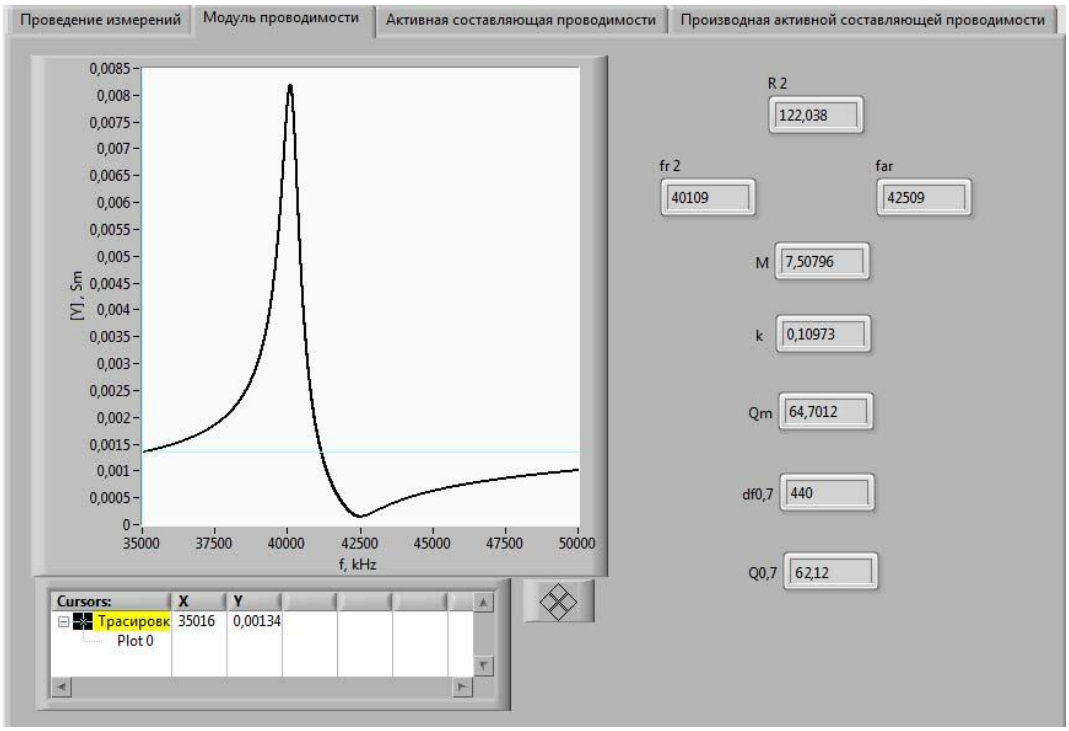



Рис. 3 - Лицевая панель на вкладке "Модуль проводимости"

В левой области лицевой панели располагается графический индикатор*GraphXY*, позволяющий отображать график измеренной частотной характеристики модуля проводимости. По оси абсцисс отображается частота измерений в кГц, а по оси ординат проводимость в См. Правее области графического отображения полученной частотной характеристики модуля проводимости располагается группа объектов отображения найденныхпараметров. Для вывода найденных параметров используется объект *NumericIndicator*. В таблице 1 представлены результаты определения параметров ПКЭ по измеренным частотным характеристикам модуля проводимости.

Сравнительный анализ результатов измерений разработанным комплексом и сертифицированным оборудованием показал, что использование современного средства разработки инженерных приложений LabVIEW в области пьезоэлектрического приборостроения позволяет измерять параметры ПКЭ и преобразователей, представленные в таблице 1, с относительной погрешностью порядка 5 %.

Таблица 1 Результаты определения параметров

| | Образец №1 | Образец №2 | Образец №3 |
|---|---|---|---|
| *1* | *2* | *3* | *4* |
| $F_r$, кГц | 8,14 | 17,05 | 24,3 |
| $F_{ar}$, кГц | 8,92 | 18,17 | 25,1 |
| $R$, Ом | 29 | 17 | 18 |
| $k$ | 0,4 | 0,35 | 0,25 |
| $Q$ | 175 | 63 | 85 |

**Список литературы**


1. Земляков, В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография [текст] / В. Л. Земляков. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 180 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).

2. Земляков, В. Л. Измерительные технологии в пьезокерамическом приборостроении [текст]: учебное пособие, гриф УМО. Ростов н/Д: Изд-во ООО «ЦВВР», 2008. 114 с.

3. . Виноградова, Н.А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW [текст] / Н.А.Виноградова, Я.И. Листратов, Е.В.Свиридов // – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 50 с.

4. Федосов, В.П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW [текст] / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 392 с.

5. Ключников, С.Н. Метод определения добротности резонансных систем по амплитудным измерениям и его аппаратная реализация на базе LABVIEW [Электронный ресурс] / С.Н. Ключников // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т.13, №3. – Режим доступа : http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/521.

**Простой измеритель емкости**

***Я.В. Молчанова, С.А. Толмачев***

*Институт высоких технологий и пьезотехникиЮжного Федерального Университета, г. Ростов-на-Дону,Россия*

В процессе производства и различных испытаний пьезоэлементов (ПЭ) измерение емкости – это часто выполняемая операция. Измерение емкости проводится как для определения качества пьезоэлемента, так и для определения электромеханических свойств готового изделия.

В настоящий момент существует огромное количество измерителей емкости, построенных на различных принципах. Например, мостовые схемы, схемы, в основе которых лежит разряд конденсатора (переходной процесс), различные делители напряжения и т.д.

Простой измеритель емкости можно построить, используя дифференциальные свойства конденсатора. Структурная схема простого измерителя емкости приведена на рис.1, где используются следующие обозначения:

Г – генератор линейно-нарастающего (пилообразного) напряжения;

ДЦ – дифференциальная цепь;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

УУ – устройство управления.

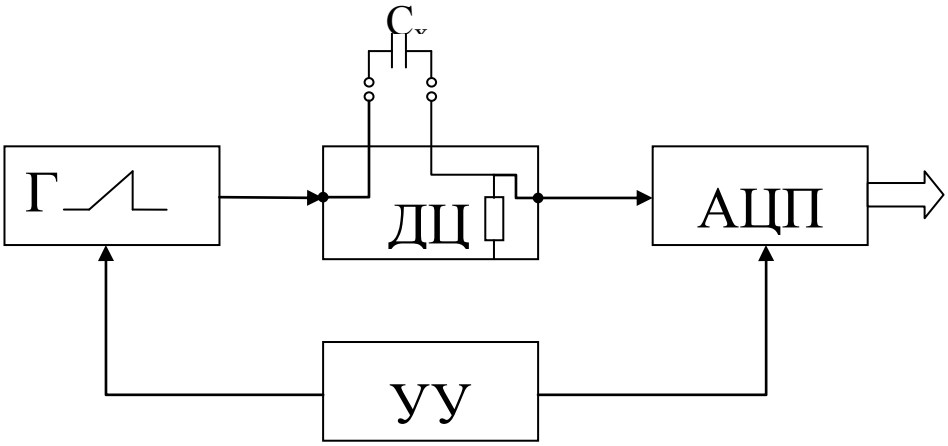



Рис.1 - Структурная схема простого измерителя емкости

Из электротехники известно, что при подаче на конденсатор переменного напряжения $U$, ток $i$ через него определяется формулой:

$$i = C\frac{dU(t)}{dt},$$

где $C$ – емкость конденсатора.

Если использовать линейно-нарастающее (пилообразное) напряжение вида:

$$U(t) = at,$$

то через конденсатор течет постоянный ток и,соответственно, емкость конденсатора будет определяться выражением:

$$C = \frac{i}{a}.$$

Работа измерителя емкости, основанная на дифференцирующих свойствах конденсатора, была промоделирована в среде Multisim.

Результаты представлены на рис.2, 3.

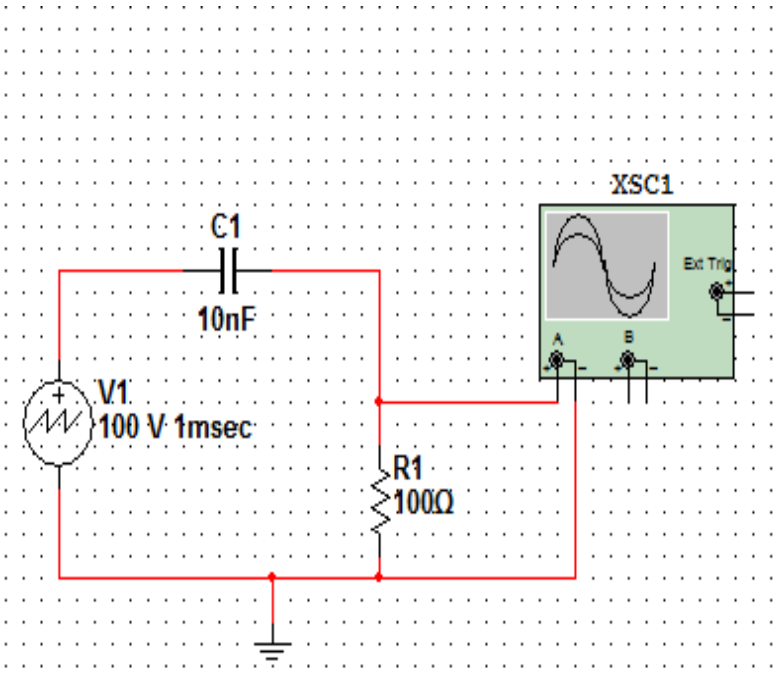



Рис. 2 - Схема моделирования в программе Multisim

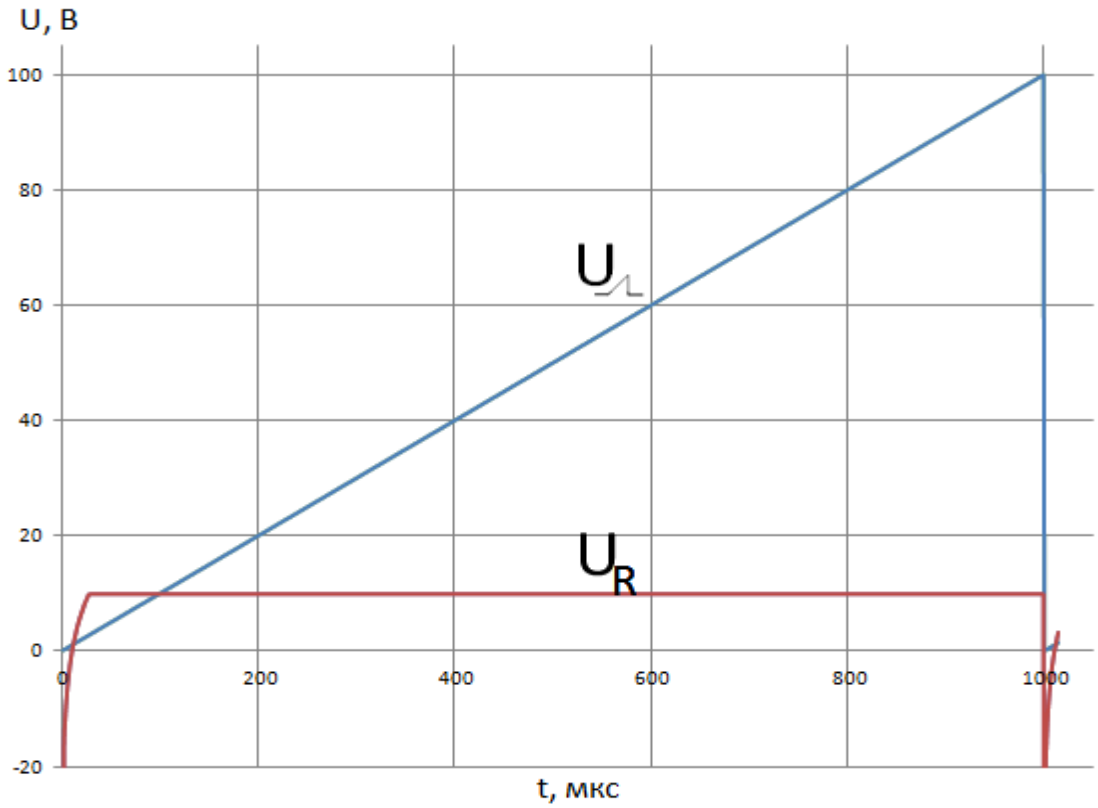



Рис.3 - Результаты моделирования:осциллограмма входного и выходного сигналов

Таким образом, моделирование подтверждает возможность построения простого измерителя емкости на основе дифференцирующих свойств конденсатора. Момент измерения падения напряжения на резисторе выбирается в середине нарастания опорного напряжения. Преимуществами данного подхода является, во-первых, простота его реализации, во- вторых, возможность измерения широкого диапазона емкостей при регулировании частоты опорного генератора или сопротивления дифференциальной цепи.

**Список литературы**

1. Земляков В.Л. Электротехника и электроника: учебник. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2008. – 304 с.

3.Хернитер М.Е. Электронное моделирование в Multisim. Москва: изд-во ДМК Пресс, 2010. – 492 с.

# Методика синтеза пространственно-временной модели подвижного объекта и его наблюдателя

***С.А. Толмачев***

*Институт высоких технологий и пьезотехникиЮжного Федерального Университета, г. Ростов-на-Дону,Россия*

Использование приемников спутниковых навигационных систем (СНС) GPS/ГЛОНАСС на борту наземных транспортных средств (ТС) позволяет на сегодняшний день определять координаты и скорость ТС с требуемой точностью.Однако, по-прежнему, актуальными остается ряд не решенных проблем. Во-первых, до сих пор существуют сложности в определении угловых параметров наземных ТС по спутниковым измерениям. Во-вторых, не решена проблема временных деградаций видимого спутникового созвездия, когда существенно ухудшаются точностные показатели спутниковых навигационных решений, и, в-третьих; не решена проблема непрерывного (высокочастотного) оценивания навигационных параметров, так как дискретность получения данных от спутников составляет, в лучшем случае, 1с.

Комплексирование мобильных спутниковых навигаторов и инерциальных навигационных систем позволяет частично решить описанные проблемы. В настоящее время известно огромное количество подходов к решению навигационной задачи транспортных средств (ТС) с интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системой (ИИС НС). Однако, по-прежнему актуальна проблема эффективного использования разнородной измерительной информации в ИИС НС с грубыми инерциальными измерителями.

Эффективным способом обеспечения заданной точности в классическом подходе считается применение статически оптимальных дискретных фильтров, позволяющих по измерениям спутниковой навигационной системы (СНС) непосредственно получать оценки для навигационных параметров объекта [1-3]. В свою очередь известно, что применительно к ИИС НС с грубыми инерциальными датчиками, синтезируемые фильтры имеют малые запасы устойчивости в силу

особенностей динамических возмущений и сильной зашумленности измерений [3]. Это объясняется, во-первых, отсутствием на данный момент адекватных математических моделей погрешностей MEMS-датчиков, применимых на длительные временные интервалы эксплуатации ТС, а, во-вторых, отсутствием возможности периодически калибровать эти датчики. Кроме того, классический подход борьбы с расходимостью фильтра, заключающийся в рестарте оценок координат и скорости по решению СНС для наземного транспорта неприменим, так как всплески переходных процессов фильтров, следующие за рестартом, затрудняют анализ движения автомобиля с высокочастотной непрерывной оценкой фазовых переменных. Таким образом, применение традиционных методов оптимального оценивания навигационных параметров ТС на основе стохастической фильтрации в пространстве состояний в рассматриваемом случае не эффективно.

Периодическая корректировка измерений ИИС НС по измерениям СНС также не позволяет обеспечить требуемую точность определения фазовых переменных ТС. Неэквидистантность временных осей измерений инерциальной и спутниковой навигационных систем имеет случайный характер и приводит к росту методической ошибки местоопределения [1].

Поэтому, решение поставленной навигационной задачи основано на принципиально отличающемся подходе к синтезу стохастического фильтра, основанного на пространственно-дифференциальной фильтрации. Возможность применения данного подхода вытекает вследствие того, что ТС движутся по дорогам, которые в свою очередь можно представить как одномерные пространственные многообразия с известными координатами, доступными из цифровых навигационных карт.

Известно, что объект в пространстве состояний описывается дифференциальными уравнениями с дифференцированием по времени. Однако, параметр времени в рассматриваемом классе задач, как избыточный, может быть исключен, а для описания эволюции навигационных параметров возможно использование дифференциальных уравнений пространственной топологии.

Цифровые навигационные карты представляют собой базы координат точек POI (points of interest), а автомобильные трассы между соседними POI апроксимируются линейными отрезками. Таким образом, произвольный *k*-й участок автомобильной трассы может быть задан следующими пространственно-дифференциальными уравнениями [4]:

$$\frac{\partial a_M(l)}{\partial l} = l\cos\beta_k;$$

$$\frac{\partial b_M(l)}{\partial l} = l\sin\beta_k, \qquad (1)$$

где $a_M(l)$, $b_M(l)$ – декартовые координаты; $l$ имеет смысл натурального параметра текущей длины одномерного многообразия, а $\beta_k$ – характеризует угол наклона кривой трассы к осям карты и определяется по координатам соседних *k*-1-ой $\{a_{k-1};b_{k-1}\}$ и *k*-ой $\{a_k;b_k\}$ POI как

$$\beta_k = \operatorname{arctg}\frac{a_k - a_{k-1}}{b_k - b_{k-1}}.$$

В векторной форме уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{\partial Y_M(l)}{\partial l} = f(Y_M, l, a_M), \qquad (2)$$

где $Y_M = [a_M \quad b_M]^{\mathrm{T}}$ – модельный вектор состояния ТС; $f(Y_M, l, a_M)$ – известная векторная функция.

В уравнения наблюдения для интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем, как правило, входит функция от текущих декартовых координат $\{a, b\}$ ТС:

$$Z(t) = h(Y,t) + \eta(t) \qquad (3)$$

где $Y = [a \quad b]^{\mathrm{T}}$ – восстановленный по измерениям вектор состояния ТС; $Z(t)$ - вектор выходных сигналов наблюдателя ($Z \in R^q$); $h(Y,t)$ – заданная нелинейная вектор-функция; $\eta(t)$ – вектор белого гауссовского шума с нулевым средним и матрицей интенсивностей $D_\eta(t)$, $t$ – независимая переменная – параметр времени.

Аналогичным образом движение ТС вдоль одномерного многообразия (2) по измерениям (3) в векторной стохастической дифференциальной форме с параметрической неопределенностью [4] запишется в виде:

$$\frac{\partial Y(l)}{\partial l} = f(Y,l,\alpha) + \xi(l), \qquad (4)$$

где $f(Y,l,a)$ – известная векторная функция с точностью до некоторого параметра *a* с ядром, идентичным ядру из уравнений (2); $\xi(l)$ - белый гауссовский шум с нулевым средним и известной матрицей интенсивностей.

Таким образом, движение ТС описывается линейными функциями, вследствие линейного представления всей формы траектории по координатам POI, а конструируемые фильтры по представленному описанию движения, соответственно, являются линейными по определению. На основе уравнений (2) и (4) могут быть синтезированы алгоритмы линейной стохастической пространственной фильтрации, которые позволят осуществить теоретически строгое апостериорное оптимальное оценивание навигационного вектора по выбранному вероятностному критерию.

**Список литературы**

1. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации / 2-е изд. М.: МГУ, 2010. 126 с.

2. Grewal M.S., Andrews A.P. Application of Kalman Filtering to GPS, INS, and Navigation (Notes), Kalman Filtering Consulting Associates. Anaheim, CA, 2000.

3. Демидов О.В. Задача тесной интеграции систем ГЛОНАСС и GPS с ИНС разных классов точности: Дисс. на соиск. степ. к.ф.-м.н. / О.В. Демидов. М.: МГУ, 2009. 139 с.

4. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия. Методы и приложения. М.: Наука, 1986.

**Разработка датчика давления для комплекса автоматической сигнализации приводнения самолета-амфибии.**

***О.В. Шатуновский***

*ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону, Россия*

На самолетах, приземляющихся на водную поверхность, имеется система сигнализации приводнения самолета. Система может содержать комплекс датчиков прямого или косвенного действия, инвазивные или не инвазивные. Для модернизации системы сигнализации приводнения самолета-амфибии Бе-200 по техническому заданию НКБ цифровой обработки сигналов ЮФУ, был разработан инвазивный датчик прямого действия, измеряющий перепад давления под днищем самолета при приводнении.

Целью работы являлось проведение ОКР для создания датчика давления для системы автоматической сигнализации приводнения самолета-амфибии. Условия работы такого датчика существенно отличаются от общепромышленных, и по заданию имеется ряд специфических условий, которые отличают работу самолет-амфибию. К таким условиям можно отнести:

- датчик должен работать в пресной и морской воде;
- в датчике должна быть предусмотрена защита от обледенения;
- датчик должен монтироваться заподлицо корпуса самолета и не создавать препятствия обтекающему воздуху;
- датчик должен иметь компенсацию забортного давления;
- датчик должен выдерживать гидроудары;
- датчик должен монтироваться в согласованные посадочные места;
- датчик должен иметь электромагнитную совместимость в части восприимчивости к воздействию ЭМП;
- датчик должен удовлетворять ряду требований живучести и стойкости к внешним воздействиям.

По предъявленным требованиям был разработан датчик давления, внешний вид которого представлен на рисунке 1.

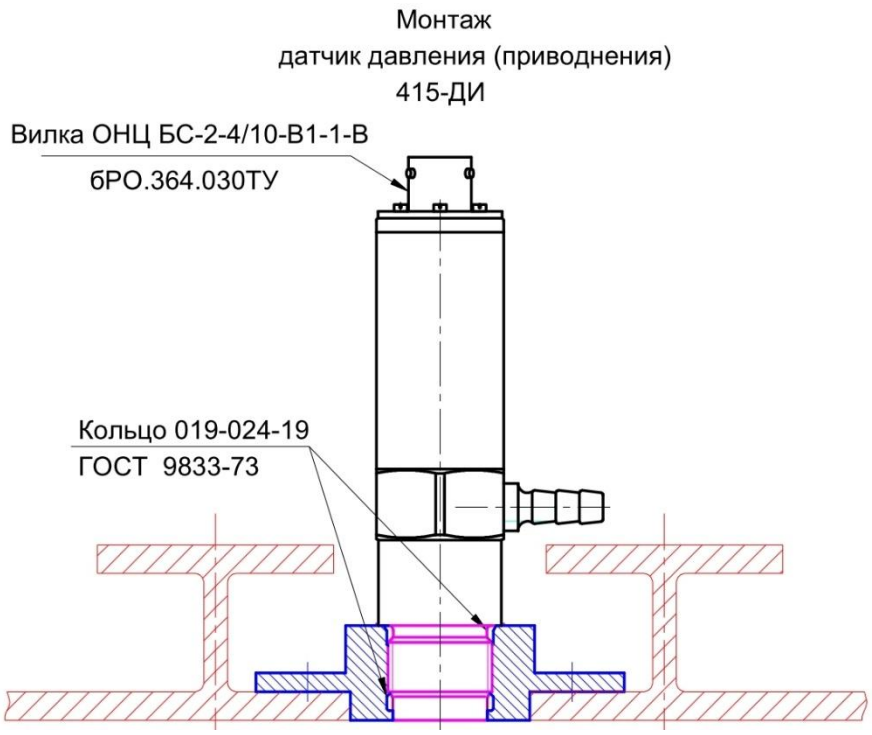
Рисунок 1 – внешний вид датчика давления

Датчик представляет собой датчик гидростатического давления, который измеряет глубину погружения днища самолета. В системе сигнализации, заказчик разместил два датчика на борту самолета: в носовой части и на редане.

Корпус датчика удлинен для удобства монтажа в посадочном месте самолета, шестигранная часть корпуса, под ключ, вынесена за пределы посадочного места. Штуцер датчика и разделительная мембрана чувствительного узла выполнены из стали 03Х16Н15М3, устойчивой к морской воде. Корпус выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для исключения питтинговой коррозии штуцер выполнен целноточеным, без сварных швов. Корпус имеет технологические сварные швы, выполненные дуговой сваркой в аргоновой среде. Электрический разъем датчика байонетного типа.

Для предотвращения обледенения, штуцер датчика имеет камеру 5,5см$^2$, отделенную от окружаюшей среды перфорированной мембраной. При заполнении камеры водой при давлении 100кПа, что соответствует клубине погружения 10м, и последующее её замораживание не приводит датчик выходу из строя.

Для монтажа датчика заподлицо с корпусом самолета было разработано посадочное место. На рисунке 2 показан монтаж датчика на корпусе самолета между продольными или поперечными элементами, такими как лонжероны и балки.




Рисунк 2 - Монтаж датчика

Монтаж датчика производится в ответную резьбовую часть посадочного места, которое изготовлено их стали 20Х13. Уплотнение датчика – двойное, кольцевое. Дополнительно корпус датчика имеет шпильку для заземления, которую можно использовать для стопорения датчика от самовыкручивания.

Внутри корпуса самолета давление воздуха окружающее датчик отличается от забортного, поэтому в верхней части корпуса датчика расположен штуцер для компенсации давления. В корпусе датчика от этого штуцера идет воздухопроводный канал к чувствительному узлу для изоляции электронного блока от внешних воздействий.

В датчике реализована защита от гидроударов, которые возникают при касании корпуса самолета водной поверхности. Чувствительный узел датчика выдерживает перегрузку статическим давлением до 1МПа, что соответствует перепаду давления 100м.в.ст., а также чувствительный узел защищает пустотелая камера в нижней части штуцера.

Монтаж датчик производится в согласованное посадочное место. На этапе согласования был разработан контруктив корпуса датчика, который позволяет монтировать датчик между элементами корпуса самолета, такими как лонжероны и балки без применения специального инструмента.

Для выполнения требования электромагнитной совместимости датчика в части восприимчивости к воздействию ЭМП, в том числе и от бортовой аппаратуры самолета, был разработан электронный узел, имеющий следующие особенности:

- внутреннее питание электронного узла производится через стабилизатор с фильтрацией возможных помех по цепям питания бортовой сети самолета;
- между внутренней шиной питания датчика и корпусом поставлены фильтрующие элементы для нивелирования возможных статических и иных наводок;
- сигнальные цепи датчика имеют гальваническую развязку от цепей питания;

Для удовлетворения ряда требований живучести и стойкости к внешним воздействиям, таким как вибрация, шоковые перепады температур, удары, соляной туман, высокая влажность, в датчике применены специальные конструктивные приемы. Чувствительный узел датчика отделен от рабочей среды разделительной мембраной из нержавеющей стали с заполнением кремнеорганической жидкостью. Электронный блок упакован в защитный полимерный чулок. Внутренняя полость датчика заполнена кремнеорганическим компаундом.

Таким образом, в результате ОКР был разработан датчик избыточного давления для комплекса автоматической сигнализации приводнения самолета со следующими характеристиками:

| | |
|---|---|
| Диапазон измерения давления, кПа | 0-16 |
| Погрешность измерения, %, не более | 10 |
| Перегрузка от гидравлических ударов, МПа, не менее | 1,0 |
| Время установления выходного сигнала, сек, не более | 0,1 |
| Выходной сигнал – однонаправленный, цифровой по интерфейсу RS485 с гальванической развязкой, период передачи данных 10мсек., длина посылки 16бит. | |
| Скорость передачи данных, кбод | 19,2 |
| Питание датчика от бортовой сети электроснабжения постоянного тока, В | 18-32 |

На рисунках 3 и 4, представленных ниже, показаны выходные сигналы датчиков при посадке и взлете самолета на водную поверхность соответственно. Желтым цветом прорисован сигнал датчика установленного на редане, фиолетовым на носу самолета. На

представленных рисунках хорошо видны участки тренда выходных сигналов в момент касания самолетом водной поверхности, нахождение самолета на водной поверхности и его отрыва от нее при взлете. Отдельные всплески выходного сигнала показывают удары отдельных волн о корпус.

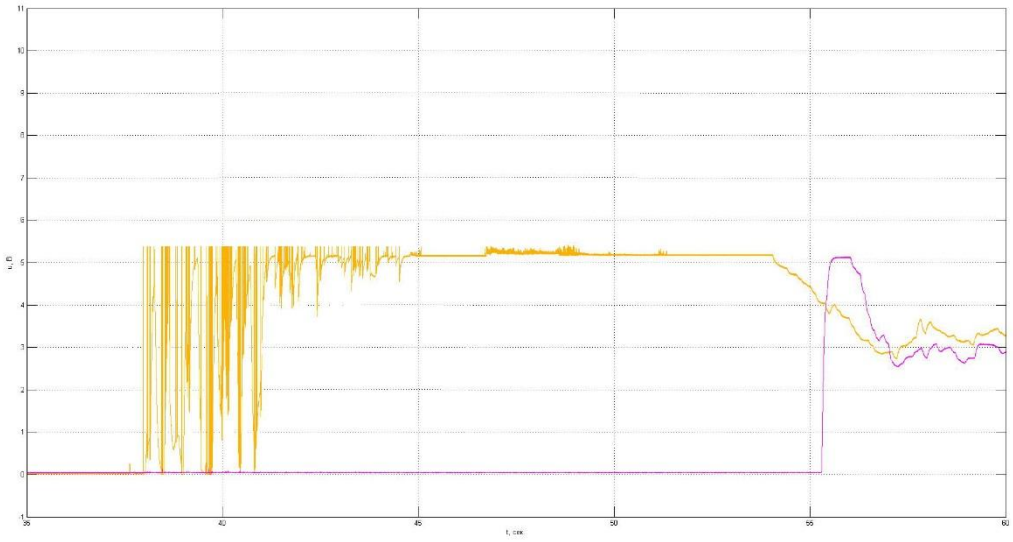


Рисунок 3 – выходные сигналы датчиков при посадке самолета

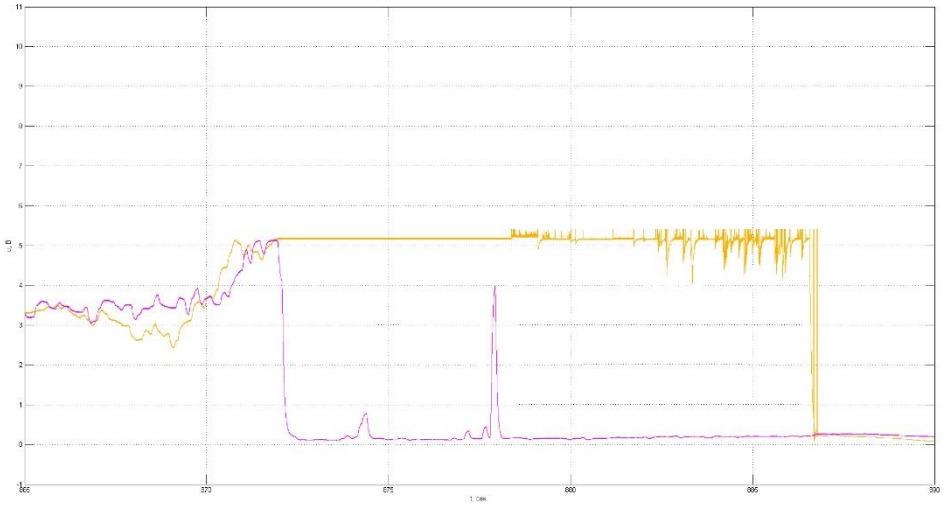


Рисунок 4 – выходные сигналы при взлете самолета

На момент написания статьи, НКБ ЦОС ЮФУ переданы на испытания 4 датчика. Два датчика прошли летные испытания, на рисунках 3 и 4 показаны их выходные сигналы. По результатам испытаний, были внесены коррективы в техническое задание и изготовлены датчики, которые готовятся к испытаниям.

**Применение метода Берга в обработки данных гидроакустической антенной решетки для увеличение разрешения сканирования по углу**

***К.В. Вдовюк, В.К. Доля, А.В. Коротоякский***

*НКТБ «Пьезоприбор» Южный федеральный университет,*

*г. Ростов-на-Дону, Россия*

При проектировании современных локационных систем большое внимание уделяется вопросам повышения их разрешающей способности по углу. Из-за ограниченных размеров антенн не во всех случаях удается достигнуть требуемых показателей разрешающей способности по угловым координатам. Дополнительное увеличение размеров апертуры связано с техническими трудностями.

Одним из известных путей увеличения разрешения при фиксированной апертуре является применение параметрических методов цифрового спектрального анализа [1].

Обработка пространственных сигналов, получаемых с помощью решетки равномерно разнесенных в пространстве датчиков при действии на них плоской волной с частотой *f*, падающей на эту решетку под углом $\theta$, после равномерной дискретизации с интервалом *D*на пространственной апертуре решетки длиной *ND*, будет иметь форму экспоненциальной функции вида $exp(j2\pi KnD)$ [2] рис.1.

Пространственный спектральный анализ используется для определения волнового числа *K* по отсчетам сигналов *N*датчиков. Волновое число *K* и угол падения плоской волны $\theta$ связаны следующим соотношением:

$$K = \frac{1}{\lambda} sin(\theta) \qquad (1)$$

Таким образом спектральный анализ можно использовать для непосредственного нахождения соотношения, связывающего угол падения плоской волны $\theta$, со значением волнового числа принятой плоской волны[2].

В настоящей работе для получения высокого спектрального разрешения применена авторегрессионная параметрическая модель

случайных процессов. При этом оценка авторегрессионных параметров осуществлялась методом Берга.

Для реализации описанного подхода использовался программно-аппаратный гидроакустический комплекс с характеристиками: рабочая частота -388 КГц; полоса приема - 125 КГц; антенная решетка - 15 элементов; максимальный уровень излучаемого сигнала - 400 Па.м.

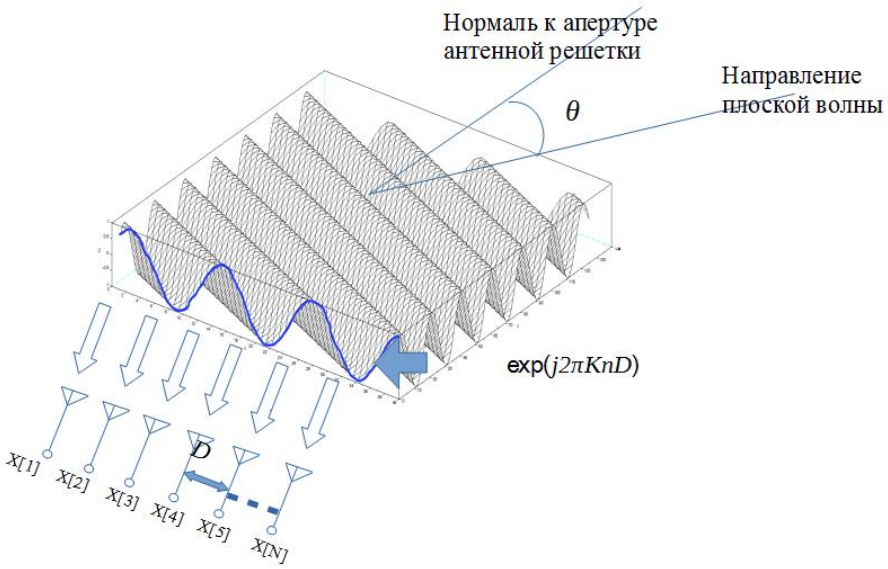



Рис.1 - Линейная решетка из *N*приемных элементов, расположенных в пространстве с интервалом *D*

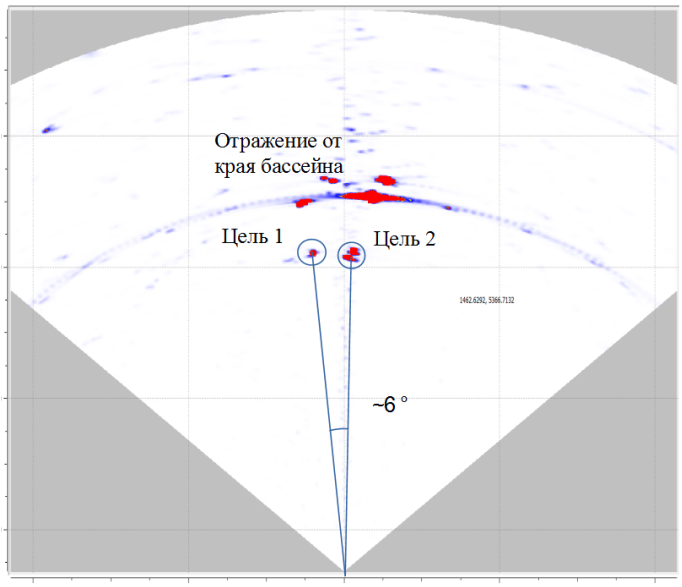



Рис.2- Визуализация сканируемого пространства

Гидроакустический комплекс позволяет обрабатывать и визуализировать данные, поступающие с гидроакустической антенной решетки, и визуализировать сканируемое пространство.

Используя метод изменения направления оси диаграммы направленности, путем введения временных задержек в каналы антенной решетки, не удалось различить цели с угловым расстоянием ~6 °. При применении оценки параметров авторегрессионной модели методом Берга, увеличив длину выборки с 15 до 225, удалось разделить цели рис.2.

**Список литературы**

1. Григорян Д. С. КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ– "Журнал радиоэлектроники": электронный журнал. - 2012. - №3.

2. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.

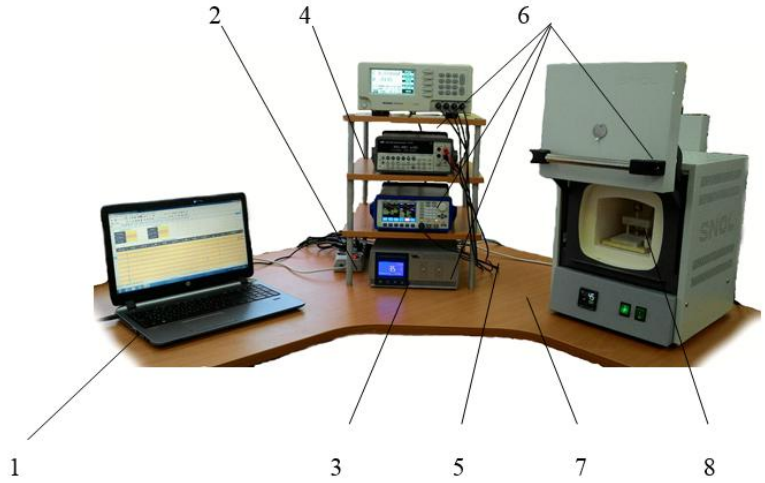
## Установка для исследования температурных параметров пьезоматериалов.

***Д.А. Матешов, К.В. Коренева***

*НКТБ «Пьзоприбор» Южного федерального университета,*

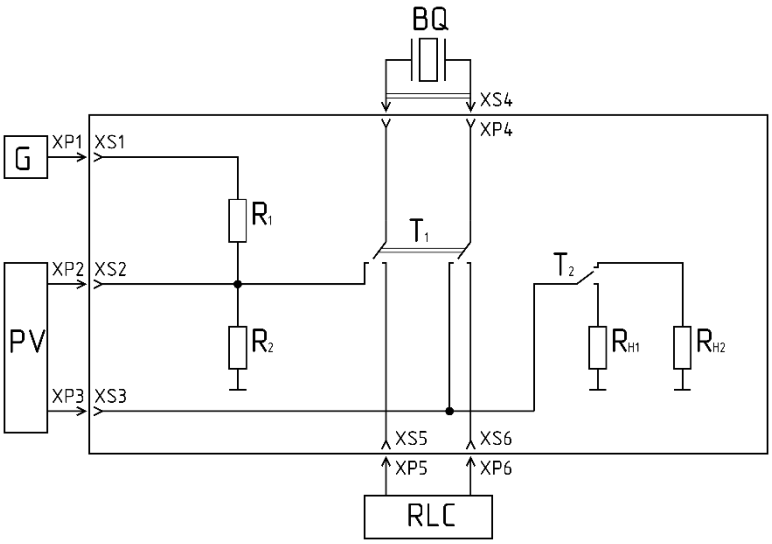
*г. Ростов-на-Дону, Россия*

В настоящее время в связи с разработкой новых пьезоматериалов встал вопрос о удобстве определения их параметров, особенно в широком температурном диапазоне. В НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ была разработана такая установка. Установка предназначена для исследования температурных характеристик пьезоматериалов путем контроля характеристик образцов соответствующих требованиям ОСТ 11.0444. в диапазоне температур от плюс 25 °С до плюс 500 °С.На рисунке 1 представлен общий вид установки, а на рисунке 2 структурная электрическая.




1 – ПК; 2 – сетевой фильтр; 3 - блок температурный;4 – стеллаж; 5 - кабели соединительные; 6 – блок управления, сопряжения и обработки информации; 7 – стол; 8 – электропечь с державкой и образцом

Рис. 1




G- генератор АКИП-3407;PV- вольтметр В7-78/1;RLC- измеритель иммитанса LCR-7816 (далее измеритель RLC);BQ - пьезоэлемент исследуемый;$T_1$ и $T_2$ - тумблеры режимов работ;$R_1$ – резистор типа «С2-33-2,0» номинал 50 Ом;$R_2$ – резистор типа «С2-33-2,0» номинал 1 Ом;$Rн_1$ - резистор типа «С2-33-2,0» номинал 2 Ом;$Rн_2$ – резистор типа «С2-33-2,0» номинал 200 Ом;XP1-XP6, XS1-XS6 – разъемы

Рис. 2

Установка состоит из стандартных приборов включенных в Госреестр СИ, благодаря этому не требуется сертификации самой установки.

Установка имеет два режима работы, ручной и автоматический.

В ручном режиме все измерения проводятся оператором и заносятся в персональный компьютер (ПК) где происходит только расчет по формулам из ОСТ 11.0444. Этот режим работы полностью соответствует ОСТ 11.0444., что позволяет легко согласовать методики контроля качества пьезоматериала у производителя и заказчика.

В автоматическом режиме установкой управляет ПК. Оператор только подготавливает установку к работе и задает температурные точки, и количество циклов нагрева, далее установка работает автоматически. Этот режим наиболее удобен в процессе разработки пьезоматериала.

Параметры получаемые на установке:

-относительная диэлектрическая проницаемость ..... e;

- эффективный коэффициент электромеханической связи ..... $k_e$;

- относительный резонансный промежуток..... $\Delta f$;

- динамическое сопротивление ..... $R_r$.

- пьезоэлектрические модули ..... $d_{33}$, $d_{31}$;

- механическая добротность ..... $Q_m$;

Результаты измерений представляются в виде таблицы в программе OpenOfficeCalc. Это позволяет легко экспортировать полученные данные в другие программы для последующей обработки.

Выводы.

В результате работы получена установка, в которой удалось совместить старые проверенные методики измерений и современный подход в их автоматизации.

**Список литературы**

1. Материалы пьезокерамические. ОСТ 11.0444.

# Проблемы проектирования для измерения и контроля физических параметров для ракетно-космической техники

*А.В. Гориш, Д.В. Панов, И.С. Рубцов*

Аннотация

В статье изложены основные проблемы при проектировании датчиков для измерения, контроля и диагностики физических процессов при создании и эксплуатации изделий ракетно-космической техники.

Ключевые слова: датчик, измерения, погрешность, дестабилизирующие факторы, давление, ускорение, физический параметр.

С развитием РКТ увеличивается количество контролируемых и измеряемых параметров, улучшаются точностные, эксплуатационные и надежностные характеристики, что стимулирует интенсивное развитие датчиковой аппаратуры. Совершенствование датчиковой аппаратуры, расширение ее номенклатуры и возможностей, в свою очередь, позволяет получать более полную и высококачественную информацию и обеспечивает экспериментальную отработку ракет меньшим числом образцов, с лучшим качеством и в более сжатые сроки.

Специфика датчиков для РКТ заключается в одновременном воздействии на датчики большого количества дестабилизирующих факторовУровни воздействия указанных дестабилизирующих факторов и их состав не имеют аналогов в других отраслях промышленности. В общем случае датчики для РКТ отличаются от общепромышленных наличием целого ряда особых повышенных требований по условиям эксплуатации, метрологическим характеристикам, надежности, конструктивному исполнению и др.

Сложность задач, решаемых проектировщиками для обеспечения работоспособности датчиков при совместном воздействии основных факторов, ярко характеризуют технические требования, заложенные при разработке РКТ:

- диапазон воздействия температуры от + 3000 С до минус 253 °С;
- термоудар до 5000 град/с;
- вибрация до 2500 g с частотой от 1 до 10000 Гц;

- ударные нагрузки до 1500 g длительностью (0,5…5) мс;

- акустический шум до 170 дБ;

- надежность от 0,99 до 0,999 при обеспечении механической надежности до 0,99999.

Кроме того, необходимо обязательно учитывать мероприятия по электропожаровзрывобезопасности (ЭПВБ) в среде «кислород-водород», помехоустойчивость и электромагнитную совместимость.

**Основные требования, предъявляемые к датчикам физических параметров для изделий РКТ.**

В эксплуатационных условиях применения, характеризующихся экстремальными уровнями внешних воздействий, погрешности измерений достигают 1…2,5 %, а динамические погрешности еще более, до 6…8 %. Внедрение современных конструкционных и функциональных материалов, перспективных технологий позволяет довести уровень погрешностей измерений до 0,1…0,5 %. Применение цифровой (микропроцессорной) обработки информации позволяет довести уровень погрешностей измерений до 0,01…0,1 %.

2. Ресурс работы и сохраняемость.

Датчики в большинстве случаев применения должны обеспечивать ресурс не менее 50-200 тыс. часов и допускать хранение сроком до 20 лет. Увеличение ресурса работы датчиков происходит за счет подбора особо стабильных и прочных материалов, особенно кристаллических (кремний, кварц, сапфир, керамика), обеспечения достаточного запаса по рабочим режимам. Применять нанотехнологии.

3. Долговременная стабильность метрологических характеристик.

Метрологические характеристики должны сохраняться в процессе хранения и эксплуатации с допустимым их отклонением не более 0,01 % в год.

4. Устойчивость к внешним влияющим факторам.

Датчики должны быть устойчивы к ионизирующим излучениям и механическим воздействиям (вибрации, удары, линейные ускорения), которые зависят от области применения.

Важным фактором является устойчивость к воздействию нестационарной температуры, например, при быстром изменении температуры от «минус» 196 до +150°С погрешность измерений не должна превышать 0,2 %.

5. Интеллектуализация.

Наряду со своей основной функцией преобразования интеллектуальные датчики должны также выполнять некоторые или все из следующих функций:

- восприятие измеряемого параметра, преобразование его в электрический сигнал;
- усиление аналогового сигнала, его фильтрация и цифровое преобразование;
- коррекция выходной характеристики (линеаризация и т.п.);
- компенсация влияния окружающей среды (температуры, давления, помех и т.п.) с целью коррекции выходного сигнала;
- одновременная работоспособность в различных диапазонах измеряемого давления;
- получение дополнительной информации (многофункциональность);
- подключение в систему контроля и управления;
- самодиагностика и автоматическая коррекция;
- выполнение логических управляющих операций и принятие решения о последовательности их выполнения;
- включение алгоритмов, проверяющих истинность выдаваемых результатов;
- наличие беспроводного съема информации с датчика.

6. Расширение диапазонов измерений в сторону малых и больших значений измеряемых величин за счет использования новых конструктивных схем, применения новых сплавов кремния, кварца, керамики.

7. Повышение термоустойчивости датчиков в расширенном диапазоне температур, в том числе при нестационарных воздействиях за счет термостойких материалов и электронных компонентов, специальных

принципов преобразования, а также виброустойчивости преимущественно за счет уменьшения габаритов и массы, применения компенсационных элементов, технологий микромеханики (микроминиатюризации).

8. Увеличение дистанционности измерений, повышение помехоустойчивости за счет использования корреляционного метода измерения, генераторных измерительных цепей, передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи, использования избыточных кодов, аналоговой и цифровой фильтрации.

9. Повышение надежности за счет резервирования и применения элементов с пониженной и равной интенсивностью отказов.

10. Повышение пожаровзрывобезопасности за счет применения волоконно-оптических чувствительных элементов, конструктивной и схемотехнической защиты, снижения энергопотребления.

11. Снижение энергопотребления за счет применения генераторных ЧЭ и специальных измерительных цепей, микромощной измерительной базы, микрорезонаторных чувствительных элементов.

12. Обеспечение сопряжения систем измерения с цифровыми вычислительными машинами.

13. Снижение массы и габаритов датчиков за счет внедрения микромеханических ЧЭ с использованием технологий микроэлектроники.

14. Обеспечение широкой унификации и стандартизации датчиков по посадочным размерам, выходным сигналам, схемам внешних соединений, что позволит в последующем с малыми затратами перейти на новые датчики.

В качестве общих выводов можно отметить следующее.

По мере развития и совершенствования РКТ развивались и датчики, которые использовались как на самих изделиях (системы телеметрии, управления, контроля и регулирования), так и в наземной инфраструктуре (испытательная база, полигоны и проч.). При этом для датчиков приоритетными направлениями развития были расширение номенклатуры измеряемых параметров, расширение диапазонов измерения, увеличение

точности, повышение надежности и временной стабильности, снижение массогабаритных показателей, увеличение ресурса и проч.

Такие направления диктуются тем, что увеличивается тяга двигателей, появляются высокоресурсные орбитальные аппараты, уменьшаются габариты и вес космических аппаратов (КА), увеличивается количество КА, одновременно выводимых одним носителем. Кроме того, датчики, используемые в современной РКТ, постепенно «приобретают интеллект» в части самодиагностики, обработки, селекции и сжатия измерительной информации и т.д., что достигается за счет применения современной многофункциональной элементной базы и эффективных информационных технологий.

В то же время, в отличие от общепромышленных датчиков, датчики, предназначенные для РКТ, в процессе функционирования на изделиях и стендах подвергаются воздействию значительного числа дестабилизирующих факторов с высокими уровнями и динамикой. Причем это воздействие для РКТ носит комплексный характер, проявляющийся в одновременном воздействии на датчик нескольких дестабилизирующих факторов, например вибрации и температуры, температуры и агрессивной среды и проч.

При наблюдаемом процессе непрерывного усложнения создаваемых аппаратов и объектов для длительных орбитальных полетов, высокой насыщенности их системами диагностики, управления и контроля разработчикам измерительных систем и датчиков нельзя довольствоваться старым запасом знаний и технологий, а необходимо дальнейшее совершенствование и создание нового поколения датчиков на базе новых принципов преобразования, современной элементной базы и новейших материалов.

## Выводы

Таким образом, в изложенной трактовке датчик – это самостоятельное, конструктивно автономное средство измерений, размещаемое в месте отбора информации, состоящее из максимально необходимого числа звеньев преобразования измеряемой величины, обладающее однозначной

функцией преобразования и требуемыми для данных целей измерений взаимно согласованными (непротиворечивыми) метрологическими и надежностными характеристиками. Такой подход позволяет одновременно обеспечить высокую технологичность базовых конструктивов датчиков и строить на их основе унифицированные ряды датчиков, отвечающих интересам измерений всего многообразия объектов техники.

**Список литературы**

1. РМ 25984-90. Датчики микроэлектронные. Термины и определения. – М.: Изд. Стандартов, 1991.

2. Сретенский В.Н. Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. – М.: «радио и связь», - 143 с.

3. Алейников А.Ф. Многофункциональные датчики. – Новосибирск: ФТИ, 1991. – 35 с.

4. Витглеб Г. Датчики. – М.: МИР, 1989.- 191 с.

5. Осипович Л. Датчики физических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 203 с.

## Роль информационно-измерительной пьезоэлектрической техники для измерения, контроля и диагностики физических процессов и параметров при создании, отработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники

***А.В. Гориш***

Аннотация

В статье показана роль информационно-измерительной пьезоэлектрической техники для измерения, контроля и диагностики физических процессов и параметров при создании, отработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники. Освящены вопросы исторического развития процессов создания атомного оружия в США и СССР с учетом применения информационно-измерительных средств на этапах проведения исследований.

Подробно описаны исторические периоды установления пьезоэлектрического направления и роль его в создании изделий РКТ.

Ключевые слова: ракета, измерения, тяга ракетного двигателя, пьезоэлектрический датчик, атомное оружие, бомба, физик.

Современное мировое общество немыслимо без информационно-измерительной пьезоэлектрической техники (ИИПТ) для измерения, контроля и диагностики физических процессов и параметров при проектировании, отработке, создании, эксплуатации объектов ракетно-космической техники.

Это один и единственный способ познать многообразие процессов материального мира.

На эту роль измерений указали великие ученые всех стран и народов: Г.Галилей: «Измеряй все доступные измерению и делай доступным все недоступное ему», Т.Кельвин: «Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить». Русский ученый Б.С.Якоби писал: «Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему государству».

Современное общество немыслимо без измерений. Высокая точность управления полетами космических аппаратов достигнута благодаря современным средствам измерений, установленным как на космических аппаратах, так и на Земле. Здесь уместно привести любимую поговорку основоположника отечественной космонавтики С.П.Королева: «Семь раз отмерь, хорошенько проверь, один раз отрежь и снова проверь».

Информационно-измерительная техника (ИИТ) общего применения в мире нашла широкое применение в начале 20 века по исследованию проблем в области атома.

В начале 20 века области атомных исследований существовало три главных центра притяжения:

1. Кембридж - Э. Резерфорд.
2. Копенгаген – Нильс Бор.
3. Геттингенский триумвират - Макс Борн, Джемс Франк и Давид Бильберт.

Между этими центрами происходил научный обмен достигнутыми исследованиями в областисозданной новой ИИТ, с помощью которой достигали успехов в исследованиях в атомной физике, так и в области применения результатов исследований для создания атомного оружия.

В это время молодые талантливые физики, такие как Лео Сциллард, Р. Опенгеймер, Эдвар Теллер, Джон фон Нейман, Альберт Эйнштейн, Макс Борн, Нильс Бор и др. успешно трудились над решением проблем атомной физики, но боялись, что Гитлер первым овладеет столь ужасным оружием. Когда он пришел к власти, в течение 1933 – 1934 г.г. ученые покинули Германию и разъехались в разные страны.

Осенью1933 г.Альберт Эйнштейн переехал в США в г. Тринстан и пе-

ренес свою резиденцию из Германии.

Практически все известные физики оказались в США. Достигнутые исследования показали, что можно создать атомное оружие.

Создалась группа наиболее талантливых физиков-теоретиков, математиков, экспериментаторов, которые испытывали особый интерес к информационно-измерительному приборостроению.

С конца апреля по конец июля 1939 г. физики были озабочены тем, как довести до американского правительства значение атомного оружия. Первая попытка 17 марта 1939 г. потерпела фиаско (техническое управление ВМС).

Физики продолжали поиски встреч с правительством США.

Сцилард составил письмо, согласовав его с Эйнштейном и обсуждал егос Александром Столпером - немецким экономистом. Столпер был знаком с Александром Саксом финансистом международного масштаба, пользовавшимся благосклонным вниманием президента Рузвельта и имеющим доступ в Белый дом. Начиная с 1039 г. Сакс стал неофициальным, но весьма влиятельным советником американского президента. Сакс сразу поддержал Сцилларда, он составил второй проект письма и считал направить прямо в Белый дом.

11 октября 1939 г. Сакс вручил письмо, составленное Сциллардом и подписанное Эйнштейном. Однако, Рузвельт попытался устраниться от этого дела. Однако, уже уходя, Сакс получил в качестве утешения от президента приглашение к завтраку на следующее утро.

Войдя к Рузвельту, Сакс увидел его сидящим за завтраком в коляске. Он спросил иронически: «Что за блестящая идея у вас появилась? Сколько времени вам надо, чтобы изложить ее?».

Сакс рассказал историю с Фултоном, когда он пришел к Наполеону и предложил паровой флот, с помощью которого его армия, несмотря на неустойчивую погоду, высадилась бы в Англии. Корабли без парусов? Это показалось Наполеону невероятным, и он прогнал Фултона. А ведь история Англии могла бы развиваться совершенно иначе. Выслушав Сакса президент написал на клочке бумаги что-то и передал его слуге, который вскоре вернулся с бутылкой французского коньяка Наполеоновских времен и предложил выпить. После этого Рузвельт вызвал своего атташе генерала Уотсона, по прозвищу «Па» и обратился к нему со словами, ставшими впоследствии широко известными:

«Па, это требует действий».

Ученые уделяли большое внимание на экспериментальное оборудование и на информационно-измерительную аппаратуру. У Резерфорда проходил стажировку П.Л. Капица, который был его любимцем. После переезда П. Л.Капицы в Ленинград, Резерфорд послал ему полный комплект экспериментальной и информационно-измерительной аппаратуры для проведения исследований, которую создавал у Резерфорда П.Л. Капица. Исследования в области атомных исследований с применением информационно-измерительной техники проводились в Париже, Кембридже, Риме, Цюрихе и Берлине. При проведении измерений ученые восторгались тому, что показывали их измерительные приборы. В области атомных исследований огромное значение имела информационно-измерительная аппаратура. Только с ее помощью невидимые глазом процессы физических исследований

становились понятными, ощутимыми и ясными. Создавались высокочувствительные информационно-измерительные приборы, стоимость которых была достаточно высокая. Для реализации задач по созданию новых информационно-измерительных приборов и экспериментального оборудования ученые-атомщики обращались за крупными субсидиями к государствам. Государство оказывалополную финансовую поддержку ученым.

К концу 1945 г. США уже взорвали три атомных бомбы:Аламогордо, Хиросима и Нагасаки.

**Работы по созданию атомной бомбы в СССР**

Аналогичныеработы проводились в СССР в Арзамасе – 16 следующими учеными атомщиками (Юлий Борисович Харитон, Абрам Федорович Иоффе, Лев Андреевич Арцемович, Игорь Васильевич Курчатов, Игорь Евгеньевич Тамм, Андрей Дмитриевич Сахаров, Яков Борисович Зельдович, Кирилл Иванович Щелкин).

Для реализации всего комплекса работ в Арзамасе – 16 широко проводились работы по созданию как новых информационно-измерительных средств специального применения, так и информационно-измерительных средств пьезокерамического направления. Эти средства существенно облегчали и обеспечивали выполнение работ по созданию атомной бомбы в СССР, среди них:

Кирилл Иванович Щелкин - один из главных идеологов участников и исполнителей «Атомного проекта СССР». Один из великих ученых и конструкторов нашей Родины.

Он бы атомщик, однако, и в историю отечественной космонавтики его вклад был настолько велик, что С.П.Королев сказал: «Без идей Щелкина мыне смогли бы опередить американцев».

В стране всего 12 человек знали обо всех аспектах создания ядерного оружия супербомба (26 тонн, длина 8 метров, диаметр 2 метра) РДС (Россия делает сама) «Изделие 202».

Для супербомбы К.И. Щелкин разработал специальную парашютную систему повышенной надежности, которую применил С.П. Королев для

своихкосмических аппаратов, возвращаемых с орбит пилотируемых кораблей. Между С.П.Королевым и К.И.Щелкиным были разногласия. Система управления (СУ) ракеты С.П.Королева была одноканальная, супербомба К.И Щелкина была двухканальная. К.И. Щелкин заряд на эту ракету не хотел ставить, пока не будет СУ двухканальная. С.П.Королев разбушевался - мол, не дело атомщиков учить ракетчиков, но в дальнейшей работе благодарил К.И. Щелкина за эти требования и СУ создал двухканальную.

Весной 1947 г. на Ю.Б.Харитона и К.И.Щелкина была возложена ответственность за создании атомной бомбы. Все остальные в КБ подчинялись им. Первый заместитель главного конструктора К.И.Щелкин был одновременно начальником научно-исследовательского сектора, в который входило 10 лабораторий, теоретический отдел (возглавляемый Я.Б.Зельдовичем) и все полигоны.

Лаврентий Берия знал о каждом шаге К.И.Щелкина. В Арзамасе-16 у него были осведомители, которые напрямую докладывали «шефу» обо всем. Причем выполняли это гораздо быстрее, чем службы самого КБ. Директор П.М.Зернов узнавал о каком-либо происшествии позже, чем шеф. Шеф «Атомного проекта относился к К.И.Щелкину с великим уважением, так как он в глаза шефу говорил, что думал и всегда защищал своих сотрудников. Во время испытания в августе 1949 г. Зернов, Щелкин, два фотографа и дозиметрист на легковой открытой машине поехали в эпицентр взрыва для подготовки подробного отчета.

Участники поездки знали обо всех опасностях. Но радиация все-таки настигала практически всех, кто слишком тесно был связан с ядерным оружием. И.В.Курчатов, Т.М.Зернов, К.И. Щелкин и многие другие ушли из жизни, хотя им не было и 60 лет. Казалось бы, все хорошо происходило в нашей стране, но, к сожалению, между руководством страны и некоторыми ядерщиками возник конфликт. К великому сожалению, о нем почти ничего неизвестно. И сегодня государственные архивы тщательно хранят его детали. Главные фигуры в этом противостоянии являлись - Игорь Васильевич Курчатов и Кирилл Иванович Щелкин с одной

стороны, а с другой - Никита Сергеевич Хрущев.

Масштабы ядерного безумия, захватывающего СССР и США, глубоко понял и оценил И.А.Курчатов. Он был потрясен последствиями взрыва водородной бомбы. Они, физики, выпустили на волю ядерного дьявола. Курчатов И.В. почувствовал и глубоко понял, насколько опасно это для мировой цивилизации и проживания людей на Земле. Он последовательно и настойчиво говорил о ядерном разоружении, выступал против новых испытаний, доказывал, что создавать супербомбы нет необходимости. Его активно по всем направлениям поддерживал К.И. Щелкин.

История развития нашей ИИТ и ИИПТ неразрывно связана с развитием и становлением ракетно - космической техники в СССР, которая начиналась с реактивного научно-исследовательского института (РНИИ).

21 сентября 1933 г. Михаил Тухачевский издал приказ Реввоенсовета СССР об организации Реактивного научно-исследовательского института. РНИИ был первой в мире государственной научно-исследовательской и опытно-конструкторской организацией, объединившей различные направления теоретической, технологической, информационно – измерительной, практической разработке различных направлений ракетной техники.

РНИИ был создан на базе двух организаций: Ленинградской Газодинамической лаборатории (ГДЛ) и Московской Группы изучения реактивного движения (ГИРД).

ГДЛ: В 1921 г. в Москве была создана лаборатория, которая была переведена в Ленинград и получила наименование Газодинамической, руководил Николай Тихомиров. Деятельность ГДЛ сосредоточилась на создании снарядов на бездымном порохе и технологии изготовления шашек для него. В 1930 г. после смерти Тихомирова руководителем ГДЛ был назначен военный инженер – артиллерист Борис Петропавловский (профессор Военно-технической академии). Он активно пропагандирован среди слушателей идеи ракетного оружия. В 1933 г.

Петропавловский умер и начальником был назначен Иван Клейменов, который до поступления на работу в ГДЛ учился на физико-математическом факультете Московского университет, оттуда был откомандирован в Военно-воздушную академию имени Жуковского.

Окончив академию, Клейменов получил назначение в ГДЛ, где обеспечивал эстафету разработок ракетных снарядов на бездымном порохе для самолетов и многоствольных минометов. Вместе с Клейменовым работал Георгий Лангемак. В 1929 г. по окончании ленинградского университета в ГДЛ поступил Валентин Глушко, который разработал уникальный электротермический ракетный двигатель, организовал подразделение в ГДЛ для разработки электроракетных и жидкостных ракетных двигателей и ракет на жидком топливе. С тех пор по праву В.П. Глушко считается основателем отечественной школы ЖРД.

К началу 1933 г. ГДЛ насчитывала около 200 человек и находилась в непосредственном подчинении Военно-исследовательского комитета при реввоенсовете СССР.

ГИРД: В 1933 г. при Осоавиахиме была создана Группа изучения реактивного движения. Первым руководителем был Фридрих Цандер – ученый, изобретатель и романтик межпланетных полетов. Он занимался разработкой теории и расчетами различных схем двигателей, не нуждающихся в атмосферном кислороде. Увлекался проблемами полета на другие планеты, вопросами движения космических аппаратов в гравитационном поле планет, определение траекторий и продолжительность полетов. В 1932 г. из-за болезни Цандера руководителем ГИРДа был назначен Сергей Королёв. В Московской ГИРД работали Юрий Победоносцев, Михаил Тихонравов, Владимир Ветчинкин, Евгений Щетинников и др. талантливые инженеры, работавшие с первыми советскими жидкостными ракетами.

В ГИРДе было около 60 сотрудников, работы финансировались президиумом Осоавахима и управлением военных изобретений РККА.

При создании РНИИ его начальником был назначен Иван Клейменов,

а заместителем Сергей Королёв. Однако расхождения технических интересов молодого Королёва и руководства РНИИ вскоре послужили причиной назначения на должность заместителя начальника института Георгия Лангемака.

Техническое руководство осуществлялось техническим советом, председателем был Г. Лангемак. В совет входили Глушко, Королёв, Победоносцев, Тихонравов, Дудаков.

В РНИИ занимались азотнокислотными ЖРД (В. Глушко), крылатыми ракетами типа воздушных торпед для пуска с самолета ТБ-3, проектированием и строительством ракетопланов (С. Королёв), созданием и производством реактивных снарядов для самолетов и др. целей (Клейменов, Лангемак и Артемьев), разработкой кислородно-спиртовых ЖРД (Тихонравов, Костиков).

В РНИИ работы выполнялись с широким размахом, начались совместные работы с авиацией и Главным артиллерийским управлением, создавались новые реактивные снаряды (РС-32, РС-132), военно-воздушные силы приняли эти снаряды на вооружение для самолетов. Проводились работы по широкому спектру ракетной тематики. В области реактивных снарядов СССР опережал все страны (Германия, Франция, США).

В трагические 1937-1938 годы РНИИ был обезглавлен. Клейменов, Лангемак в 1937 г. были арестованы и в январе 1938 г. расстреляны. В 1938 г. был арестован Глушко, а вслед за ним Королёв. Руководителем был назначен Костиков. Репрессии в отношении руководителей в институте создали тяжелую психологическую обстановку, подавляющую инициативу и смелый творческий поиск путей решения сложных задач.

И все же удивительно, сколь велик был интеллектуальный потенциал русского народа и коллектива РНИИ! Люди нашли в себе силы от униженного состояния, перестроить внутренне себя, сосредоточить силы от подавленного настроения, перейти снова к трудной, лихорадочно напряженной высокоинтеллектуальной и производственно-

технологической напряженной работе. А ведь, сколько подобных драм разрабатывалось в те годы.

РНИИ вошел в историю СССР ракетно-космической техники с легендарными «катюшами», боевыми пусковыми установками реактивной артиллерии, реактивными снарядами и др. реактивной техники, научно-техническими и технологическими достижениями в области ЖРД, управляемых жидкостных ракет.

Развитие ракетно-космической техники были обусловлены развитием и созданием нового отечественного приборостроения (радиотелеметрия, информационно-измерительная техника, пьезоэлектрическое приборостроение, датчиковое приборостроение, системы управления, гироскопия, метрологическое оборудование и много других приборных и лабораторных информационно-измерительных устройств).

Краткая история ознакомления специалистов и военных в Германии с работами в области ракетно-космической техники.

Осмотр Пенемюнде в 1945 году показал, что фактический размах работ по ракетной технике в Германии намного превосходил представления, которые были у военных и специалистов СССР.

Ни специалисты СССР, ни США, ни Англичане в 1945 году не могли создавать ЖРД тягой более 1,5 т. Да и те, что были созданы, в серию не пошли и никакого нового вида оружия с их применением так и не создано. В Германии ученые разработали и освоили ЖРД тягой до 27 т (в 18 раз больше) и в то же время производили эти двигатели.

В 1943 году численность основного персонала Пенемюнде составляла свыше 15000 человек. Новые информационно-измерительные стенды позволяли проводить огневые испытания ЖРД на тягу от 100 кг до 100 т. В составе Пенемюнде была создана самая крупная в Европе аэрокосмическая труба, оснащенная измерительной техникой, крупный завод для получения жидкого кислорода, просторными отлично оснащенными конструкторскими залами.

В период 1937 г. по 1940 г. в создание центра Пенемюнде было вложено свыше 500 миллионов марок.

С началом второй мировой войны фронт исследований и конструкторско-технологической деятельности в Пенемюнде быстро расширялся. По техническим заданиям Пенемюнде работами высшие школы Берлина, Дармштадта, Дрездена, Ганновера, Вены и Праги. Оснащение центра новейшей информационно-измерительной техникой, современным приборостроением, датчиковой аппаратурой пьезоэлектрического и традиционного исполнений, электроизмерительной и радиотехнической аппаратурой выполнялось фирмами «Сименс», «Телефункин», «Лоренц», «карл Цейс», «Гартман» и «Браун», «Антюнц», «РодеШварц», АЕГ. Это создало прочную информационно-измерительную и технологическую базу, которой в СССР в ракетно-космической отрасли в научных масштабах и в требуемых объемах к началу, а также и к концу войны были весьма в ограниченных количествах.

Все достижения в мире зависят от личностей. Так и создание Пенемюнде зависело от фон Брауна и Дорнбергера, которые имели хорошие связи в Управлении вооружений Германии. Они не преминули воспользоваться весьма благоприятной обстановкой реализации предложений по разработке новых военных изобретений. Они поняли, для работ широкого масштаба, который ими задуман, отсутствует экспериментальная база с оснащенной информационно-измерительной техникой и совмещенной с испытательным полигоном. Они добились начала проектирования исследовательского центра на выбранном ими острове Узедом на Балтийском побережье рядом с курортом Цинновиц у рыбачьей деревушки Пенемюнде.

Военное министерство согласилось щедро финансировать создание этого центра при условии, что будет разработана ракета дальнего действия, несущая большой заряд взрывчатки.

В 1940-1941 годы в военных программах создания новых видов вооружения приоритетной была программа А-4, которая была названа программой «возмездия» («Фергельтунг»), а ракета получила обозначение Фау-2 (V-2). Эта ракета предназначалась для нападения на

Англию. Это была вера в Фау-2, а отнюдь не уверенность. Эта вера не только ускорила поражение Гитлера, но в какой-то мере способствовала устранению страшной угрозы создания до конца войны учеными Германии атомной бомбы. Масштабность работ над программой А-4 и в особенности финансовых затрат и материальных ресурсов ею при массовом производстве косвенно помешали немцами создать атомную бомбу. Знаменитый немецкий физик Нобелевской премии Гейзенберг после войны вспоминал, что «в сентбре 1941 г. мы увидели открывшийся перед нами путь, он вел нас к атомной бомбе».

В июне 1940 г. позиция германии в ядерной проблеме была весьма внушительной и даже устрашающей: она захватила единственный в мире завод по производству тяжелой воды, она стала обладательницей тысяч тонн весьма чистых урановых соединений, установила контроль над почти построенным циклотроном, она располагала еще не обескровленными тотальной войной кадрами физиков, химиков, инженеров, а её химическая промышленность была самой мощной в мире.

Если бы Германия успела создать атомную бомбу раньше американцев и вооружать двумя-тремя бомбами ракеты А-4 из числа многих сотен, пущенных по Англии, мир сегодня мог выглядеть совсем по - другому.

Удивительно, что основными причинами медленного разворачивания работ в гитлеровской Германии по атомному проекту были вовсе не технические препятствия, а помехи, которые создавали ученым сами власти, их высокомерное отношение к науке. Немецкая экономика была всецело поставлена на удовлетворение нужд одного блицкрига за другим. Военные успехи немцев в Европе и вначале войны в СССР привели к выводам о полном превосходстве их военной техники. Следует также отметить на роковую ошибку о применении чистого графита на изготовление графитовых рулей на производство ракет Фау-1 и Фау-2, а не на решения задач атомного проекта. Эта ошибка пошла на пользу ракетчикам, ибо графита на оба направления в Германии явно не

было. Трудно представить, как обернулось бы дело, если бы ошибка была своевременно исправлена. Это ошибка, роковая для судеб немецкого атомного проекта, оказалась счастливой для всего человечества. Она стала главным препятствием и помешала немцам создавать критический реактор на графите и уране.

Реактор такого же типа (первый, в мире действующий, был создан в 1942 году в США) в рамках атомного проекта.

Четыре фактора, которые мешали созданию немецкой атомной бомбы.

Первый фактор – отсутствие необходимого оборудования и слабая оснащенность информационно-измерительного и специального приборного оборудования лабораторий, выполняющих сложные исследования.

Второй фактор – плохая организация нацистами исследовательских работ в интересах ведения войны и недостаточное понимание её значения правительством Германии.

Третий фактор – отсутствие достаточно квалифицированных физиков, изгнанных Гитлером.

Четвёртый фактор – это крайне плохое отношение занятых в атомных исследованиях германских специалистов, не стремящихся к успеху.

Краткая история развития информационно-измерительной пьезоэлектрической техники и информационно-измерительной техники специального применения для решения проблемных задач в ракетно-космической технике.

Приказом Министра вооружения Д.В. Устинова от 16 мая 1946 г. на базе артиллерийского завода № 88 создается Государственный союзный головной НИИ-88, как первая головная организация в СССР по созданию ракетного вооружения во исполнение исторического постановления Совета Министров от 13 мая 1946 г. №1017-419 сс. Эта организация, созданная в 1946 г. существует по сей день, но именуется по-новому Центральный научно-исследовательский институт

машиностроения (ЦНИИМаш).

Пьезоэлектрическое направление информационно-измерительной техники в ракетно-космической отрасли.

Работы этого направления в НИИ-88 начались с 1960 г. по договору с Государственным университетом г. Ростов-на-Дону.

Работы проводились в отделе №20, которым руководил И.И. Уткин, в отдел входили 12 лабораторий, руководителями являлись: Я.В. Малков, В.П. Захаров, А.Г. Михайлов, В.И. Дюков, О.Д. Комиссаров, А.В. Милицин, А.С. Солодухо, Н.Л. Колесников, Г.М. Азаров, М.И. Пирогов, А.И. Реттель, Э.А. Саркинсьянц, конструкторское бюро – А.И. Лапшина цех №112 – С.А. Порошин. Отдел насчитывал около 350 сотрудников. Дальнейшее развитие коллектива, связано с реорганизацией НИИ-88, который в 1960 г. был определен головным институтом в Миобщемаше по экспериментальной отработке изделий РКТ.

Отдел был преобразован в 1960 г. в комплекс №5 НИИ-88, которым продолжал руководить И.И. Уткин. Работы по пьезоэлектрическому направлению проводились в лаборатории Я.В. Малкова. Руководство выполнял О.Д. Комиссаров и Ю.В. Лукашин.

В работах по пьезоэлектрической датчиковой и преобразовательной аппаратуры со стороны НИИ-88 принимали участие Лукашин Ю.В., Михайлов А.Г., Суворов А.И., Смирнова Т.В., Смирнов С.Г., Мягкова К.Д., Белоусов Н.Т., Терещук К.М., Брускова М.П., Журавлев В.Г., Морозов Н.Е., Лашманова Л.Г. Мокрушина Л.С., Годнев А.Г. и др.

В 1966 г. в университете была создана ОНИЛ, которая на протяжении многих лет выполняла работы для задач Минобщемаша.

ОНИЛ руководил О.П. Крамаров. В работах принимали участие: Вусевкер Ю.А., Шевченко Л.А., Доля В.К., Земляков В.М., Милославский Ю.К., Богуш М.В., Янчич В.В., Мадорский В.В., Магер В.П., Чеботаренко О.Б. и др.

В ракетно-космической отрасли (РКО) ведущая роль в области проектирования, создания, испытаний и эксплуатации изделий РКТ

принадлежала радиотелеметрической информационно-измерительной техники (датчико-преобразовательная аппаратура, радиотелеметрические наземные и бортовые информационно-измерительные системы, средства сбора информации, ее обработка, средства представления информации специалистам, волоконно-оптические линии связи и программно-математические продукты с вычислительными комплексами и персональными компьютерами).

Для решения государственных задач по созданию ракетно-ядерного щита впервые были созданы:

1. В 1966 г. НИИ измерительной техники (НИИИТ) г.Королев Московской области. (вставить портрет Шишкина).

2. В 1978 г. НИИ физических измерений[2] (НИИ ФИ) г.Пенза (ранее это был филиал НИИ-88 с 1952 г.).

3. В 1975 г. НИИ радиотехнических измерений, г.Харьков (ранее это был филиал НИИ измерительной техники).

4. В 1976 г. ОКТБ «Пьезоприбор» в составе Государственного университета для задач оборонного комплекса, г. Ростов-на-Дону. Директором был назначен Крамаров Олег Павлович.

5. Государственный метрологический центр при НИИ измерительной техники (это было самостоятельное учреждение, всю информационно-измерительную технику аттестовывали для задач Минобщемаша).

6. В 1985 г. был построен лабораторно-производственный корпус для ОКТБ «Пьезоприбор» для задач Минобщемаша в г.Ростов-на-Дону.

С 1976 года началисьширокомасштабные работы в НКТБ «Пьезоприбор» по созданию пьезоэлектрических измерительных средств для предприятий Минобщемаша.

В создании ОКТБ принимали участие:

Бондаренко И.А. – первый секретарь обкома КПСС Ростовской обл.;

Карлов В.В. – зав. Оборонного отдела обкома КПСС Ростовской обл.;

Калинин Э.К. – зам. Министра высшего образования РСФСР - Генеральный директор ХНО Минвуза РСФСР;

Зинченко Ж.Ф. – заместитель Генерального директора ХНО по плану фундаментальных и поисковых работ в интересах обороны страны;

Семенов Ю.П. – Генеральный конструктор ЦКБМ;

Строганов Б.А. – заведующий оборонного отдела ЦК КПСС СССР;

Афанасьев С.А. – Министр общего машиностроения СССР;

Бальмонт Б.В. – Первый заместитель Министра общего машиностроения СССР;

Бакланов О.Д. – заместитель Министра общего машиностроения СССР;

Антуфьев О.Ф. – начальник 10 Главного управления Минобщемаша СССР;

Дунаев А.И. – начальник 8 Главного управления Минобщемаша СССР;

Шананин А.А. – зам. начальника отдела ВПК (Комиссия по военно-промышленным вопросам при Совете Министров СССР;

Жданов Ю.А. – ректор Ростовского государственного университета;

Комиссаров О.Д. – зам. директора по науке НПО ИТ;

Клочков Р.М. – Минвуз РСФСР;

Чернин Б.М. – зам начальника Главка Минобщемаша СССР;

Мозжорин Ю.А. – Генеральный директор ЦНИИМаш;

Макеев В.П. – Генеральный директор СКБ-385;

Назаров А.А. – помощник председателя СМ СССР;

Волков В.А. – Генеральный директор НИИФИ;

Сулимов О.А. – Генеральный директор НПО ИТ;

Гориш А.В. - зам. начальника Главка – начальник отдела, ученый секретарь секции приборостроения НТС Минобщемаша СССР. Выполнял координацию всех работ по подготовке писем, проектов распоряжения СМ СССР, согласование вопросов с руководством Минобщемаша Минвуза РСФСР, ВПК СМ СССР.

Для реализации вышеуказанных задач Гориш А.В. обеспечил впервые в СССР создание новой организации пьезоэлектрического приборостроения на базе ОНИЛ в рамках РГУ – ОКТБ «Пьезоприбор». В

дальнейшем он обеспечил выпуск постановления Правительства о строительстве лабораторно-производственного корпуса площадью 8 тыс. кв. м под ОКТБ «Пьезоприбор» в г. Ростов-на-Дону, который был построен в 1985 г. Финансирование всех строительно-монтажных работ, включая оснащение всем оборудованием, техникой, комплектующими изделиями и др., обеспечивал Гориш А.В. в рамках Минобщемаша СССР. Одновременно он обеспечивал на протяжении многих лет ежегодное выделение по 100 тыс. рублей ОКТБ для получения квартир сотрудникам. Неоднократно он обеспечивал выделение фонда зарплаты ОКТБ «Пьезоприбор» по 80 тыс. руб. из средств Минобщемаша.

Таким образом, фундаментальные и прикладные исследования обеспечили создание научно-технических, технологических основ конструирования металлопленочной, пьезоэлектрической, полупроводниковой и микроэлектронной информационно-измерительной датчиковой аппаратуры нового поколения для измерения более 30 физических параметров. Создано и серийно освоено 20 унифицированных рядов пьезокерамической аппаратуры, которая широко применяется в стране, обеспечивает отработку важнейших изделий ракетно-космической техники, авиационной, машиностроительной и задач социально-хозяйственного направления. Обеспечили создание принципиально новых направлений в области исследований и конструирования отечественной пьезокерамической аппаратуры на уровне мировых образцов. Создано шесть функциональных рядов высокоэффективных ПЧЭ нового поколения с высокими техническими характеристиками (ПЭСК, ПЭСД, ЧЭБ, ЧЭС, ПМ и др.), принципиально новых ПЧЭ (тонколенточных, объемочувствительных и биморфных). Серийное производство ведется в ОКТБ «Пьезоприбор» и на заводе «Аврора».

Созданы и серийно выпускаются 15 унифицированных рядов ПКД (АНС, АВС, ДПС, ДХС).

Созданы специальные установки для исследований, испытаний, входного контроля и метрологического обеспечения ПКД («Дон», «Дина», «Алмаз», «Гвоздика», «Рубин», «Ландыш» и др.).

Выполненный объем работ с учетом задач ракетно-космической техники решили целый ряд стратегических научно-исследовательских, технологических и практических задач:

1. Реализация комплексного системного подхода к организации и проведению конструкторских работ при создании нового поколения ПЧЭ, учитывающего конструкторско-технологические, метрологические и производственные показатели на интегральном цикле «Разработка ПЧЭ=конструирование ПКД=производство». Внедрение его в практику РКТ позволило существенно сократить сроки разработок ПКД, получить высокие технические экономические и эксплуатационные характеристики на уровне лучших образцов фирм США, Дании, Швейцарии и др. и обеспечить ускорение научно-технического прогресса в области РКТ.

2. Научно-методические и технологические основы создания и развития нового поколения ПЧЭ с широким спектром эксплуатационных характеристик, имеющих повышенную стабильность при одновременном воздействии температуры и давления, сформулированные в комплексно – целевой программе (КЦП) «Пьезо-РВО» и «Пьезо-РВО1».

3. Разработка научной концепции КЦП «Пьезо-РВО» и «Пьезо-РВО1» предусматривающая развитие нового поколения датчиков на основе ПЧЭ.

В результате реализации КЦП разработаны и внедрены в серийное производство 6 функциональных высокоэффективных ПЧЭ нового поколения с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками (ПЭСК, ПЭСД, ЧЭБ, ЧЭС, ПМ и др.), разработана и внедрена в серийное производство широкая номенклатура ПКД. Таким образом, в результате выполнения программы «Пьезо-РВО» и «Пьезо-РВО1» была решена важная задача одного из основных направлений повышения качества и эффективности отработки новых изделий РКТ – обеспечение ПКД предприятий оборонного направления и других машиностроительных отраслей народного хозяйства.

4. Разработку научно-технических и прикладных основ конструирования ПЧЭ и ПКД. При этом были выполнены следующие исследования:

- предложена общая постановка задачи для определения функции отклика и коэффициента преобразования многослойного ПЧЭ датчика типа «пьезокерамика-металл», находящегося под воздействием связанных полей напряжений и температур;

- для анизотропной термоэлектроупругой среды найдены полные наборы тензоров диэлектрических и термоупругих свойств многослойного ПЧЭ датчика, при этом учитывалось воздействие связанных полей напряжений и температур и одновременная неоднородность физических свойств ПЧЭ;

- с помощь пакета прикладных программ, разработанного для персонального компьютера типа IBMPCAT/XT, проведены расчеты и анализ электрофизических свойств ПЧЭ;

- разработан принципиально новый метод анализа механической надежности ПЧЭ датчиков в эксплуатационных условиях, основанный на пространственной модели напряжённого состояния, позволяющий повышать надежность ПКД на стадии его проектирования;

- разработаны конструктивные и технологические способы, позволяющие повышать надежность и информативность ПКД за счет рационального и целенаправленного выбора материалов СПЭ и температуры сборки ПЧЭ.

5. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния одно и двусторонних напряжений на ПЧЭ датчика, в результате которого показано, что при конструировании ПЧЭ необходимо использовать пьезопреобразователи, работающие на пьезомодуле $d_{33}$, поддающемуся стабилизации к продольному сжатию. Исследование влияния сдвиговых напряжений на параметры пьезокерамики, в результате которого показана возможность применения ПКД пьезопреобразователей, работающих на сдвиговом пьезомодуле.

6. Развитие основ построения ПЧЭ комбинированных датчиков, выполняющих одновременно измерения температур: теоретический анализ физической модели комбинированного датчика, выполняющего измерение температур с помощью термопарного ЧЭ; получение аналитических решений для различных законов изменения температуры исследуемой среды, использование которых при конструировании ЧЭ, позволяет обеспечить допустимую погрешность.

7. Исследование, обобщение и систематизацию современных методов повышения механической прочности пьезокерамических материалов, применяемых для изготовления ПЧЭ датчиков. Разработку новой, экспериментально подтвержденной методики испытания пьезокерамических кольцевых образцов на статическую прочность.

8. Исследование и систематизацию вопросов влияния сильного γ-излучения на стабильность свойств пьезокерамических материалов, применяемых в РКТ.

9. Исследование и систематизацию вопросов стабильности пьезоматериалов, применяемых для создания ПЧЭ, в условиях длительного хранения.

НКТБ «Пьезоприбор» внесло большой вклад в создание в нашей стране уникального приборостроения. Созданные образцы систем, приборов, датчиков информационно-измерительного пьезоэлектрического направления обеспечивали создание ракетно-космических аппаратов оборонного назначения. Созданные пьезоэлектрические элементы, модули и приборы способствовали совершенствованию ракетного оружия, что обеспечивало стратегический паритет между СССР и США и мирное развитие нашей страны на долгие годы. С участием пьезоэлектрического приборостроения была решена сложнейшая задача – создание ракетно-ядерного щита страны, установка на боедежурство более совершенных ракетных комплексов с новыми характеристиками по дальности действия, точности и времени подготовки запуска, не уступающие ракетам США.

Информационно-измерительная пьезоэлектрического направления аппаратура обеспечивала создание и отработку следующих образцов РКТ:

1. Межконтинентальная стратегическая ракета второго поколения Р-36 (8К67). Эта ракета явилась родоначальницей советских тяжелых межконтинентальных стратегических ракет-носителей сверхмощных боевых зарядов (тротиловый эквивалент от 18 до 25 Мт).

2. Межконтинентальная стратегическая ракета Р-36М (15А14) или РС – 20А. Р-36М, унаследовавшая все лучшее от Р-36, являлась для ОКБ «Южное» третьим поколением, она стала самой мощной в своем классе. Принципиально новой была возможность вооружения ракеты моноблочным боевым зарядом мощностью 24 Мт или восемью разводящимися головными частями мощностью по 0,9 Мт каждая. НАТО назвало эту ракету «Satan» - «Сатана».

3. Межконтинентальная стратегическая ракета РС-16А или МР-УР-100 (15А15). Эта ракета отличалась высокой степенью автоматизации управления всеми стартовыми системами и повышенной способностью преодоления противоракетной обороны (ПРО) противника.

4. Подвижные ракетные комплексы на базе шасси тяжелого танка и на железнодорожном ходу.

5. Носитель малых космических аппаратов серии «Космос». Модификации этого носителя «Космос-1», «Космос-2» и «Космос-3».

6. Носитель космических аппаратов массой до трех тонн «Циклон». Создан на базе ракеты Р-36.

7. Морской комплекс Д-4 с ракетой Р-21 .

8. Морской комплекс Д-5 с ракетой Р-27 и комплекс Д-5У с ракетой Р-27У, оснащенный моноблочной и тремя разделяющимися боеголовками.

9. Комплекс Д-19 с морской континентальной ракетой Р-29. Этим комплексом были оснащены 18 атомных подлодок типа «Мурена». На базе ракеты Р-29 были созданы три модификации с разделяющимися головными частями. Всем трем был присвоен индекс РСМ-50. Для управления ракетами комплекса Д-9 была разработана система астрокоррекции, существенно повышающая точность стрельбы.

10. Комплекс Д-19 с ракетами Р-39, получившими индекс РСМ-52. Боевая часть этой ракеты имела 10 боеголовок индивидуального наведения на цели. Комплекс Д-19 был принят на вооружение тяжелых подводных атомных крейсеров «Акула».

11. Спутники радиотехнической разведки обзорного и детального наблюдения «Целина».

12. Контрольно - юстировочные космические комплексы для отработки и испытаний противоракетной и противокосмической обороны (ПРО ПКО) типов «ДС» и «Тайфун».

13. Вспомогательный космический аппарат «Лира». Разработан в качестве мишени для испытаний истребителя спутников «ИС».

14. Блок «Е» - двигательная установка лунного посадочного корабля ЛК комплекса Л3. В соответствии с постановлением правительства по Н1-Л3 блок «Е» прошел летные испытания в составе макета ЛК при трех пусках с помощью ракеты-носителя 11А511 (ракеты-носитель на базе Р-7А).

15. Ракеты «Пионер». НАТО объявило эти ракеты «грозой Европы» и присвоило им индекс SS-20.

**Список литературы**

1. Гориш А.В., Дмитриенко А.Г., Макаров Ю.Н., Пономарев С.А., Перминов А.К., Пьявченко О.Н. «Научно-технические, технологические и практические основы конструирования датчиковой аппаратуры для измерений физических величин. Издательство МГУЛ, Мытищи-5, Моск. обл., 2011, том 1, стр.580.

2. Панов Д.В., Гориш А.В., Дунаевский В.П., Панич А.Е., Победоносцев В.А., Рубцов И.С. и др. Сборник трудов научно-технической конференции «Информационно-измерительная техника» Изд-во Российский университет дружбы народов. 2014 г. стр. 320.

3. Райкунов Г.Г. , Дворников В.С., Грибков Н.М., Дунаевский В.П., Михайлов А.М. и др. «По велению времени» Изд-во ФГУП «НПО ИТ», 2006, стр. 335.

4. Баженов А.А., Бульканов М.М., Гориш А.В. и др. «Современное состояние пьезоэлектрических датчиков» Научные труды «Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг». Изд-во МГУЛеса, 2001, стр. 118-129.

5. Серридж М., Лихт Т.Р. «Пьезоэлектрические акселерометры и предусилители» Справочник по теории и эксплуатации. Брюль и Кзер, 1987.

## Система интернет-тестирования для магистерской программы «Приборостроение»

***Ю.А. Ерусалимский***

*Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

В настоящее время широко распространено тестирования магистров ВУЗов по различным дисциплинам направлений подготовки, что является удобным и функциональным способом определить остаточные знания магистра.

Предлагаемая система интернет-тестирования разработана в Институте высоких технологий и пьезотехники ЮФУ для промежуточного контроля знаний магистров и проведения аттестационного тестирования по магистерской программе «Пьезоэлектрическое приборостроение».

В первоначальном варианте в систему включены тестовые задания по дисциплинам:

- пьезокерамическое материаловедение;
- пьезоэлектрические преобразователи;
- измерительные технологии в пьезоэлектрическом приборостроении.

Возможность проведения тестирования основывается на управлении базой данных, в которой хранится информация о различных предметах и список тестовых заданий по вариантам. Такая база может хранить в себе большой массив данных, включая и список всех тестируемых магистров, позволяя записывать в себя также информацию об успехах каждого магистра, перечень пройденных тестовых заданий, а также в перспективе давать возможность уполномоченному лицу получать доступ ко всей базе в целом для управления и её редактирования. Это позволит, например, преподавателям следить за успеваемостью магистров конкретно по их дисциплинам.

Ещё одной дополнительной функцией является возможность распечатать отчёт по результатам тестирования. Это позволит преподавателям иметь на руках некоторый документ, который будет информировать об уровне знаний в целом и может быть приложен к табелю успеваемости конкретной группы.

Для реализации тестирования применяется база данных MySQL в связке со скриптовым языком программирования PHP. Вся система при этом ставится на сервер Apache. Такой набор позволяет реализовать простое и эффективное выполнение операций внутри системы. Как таковая система не имеет сложных алгоритмов, глубокой структуры ветвления и параллельно выполняющихся процессов, поэтому был выбран Web-сервер XAMPP, который оптимально подходит для данной работы.

Система имеет GUI-интерфейс, представляющий собой Web-среду. Пользователь имеет возможность использовать интерфейс для работы с системой, в том числе и для реализации управления базой данных в случае наличия административных полномочий.

Благодаря использованию хорошо изученных, показавших свою эффективность компонентов, а также используя гибкость в настройке и широкую возможность выбора свойств, система является хорошей базой для реализации полноценной структуры. В неё могут входить как базовые возможности (проведение тестирования), так и создание новых модулей (обучение, справка, удалённый доступ, контакт магистров с преподавателями, рассылка новостей). В зависимости от требований структура может расширяться и модернизироваться по желанию.

**Список литературы**

1. Т. Конверс, Д. Парк, К. Морган. PHP 5 и MySQL. Библия пользователя. Диалектика. 2010

**Моделирование процессов обучения специалистов в сетевых средах**

***Е.А.Колпаков, В.Б.Рубанчик***

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

Рассматриваются элементы компьютерного моделирования сетевой инфраструктуры, являющейся базой для реализации разнообразных педагогических моделей онлайн-обучения.

1. Некоторые задачи моделирования процессов обучения в сетях.

Эффективность процесса обучения всегда на повестке дня, особенно в наше время, когда постоянное учение стало частью жизни людей. Задачи повышения квалификации и переподготовки не менее важны, чем традиционное профессиональное образование. Решить их в требуемом объеме можно только с помощью систем онлайнобучения. После распространения персональных компьютеров с доступом к сервисам Интернет (электронная почта, FTP, и особенно WWW) стало возможным распространение компьютерных обучающих систем. С точки зрения организации учебного процесса в таких системах за короткий промежуток времени были пройдены три этапа. Сначала во главу угла была поставлена идея индивидуализации обучения — каждый учащийся получает личного инструктора (реального и/или виртуального). Затем возникли технические возможности для коллективизации обучения — формирования виртуальных классов с активным взаимодействием учащихся. И, наконец, сформировались идеи сетевых сред, в которых учащийся освобождался от жестких рамок учебных курсов и "гнёта" систем управления обучением.

Обучение — тонкий когнитивный процесс, при исследовании которого всегда учитывались многие факторы (психологические, эмоциональные, физиологические и др.). В новых условиях важную роль стали играть технические аспекты — компьютеры, сети, электронные информационные ресурсы. Их вклад в процесс пока недостаточно изучен.

Имеется несколько сетевых теорий обучения[1] (коннективизм, хьютагогика, актор-сеть и др.), вкоторых развиваются базовые принципы обучения в распределенных сетевых системах. Но при создании сетевых сред возникает много вопросов. Когда обычная информационная сеть превращается в среду распространения знаний, т.е.

обучения? По каким причинам сетевая среда обучения может иметь низкую эффективность? Как минимизировать влияние сомнительных информационных источников при неконтролируемом процессе обучения, если известно, что избавиться от полученного ошибочного представления труднее, чем получить первичные знания? Как на процесс обучения влияет увеличение числа контактов учащегося с коллегами?

Понять причины и найти возможные пути решения этих и многих других проблем могут помочь компьютерные модели, имитирующие работу сетевых сред обучения.

2. Общая структура модели.

В сетевых средах обучения выделим два класса объектов — "учебные ресурсы" и "учащиеся". Каждый тип объектов обладает своими особенностями поведения. При этом существенно, что все объекты в значительной степени самостоятельны и самодостаточны. Например, учебные сайты обычно функционируют независимо от других, а учащийся сам может выбирать, что ему изучать и какими источниками знаний пользоваться.

При функционировании сети между объектами одного или разных классов динамически могут возникать отношения, смысл которых будет уточнен позже. Объекты обоих типов способны к самоорганизации. Например, периодически могут формироваться сообщества вокруг некоторых информационных источников, группы учащихся для выполнения проектов (коллаборация) или виртуальные объединения учебных сервисов из разных ресурсов.

Каждый объект имеет ограниченное представление о системе в целом, поэтому в не может быть объектом, управляющих системой обучения, т.е. система имеет высокую степень децентрализации.

Перечисленные ранее свойства элементов (автономность, ограниченность представления, децентрализация управления, способность к самоорганизации) являются характерными признаками мультиагентных систем. Поэтому достаточно простой верхний уровень декомпозиции, предложенный для модели, позволяет сделать принципиальный вывод: сетевая среда обучения может быть представлена как мультиагентная

система, т.е. система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами.

Мультиагентные системы достаточно хорошо изучены, а с практической точки это дает возможность использовать для моделирования и экспериментов готовые специализированные программные системы.

3. Уточнение общей модели.

Рассмотрим более детально типы объектов системы, их признаки, поведение, преследуемые ими цели и способы взаимодействия с другими объектами. В зависимости от используемой педагогической модели роли ихарактер взаимодействия элементов системы можетзначительно меняться.

Чтобы убедиться в принципиальной возможности построения действующей моделисетевой среды обучения, был разработан её упрощенный тестовый прототип. Основой для прототипной модели была выбрана структура открытых массовых онлайн-курсов[1], отвечающих многим требованиямзадач повышения квалификации.

Все ключевые объекты системы представлены в виде агентов — самодостаточных единиц, имеющих внутреннее состояние, осуществляющих свою деятельность согласно определенным правилам и способных вступать в различные взаимодействия с другими агентами.

В любой модели образовательного процесса нужно решить, как в ней будут представлены знания. Знания возникают в результате сложных обобщений и ассоциаций, и иногда формируются значительно позже получения поддерживающейих информации. На первом этапе проводимого исследования основной задачей было поставлено моделирование информационных потоков..

Поэтому в модели-прототипе был использован упрощенный подход — знания рассматриваются как совокупности отдельных дискретных элементов (фактов), способных механически объединяться в более сложные структуры (утверждения). Это представление применяется и для моделей объектов учебных ресурсов, и на модели учащихся.

Обучения рассматривается как информационное воздействие — взаимодействие двух и более субъектов, содержанием которого является изменение имеющейся информации хотя бы у одного из них. Так как в современных системах учащиеся могут принимать активное участие в

усовершенствовании учебных ресурсов, то в общем случае это воздействие двухстороннее.

Объекты типа “учебный ресурс” могут быть представлены относительно простыми рефлексными агентами, поведение которых описывается набором правил “воздействие =>реакция”. Это позволяет рассматривать в качестве учебных ресурсов широкий диапазон информационных объектов: книги, конспекты лекций, видеоуроки, записи в блогах, форумные сообщения и т.д.

Основным элементом внутреннего состояния учебного ресурса поддерживаемый им набор учебной информации (фактов и утверждений). Учащиеся, обращаясь к ресурсу, получают доступ к этой информации и могут строить собственные знания на ее основе. В дополнение к учебной информации, ресурс может содержать ссылки на другие ресурсы.

Агенты типа “учащийся” обладают целями, некоторой совокупностью знаний, и имеют свободу выбора действий. Внутреннее состояние агентов этого типа сложнее агентов ресурсов. Можно выделить несколько существенных аспекта.

– Наличие у агента цели (изучение определенной темы или дисциплины).

– Наличие у агента некоторого текущего набора знаний по теме (в простейшем случае — вектор из элементов знаний).

– Способность агента к приобретению знаний, формируемых из новых элементов учебной информации (*упорядоченное* дополнение вектора).

– Набор поведенческих шаблонов, управляющих различными видами деятельности агента: выбором ресурсов для изучения, склонностью к коллективной или индивидуальной работе и т.д.

– Обладание информацией о некоторой совокупности (списков) агентов-ресурсов и агентов-учащихся, с которыми можно вступать во взаимодействие.

В описываемой модельной системе агенты учащихся являются инициаторами всех взаимодействий. Агент (а в более общем случае, возможно, группа агентов-учащихся) обращается к ресурсу с целью

получения хранящейся на нём учебной информации. На основе этой информации каждый агент строит собственные знания. В случае коллективного изучения происходит обсуждение полученных знаний в группе с целью коррекции и уточнения.

Важная роль отводится взаимодействию агентов учащихся друг с другом, дающее возможность получения обратной связи о полноте, достоверности и актуальности знаний. Этот тип коллегиальной оценки (peergrading) рассматривается как мощный инструмент для повышения качества знаний, приобретаемых в сетевых системах обучения.

4. Инструменты для моделирования.

Рынок программных систем для компьютерного имитационного моделирования мультиагентных систем включает несколько популярных пакетов. Были проанализированы такие инструменты, как RepastSymphony, NetLogo, Cougaaru AnyLogic. Они предоставляют широкий спектр возможностей, но требуют существенных затрат времени на изучение специфических систем программирования. Поэтому для создания работающей прототипной модели был использован язык Pythonи библиотека симуляционного моделирования SymPy (распространяется на основе лицензии BSD) [2].

В настоящее время реализована первая действующая версия модели. С её помощью изучаются возможности усовершенствования механизма коммуникаций и обмена знаниями между различными агентами.

**Список литературы**

1. Networked learning. —URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Networked_learning (датаобращения 15.07.2015).

2. SymPy. — URL: http://www.sympy.org/en/index.html (датаобращения 15.07.2015).

## Перспективы технологий для создания интерактивных мультимедийных моделей наукоемких процессов и систем

***В.Н. Михайличенко, Ю.Р. Ким***

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

Обсуждаются проблемы создания интерактивных мультимедийных моделей, возникшие в связи со стандартизацией технологий и расширением спектра клиентских устройств.

Интерактивные мультимедийные модели имеют много областей применения, от когнитивной компьютерной графики, применяемой в системах управления для визуализации течения сложных процессов, до компьютерных систем обучения и игровых программ.

Как показывает опыт последних двух десятилетий, периоды эволюционного развития информационных технологий сокращаются, а парадигмы сменяются всё чаще. Это в полной мере относится к технологиям, используемым для создания интерактивных мультимедийных компьютерных моделей процессов и систем.

До середины 1990-х годов для этой цели использовались графические библиотеки, которые были дополнительными компонентами систем программирования универсальных языков программирования. Такая технология позволяла создавать сложные модели, но привязывала их к конкретной платформе. В связи с развитием мировой информационной паутины переносимость программ стала критическим требованием. Компромис предложил язык Java, с одной стороны сохранивший технику создания моделей, а с другой — обеспечивающий переносимость кода. Но широкому распространению этой технологии препятствовало требование профессиональных навыков программирования.

Проблему решила технология Flash, которая предлагала систему визуального программирования и набор готовых эффектов, использование которых не требовало программирования. Почти десять лет эта закрытая и защищенная патентами (проприетарная) технология не знала конкуренции. КомпанияMicrosoftдаже разработала свою сходную технологию Silverlight.

Но пять-семь лет назад сообщество разработчиков пришло к консенсусу по поводу развития совокупности технологийHTML5,

включавшей инструменты для анимации и интерактивности. В результате с 2010 году происходит постепенныйотход от поддержки Flash, начавшийся с известного демарша Apple [1].

Систорической точки зренияэтот процесс кажется логичным — очередная смена технологий. Были даже разработаны высокоуровневые инструменты, позволяющие конвертировать fla-файлы и swf-файлы в формат HTML5 (но неполностью). Проблема в том, что возможности HTML5 не обеспечивают равноценной замены Flash и найти четкую границу между областями их применения не так просто, а многочисленные публикации на эту тему, к сожалению, не позволяют составить полное представление.

В рамках обсуждаемой работы были поставлены следующие задачи. Первая — обобщить результаты сопоставления технологий и выработать рекомендации, когда по-прежнему необходимо использовать технологию Adobe Flash. Вторая задача — классифицировать и, по возможности, ранжировать технические аспекты применения HTML5, включая WebGL и библиотеки типа Three.js и D3.js.Третья задача — провести сравнение высокоуровневых инструментов для разработки мультимедиа типа Adobe Edge [2] с традиционными.

Кратко выводы по первой задачи состоят в следующем. К достоинствам Flash можно отнести высокую интерактивность и большую гибкость приложений, легкость интеграции компонентов, наличие простой высокоуровневой среды простой в использовании, набор надежных инструментов, использование векторной графики, большие возможности в работе со звуком.

Проблемными для Flash являются необходимость установки специального плагина, высокая, особенно для мобильных устройств, загрузка процесора, низкий уровень безопасности, неприспособленность к устройствам с сенсорным экраном, ну, и конечно, проприетарность. Проблемы с безопасностью поставили под сомнение даже использования Flash браузером Firefox.

К главным достоинствам HTML5,не требующего установки дополнительных программ, относят единый стандарт отображения контента, независящий от типа браузера, эффективное

использованиемощности компьютера за счет непосредственного использования графического процессора.

Чтобы полностью не потерять рынок, завоеванный с помощью Flash, компания Adobe разработала программу Edge Animate, позволяющую создать графику, анимации и интерактивный контента веб-сайтов на основе HTML, JavaScript и CSS. Этот сервис обеспечивает четкую функциональность и соответствие веб-стандартам.Пользователь может анимировать текст, картинки (включая формат SVG) и другие элементы, изменяя их визуальные свойства относительно шкалы времени.Edge Animate создает анимацию и импортирует графику, используя библиотеку анимации JavaScript, построенную на базе фреймворка jQuery. Графика и анимация в Edge Animate присоединяются к hrml-файлу во время выполнения исходного кода, что позволяет легко встраивать такие композиции в веб-страницы и сайты.

На сегодняшний день технология HTML5 по разным позициям все ещё продолжаетуступатьFlash при создании сложных мультимедийных приложений и анимаций. Например, ограничены набор типов анимаций и возможности программного управления их выполнением.

Чтобы продемонстрировать реальные возможности новой технологии, был разработан ряд специальных тестовых примеров, которые предлагаются для обзора.

**Списоклитературы**

1. Top 10 Reasons Why Steve Jobs and Apple Reject Adobe Flash. — URL: https://www.enterpriseirregulars.com/17744/top-10-reasons-why-steve-jobs-and-apple-reject-adobe-flash/ (датаобращения01.07.2015).

2. Adobe Edge Animate CC. — URL: http://html.adobe.com/edge/animate/showcase.html (датаобращения 26.07.2015).

**Анализ системы контроля качества процессов металлообработки**

***А.С. Козинова, Е.В. Корохова***

*Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Конкурентоспособность любой организации зависит, в первую очередь, от качества ее продукции и соизмеримости цены этой продукции с предлагаемым качеством. Поддержание высокого качества продукции связано с существенными затратами, которые традиционно делят на следующие группы: затраты на несоответствие, включающие затраты на внешний и внутренний брак, и затраты на соответствие, включающие затраты на контроль и на предупреждающие мероприятия. В зависимости от уровня развития системы менеджмента качества затраты на контроль могут достигать 40 % от общего объема затрат на производство. Поэтому актуальной является задача разработки эффективной системы контроля, обеспечивающей, с одной стороны, требуемый уровень отбраковки, а с другой стороны, требующей минимальных затрат на операции контроля, обработки данных и принятия решений. Целью данной работы является повышение эффективности системы контроля качества процессов металлообработки путем определения плана контроля.

Рассмотрим процесс изготовления полуосевого вала, который включает пять этапов (рис. 1): выполнение заготовок; токарная обработка; зуборезные работы; сверлильные работы; термическая обработка.

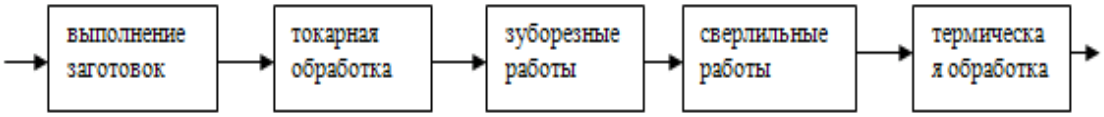



Рис. 1 - Процесс изготовления полуосевого вала

В структуре себестоимости данного вида продукции (рис. 2) наибольшая доля приходится на стоимость материалов (45 %), самыми «дорогими» операциями являются токарная обработка (27 %) и зуборезные работы (20%). Большая часть времени при производстве продукции уходит на токарную обработку (табл. 1).

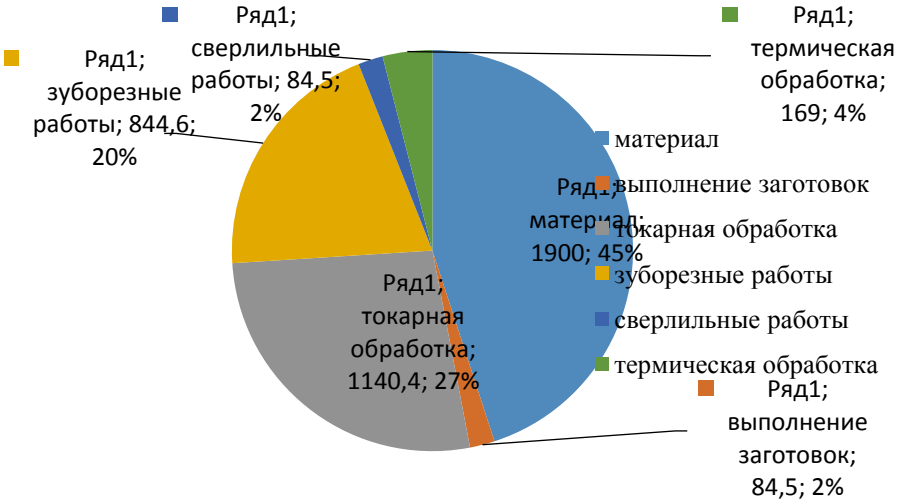



Рис. 2 - Структура себестоимости полуосевого вала

Таблица 1 – Время изготовления одной единицы продукции

| Вид работ | выполнение заготовок | токарная обработка | зуборезные работы | сверлильные работы | термическая обработка |
|---|---|---|---|---|---|
| Время (минуты) | 5 | 120 | 60 | 15 | 20 |

Предположим, что металлообрабатывающему предприятию необходимо изготовить партию полуосевого вала, состоящую из 150 деталей (количество деталей примем за единицу). Организация планирует установить контрольные точки для проверки продукции на этапах производства. После последнего этапа находится обязательная контрольная точка (сплошной контроль), поскольку доставка бракованной продукции потребителю недопустима.

Предположим, что в процессе производства после каждого этапа находится контрольная точка со сплошным контролем (рис. 3).

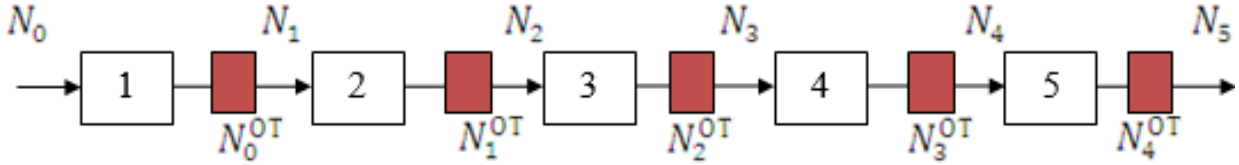



Рис. 3 - Расположение контрольных точек

Для того чтобы определиться, на каком этапе необходимо расположение контрольной точки, необходимо провести анализ статистических данных контроля качества продукции. В табл. 2

представлены стоимость и время, затрачиваемые на контроль одной единицы продукции на каждом этапе производства.

Таблица 2 – Стоимость и время контроля одной единицы продукции на этапах

| Характеристика | Этап | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | выполнение заготовок | токарная обработка | зуборезные работы | сверлильные работы | термическая обработка |
| Стоимость, руб. | 1,5 | 9 | 9 | 4,5 | 1,5 |
| Время, мин. | 0,1 | 1 | 1 | 0,3 | 0,1 |

Проведен анализ распределения контролируемого параметра «длина заготовки», полученного после токарной обработки (рис. 4). Номинальная длина заготовки составляет 700±3 мм. Рассчитаем индекс воспроизводимости проесса $C_p$. как отношение допуска к полю рассеивания

$$C_p = \frac{T}{6*\sigma}.$$

Количество бракованных деталей для этапа токарной обработки составляет в среднем около 2, а индекс воспроизводимости больше 3, что свидетельствует о высокой стабильности процесса..

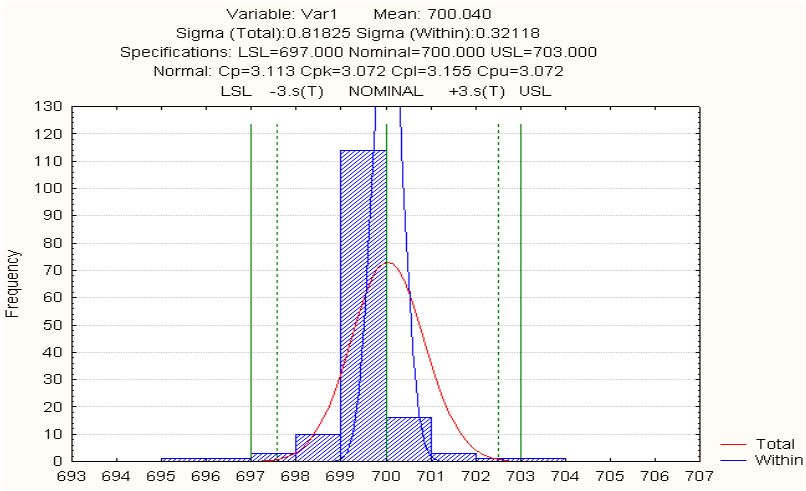



Рис. 4 - Гистограмма распределения длины заготовки на этапе токарной обработки

Анализ построенных контрольных карт (рис. 5) показал, что наличие дефектов на данном этапе производства незначительно (только две точки на X-карте вышли за контрольные границы, серии и тренд отсутствуют), однако, процесс подвержен влиянию случайных факторов, о чем свидетельствуют пять точек, лежащих выше контрольных границ на R-

карте. При увеличении объема партии индекс воспроизводимости может снизиться. Таким образом, для сокращения количества дефектов продукции необходимо дополнительное статистическое изучение процессов на партиях больших объемах. Процент брака для данного этапа производства составляет 1,3 %.

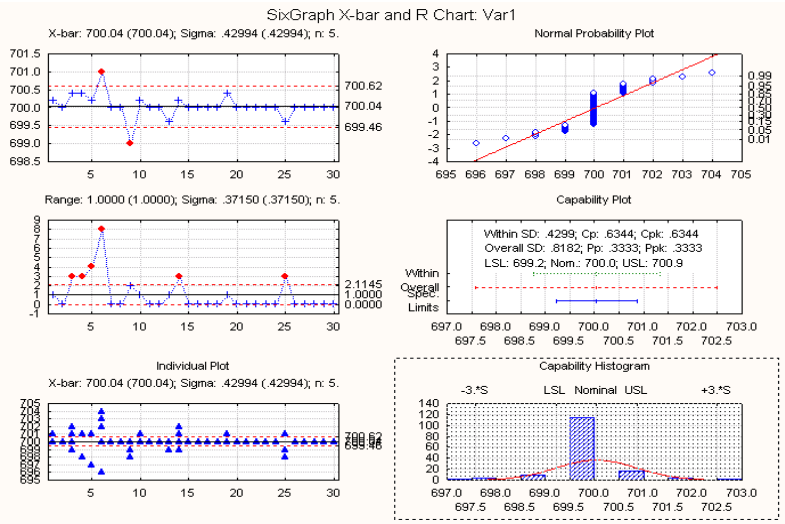



Рис. 5 - Контрольные карты длины заготовки на этапе токарной обработки

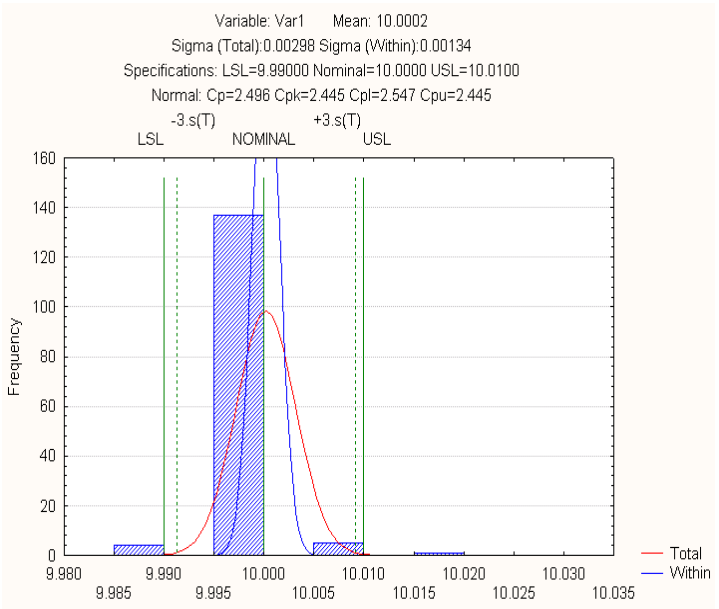



Рис. 6 - Распределение длины заготовки на этапе термической обработки

Анализ гистограммы распределения (рис. 6) и контрольных карт длины заготовки на этапе термической обработки (рис. 7) показал, что данный процесс более устойчив к внешним возмущениям, но, тем не менее количество бракованных деталей больше.

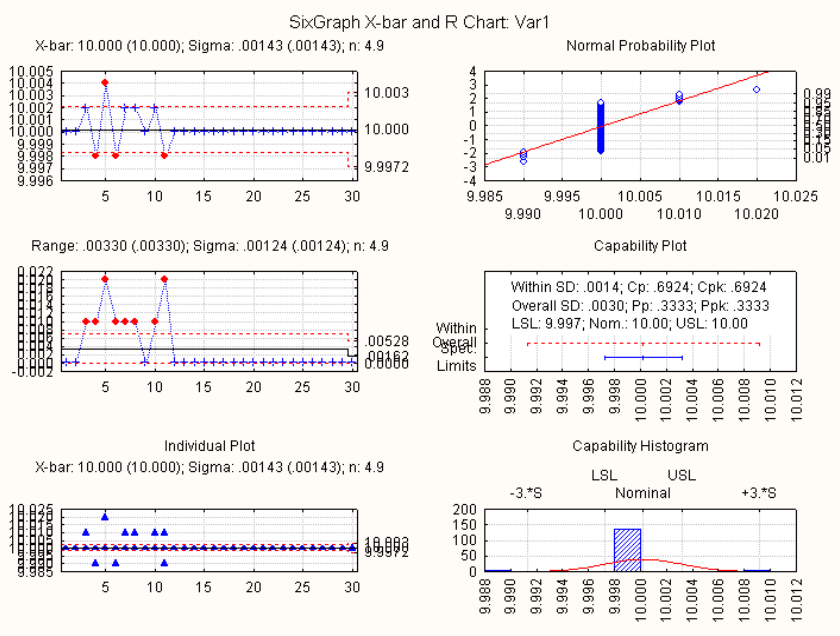



Рис. 7 - Контрольные карты этапа «Термическая обработка»

Таким образом, из полученных гистограмм видно, что процент бракованных деталей не критичен, но, тем не менее, имеется возможность сокращения брака на предприятии. Сплошной контроль в процессе производства деталей не требуется.

**Список литературы**

1. cyberleninka [Электронный ресурс] /Оценка качества в производственных системах различной структуры. Режим доступа: http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-v-proizvodstvennyh-sistemah-razlichnoy-struktury ,свободный. - Загл. с экрана. - Яз. рус. (17.05.2015)

2. Ефимов, В.В. Статистические методы в управлении качеством: Учебное пособие./ В.В. Ефимов−Ульяновск: УлГТУ, 2003. − 134 с. ISBN 5 – 89146 – 350 – 0.

3. Халафян, А.А. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете Statisitica / А.А. Халафян.М.: Книжный дом «Либроком», 2013 - 384 стр. ISBN 978-5-397-03576-7.

4. Казинцев, А.В. Шесть Сигм в России. Методика снижения потерь, дефектов, издержек / А.В. Казинцев - М.: Типография «Новости», 2009 . Ассоциация Шесть Сигм,-368с. ISBN 978-5-88149-334-9.

## Анализ и принятие решений при внедрении CALS

***А.А. Дьяченко, В.В. Корохов***

*Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Современные условия конкуренции требуют от предприятий не только высокого качества выпускаемой продукции, но и максимального сокращения сроков создания нового продукта и выпуска его на рынок. Поэтому для многих организаций, занимающихся выпуском наукоемкой продукции, актуальназадача внедрения информационных систем класса CALS(англ. Continuous Acquisition and Lifecycle Support — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий), способствующих поддержке всех процессов жизненного цикла изделий, начиная от выявления ожиданийпотребителей и заканчивая утилизацией. Процесс внедрения CALS предполагает использование методов системного анализа и принятия решений на всех этапах, при этом особое значение имеют этапы формулирования требований к системе, выбора компонентов, а также оценки рисков проекта. Целью работы является повышение эффективности внедрения CALS путем решения многокритериальной задачи выбора компонентов системы и оценки рисков на основе нечеткой модели.

Деятельности конструкторских отделов на многих российских предприятиях в настоящее время имеет следующие недостатки: весь жизненный цикл (ЖЦ) организационно-распорядительной документации проходит в бумажной форме, что приводит к потере документов, увеличению сроков рассмотрения заявок и выполнения распоряжений, затрудненности контроля статуса документов, отслеживания версий документов и др.;несмотря на то, что документация создается с использованием систем автоматизированного проектирования, управление ЖЦ изделия осуществляется в бумажном виде, что существенно увеличивает сроки проектирования, рассмотрения, согласования и утверждения документов, делает невозможным оперативный контроль статуса, отслеживание изменений (версий) и приводит к снижению

качества проектирования и, в конечном счете, увеличивает затраты на разработку и время вывода в производство новых изделий.Кроме того современные условия требуют от предприятий активного использования информационных технологий на всех этапах ЖЦ продукции. Низкий уровень информатизации процессов проектирования может стать причиной отказа доступа к тендерам на новые разработки.

Использование современных информационных технологий повышает общий уровень условий труда персонала и позволит привлечь молодых и перспективных специалистов на предприятие.Применение CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, существенно облегчается решение проблем ремонтопригодности, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, специализации проектных организаций и т. п.

Концепция CALS-технологий подразумевает сложную хорошо организованную программную среду. Выбор компонентов CALS – многокритериальная задача, при решении которой необходимо учитывать ряд факторов, включая: требуемые функции, которые могут существенно отличаться в различных организациях); особенности сложившихся исторически бизнес-процессов данной организации; используемое программное обеспечение (новые компоненты должны интегрироваться с существующими в единую среду, что существенно сокращает сроки внедрения и затраты на переход на новые технологии); квалификацию сотрудников, которые будут должны работать с системой; стоимость компонентов системы, их внедрения, обучения и сопровождения и др.

Для рассматриваемой организации функциональные требования к CALS формализованы в виде диаграммы, приведенной на рис. 1. Учитывая уже имеющийся в организации комплекс систем автоматизированного проектирования, дополнительным функциональным требованиям отвечают PLM/PDM-системы. Внедрение такой системы позволит создать единого информационное пространство для управления данными об изделии на всех этапах ЖЦ.

Для того чтобы выбрать оптимальную PLM-систему, необходимо сформулировать основные критерии выбора: интеграция с AutoCad 2013и КОМПАС 3D V13 (используются для проектирования) ($K_1$); интеграция со средствами MicrosoftOffice 2007 ($K_2$); цена внедрения, тыс.руб.($K_3$); наличие открытого кода ($K_4$); возможность распределения прав доступа ($K_5$); интуитивно-понятный интерфейс ($K_6$); визуализация документации ($K_7$).

На сегодняшний день на рынке PLM/PDM-систем представлены различные продукты, в работе рассмотрены следующие решения (альтернативы): Лоцман:PLM ($A_1$); T-FLEX PLM ($A_2$); Lotsia PDM PLUS ($A_3$); PDM STEP Suite ($A_4$). Программные пакеты зарубежных производителей не рассматривались в связи со сложившейся политико-экономической ситуацией в мире.Характеристики альтернатив приведены в табл. 1.

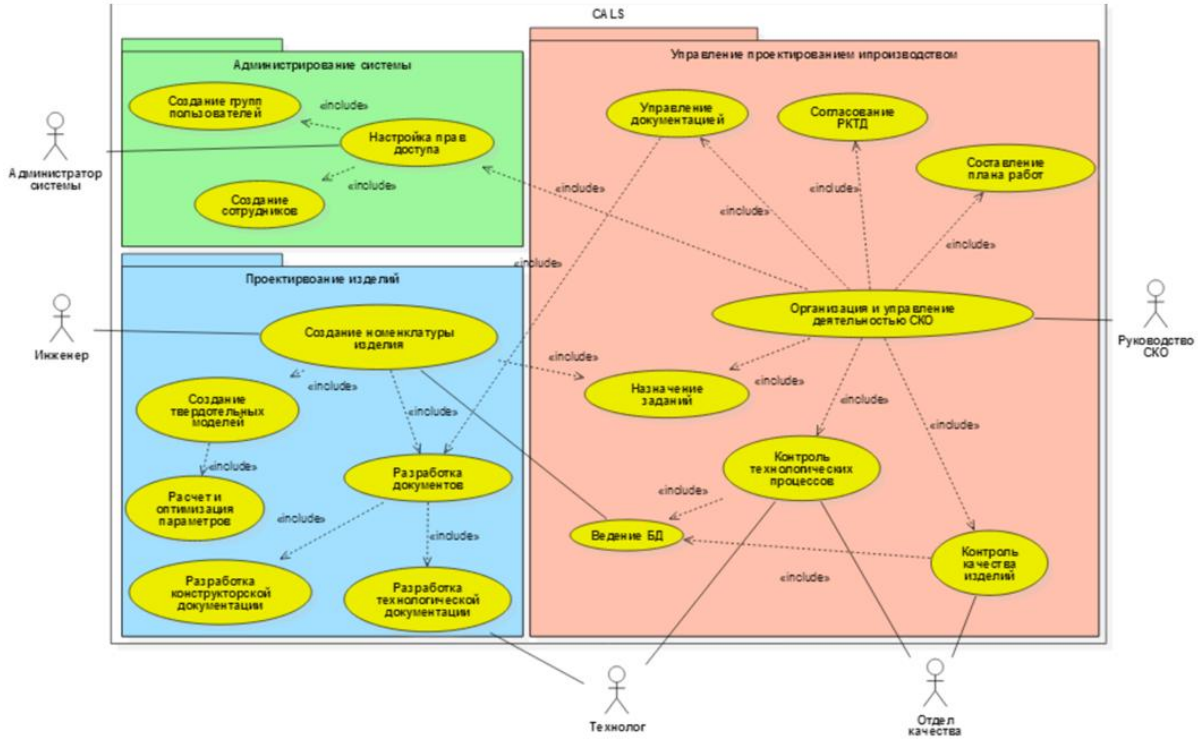



Рис. 1 - Функциональная структура CALS

Для выбора наилучшей PLM/PDM-системы использован метод анализа иерархий. Лучшей PLM/PDM-системой для внедрения, имеющей наибольший глобальный приоритет, является T-FLEXPLM

-полномасштабное решение в области управления ЖЦ изделий и организации деятельности предприятий.

Таблица 1 - Характеристики альтернатив

| Критерии | Альтернативы | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Лоцман:PLM | T-FLEX PLM | Lotsia PDM PLUS | PDM STEP Suite |
| $K_1$ - интеграция с AutoCad 2013 и КОМПАС 3D V13 | Есть | Есть | Только AutoCad 2013 | Нет |
| $K_2$ - интеграция с средствами Microsoft Office 2007 | Нет | Есть | Нет | Нет |
| $K_3$ - цена внедрения, тыс.руб. | 426 | 237 | 315 | 250 |
| $K_4$ - наличие открытого кода | Имеется | Имеется | Не имеется | Имеется |
| $K_5$ - возможность распределения прав доступа | Да | Да | Да | Да |
| $K_6$ - интуитивно-понятный интерфейс | Понятный | Интуитивно-понятный | Понятный | Менее понятный |
| $K_7$ - визуализация | Имеется | Имеется | Имеется | Имеется |

Для серийно-конструкторского отдела завода «Прибой» внедрение CALS-технологий вызвано необходимостью повышения эффективности работы путем создания единой производственной информационной среды, в которой будет храниться рабочая конструкторско-техническая документация, необходимая для проектирования, проведения испытаний, в рамках которой возможно внедрение основ параллельного проектирования, что, в свою очередь, сократит сроки НИОКР, стоимость работ и количество брака. Однако, внедрение CALS, как и любой другой сложной информационной системы, связано с серьезными рисками. Поэтому необходимосвоевременно выявлять, оцениватьриски и принимать решения для их снижения.

Процесс внедрения новой информационной системы можно отнести к высокорискованному проекту, для которого необходимо создать модель оценивания рисков. В работепостроена нечеткая модель.В рамках проекта внедрения CALS были выявлены следующие рискообразующие факторы (лингвистические переменные):не принятие CALS сотрудниками

СКО;увеличение стоимости программного пакета;проблемы при установке продукта;проблемы при интеграции существующей РКТД;отсутствие обучающих курсов по CALS для сотрудников СКО.Указанные факторы ведут к таким рискам как срыв сроков работы (в результате чего на завод накладываются штрафные санкции, оговоренные раннее в договорах) и увеличение бюджета проекта внедрения CALS.Далее определены зависимости рисков (последствий) от факторов и условий. Для данных лингвистических переменных определены соответствующие терм-множества. В среде пакета Matlab с помощью Fuzzy Logic Toolbox построена нечеткая модель.Для каждой лингвистической переменной указана функция принадлежности и диапазон. Для выходных значений также задаются функции принадлежности. Построенная модель позволяет рассчитать соответствующие риски и использовать эти результаты для разработки мероприятий по снижению критических рисков. Разработанный план снижения рисков включает: введение еженедельных отчетов о ходе работ; обеспечение доступа к прежнему программному обеспечению в период внедрения CALS; введение должности системного администратора. Таким образом, предложенная методика может быть использована для мониторинга, оценки и управления рисками инноваций.

**Список литературы**

1. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин [и др.]. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.

2. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. Н. Ковшов [и др.]. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с.

3. «Изучение пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB 7 и его применения для проектирования систем нечеткого (фаззи) регулирования» / Институт цветных металлов и материаловедения СФУ - Красноярск, 2009. - 27 с: 19 с.

# Управление стратегией развития компании на основе интегральных показателей деятельности

***А.С. Санина, Е.В. Корохова***

*Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Управление предприятием с помощью только финансовых показателей не дает достаточной информации для принятия правильных и своевременных управленческих решений. Для достижения лидирующей позиции на рынке и для повышения конкурентоспособности компании необходимо оперативное получение информации о процессах деятельности компании, чтобы принять правильные управленческие решения.

ОАО «МРСК Юга» является одной из крупнейших и динамично развивающихся энергокомпаний ЮФО.Для дальнейшегоуспешного существования в сфере электроэнергетики большое значение играет правильная и грамотная постановка целей, развитие, усовершенствование процессов, протекающих в компании и повышение доступности инфраструктуры электроэнергетики для потребителей. Поэтому для ОАО «МРСК Юга» задача разработки и эффективного управления стратегией развития является актуальной. При этом необходимо иметь систему показателей и критериев их оценки, позволяющую осуществлять эффективное управление компанией в стратегической и оперативной перспективе. Целью работы является повышение эффективности деятельности компании путем разработки системы ключевых показателей деятельности, позволяющей принимать решения по управлению на основе оценки частных и интегральных показателей достижимости стратегических целей.

Одним из популярных методов разработки и управления стратегией, поддерживаемых многочисленными программными системами, является подход, основанный на системе ключевых показателей эффективности (KPI) или системе сбалансированных показателей(ССП), широко используемых в практике управления западных компаний.

Разработка стратегии развития компании осуществлена по традиционному алгоритму [1]. На рис. 1 представлена стратегическая карта компании.

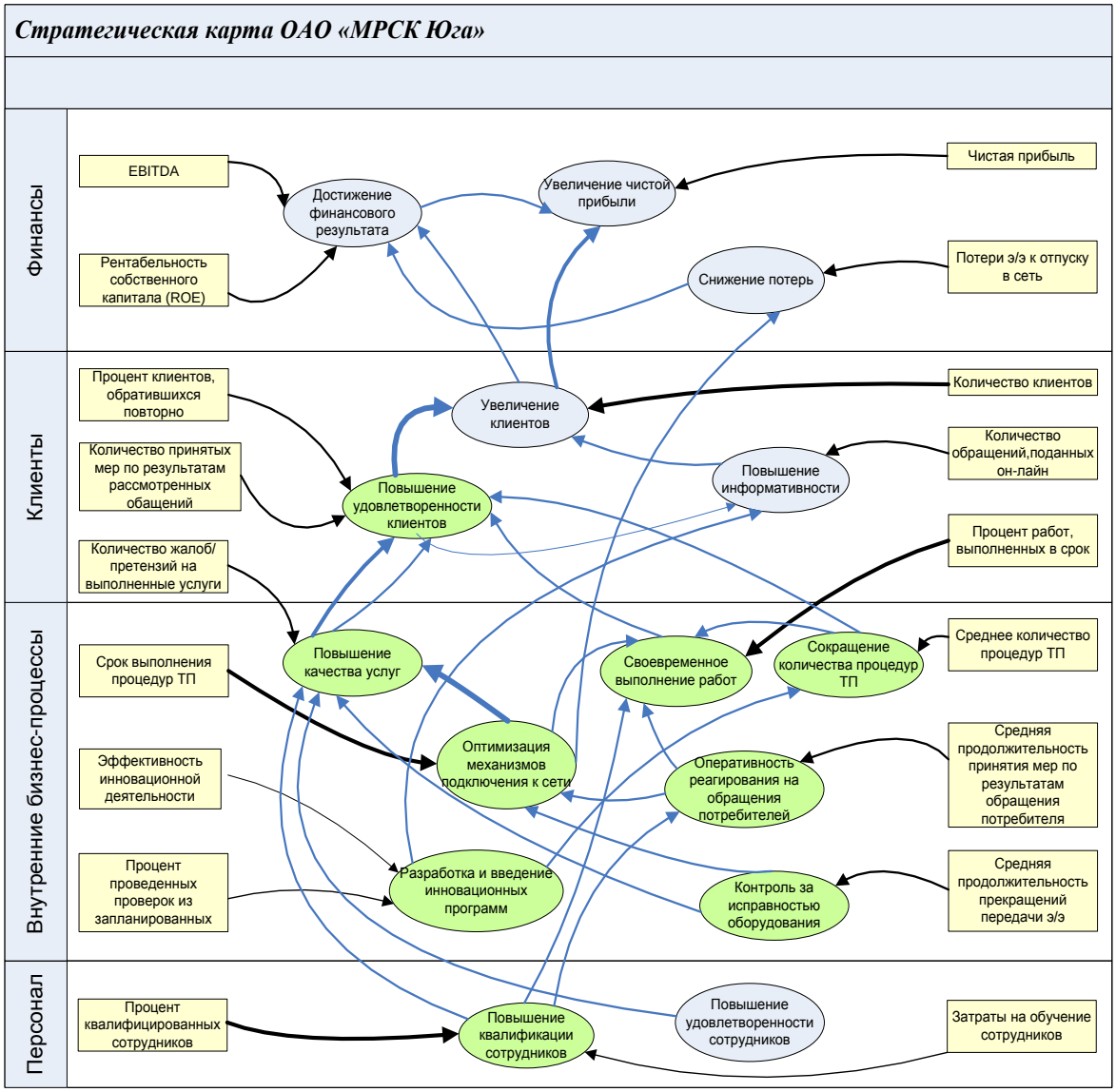



Рис.1 - Стратегическая карта ОАО «МРСК Юга»

Для прогнозирования способов достижения стратегической цели и улучшения балансировки показателей воспользуемся методом интегральной оценки соответствия показателей [2]. Метод позволяет сформировать набор ключевых показателей и,используя интегральный показатель, выполнить свертку конкретных индикаторов деятельности. Сущность методики расчета интегрального показателя заключается в

установлении логических связей и распределении весовой значимости определенных коэффициентов по всем проекциям и стратегическим целям разрабатываемой системы сбалансированных показателей [2].

Общим показателем «успешности» реализации стратегии служит интегральный показатель главной стратегической цели (ИП), который определяется

$$\text{ИП} = X_{\Ф} + X_{\К} + X_{\text{ВБП}} + X_{\П}; \quad (1)$$

где$X_{\Ф}, X_{\К}, X_{\text{ВБП}}, X_{\П}$ - интегральные показатели,агрегирующий относительный коэффициент изменения (ОКИ) по проекциям соответственно финансов, отношений с клиентами, внутренним бизнес-процессам и персоналу.

Определив значение интегрального показателя по данным мониторинга можно оценить, насколько выполнена стратегическая цель, а при отклонениях оценить их существенность и своевременно внести корректировки в план реализации стратегии. Однако, простое определение отклонения о целевых показателей не дает решения проблемы невыполнения стратегического плана. Необходимо определить причины, повлекшие данное отклонение. Стратегическая карта, по сути, представляет собой причинно-следственную модель, а наличие весовых коэффициентов, отражающих влияние KPI на цели, позволяет не только определить корневые причины проблем, но и оценить, какие именно ключевые показатели деятельности исоответствующие им стратегические цели будут играть решающую рольпри выполнении главной стратегической цели. Для этого рассчитываются относительные коэффициенты изменения i-го показателя с учетом веса его значимости [2].

Далее производится расчет агрегированных ОКИ, отражающих относительные коэффициенты изменения показателей по всем целям перспектив. В заключении рассчитываются интегральные показатели по всем проекциям на основе относительных коэффициентов изменения и сравниваются с изменением главной стратегической цели.

На рис.2 представлен условный график достижения стратегической цели по плановым и фактическим значениям в некоторый период времени.

Отклонение между плановыми (ГСЦ) и фактическими (ИП) значениями обозначено $\Delta_i$, которое вычисляется следующим образом $\Delta_i$=ГСЦ$_i$ - ИП$_j$.

Если $\Delta_i$находится в допустимых границах, определенных на этапе разработки стратегии, то коррекция не требуется, в противном случае ($\Delta_i$ превышает допустимое значение) необходимо провести анализ причин отклонения, особенно, если речь идет о положительном значении $\Delta_i$, и принять меры по устранению рассогласований.

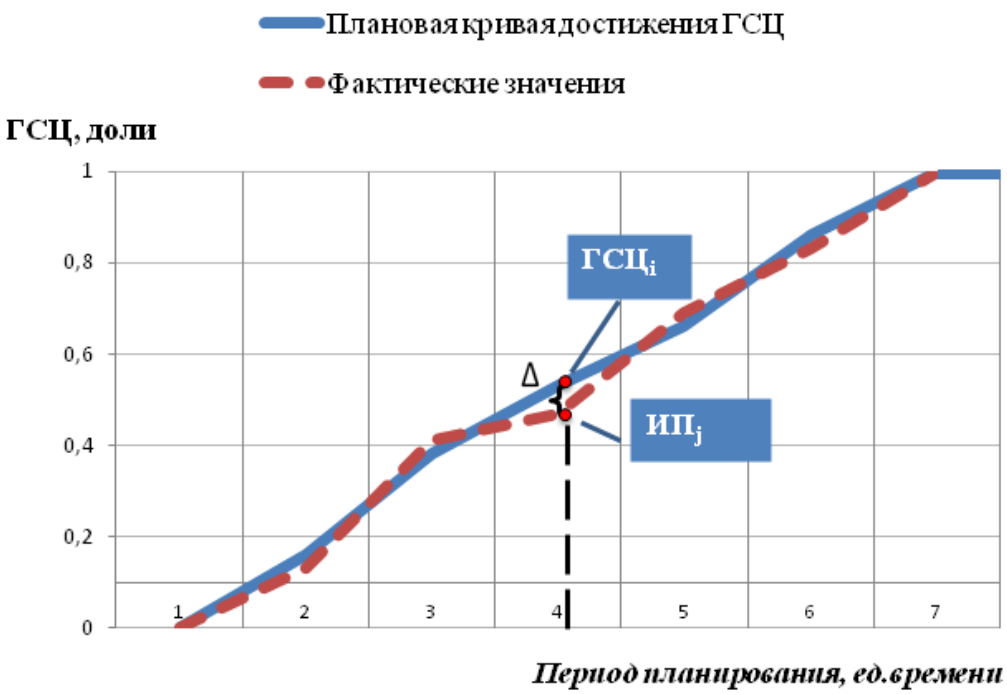



Рис.2- Графическое представление оценки достижимости стратегической цели

**Список литературы**

1. Этапы разработки системы сбалансированных показателей [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.iteam..ru (дата обращения: 12.05.2015).

2. Ромашова Е. А Стратегическое управление промышленными предприятиями на основе системы сбалансированных показателей / Ромашова Е. А. — СПб.: – Нижний Новгород, 2007 – 27с.

# Управление складским хозяйством на основе имитационного моделирования

***А.П. Постникова, Е.В. Корохова***

*Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Одним из современных инструментов для решения задач при проектировании, организации и оптимизации работы складского хозяйства является имитационное моделирование [1], позволяющее на основе вычислительных экспериментов с разработанной компьютерной модельюна этапе проектирования определить эффективную структуру помещения, количество терминалов, требуемое число работников по категориям, оптимальную последовательность этапов бизнес-процессов разрабатываемого или существующего склада [2].

За последние несколько месяцев рассматриваемый завод, выпускающий наукоемкую продукцию, значительно увеличил производительность. В связи с этим на складе при приеме товара создаются очереди. В ближайшее время прогнозируется увеличение объемов производства, поэтому актуальной является задача исследования существующих бизнес-процессов складского хозяйства и выявления возможностей повышения производительности работы склада.

Товар приходит как от внешних поставщиков, так и от производственных цехов завода. Если пункт приема товара занят разгрузкой грузового автомобиля, прибывшего из цеха, и приезжает грузовой автомобиль с грузом внешнего поставщика, то первому необходимо уступить пункт приема, чтобы не задерживать внешнего поставщика. Вследствие этого происходит путаница с прибывшим товаром, что усложняет работу товароведа и замедляет весь процесс работы складского хозяйства.

Для решения поставленной задачи на первом этапе проведен анализ работы склада: определены основные бизнес-процессы, построена функционально-структурная модель процессов, произведен хронометраж операций. Далее на основе анализа полученных статистических данных определены характеристики законов распределения параметров: данные о расписании прибытия поставщиков; временные задержки по операциям, количество груза и  др.

Центр приема товара в терминах массового обслуживания представляет собой динамическую дискретную модель, в которой через определенные интервалы времени в систему поступают заявки, становятся в очередь, получают обслуживание и удаляются.

Для построения имитационной модели были созданы следующие основные элементы:

1) Source (создает объекты):

-Вход, который создает объекты«поставщик» согласно расписанию. Свойства данных элементов отображены соответственно на рис. 1,2;

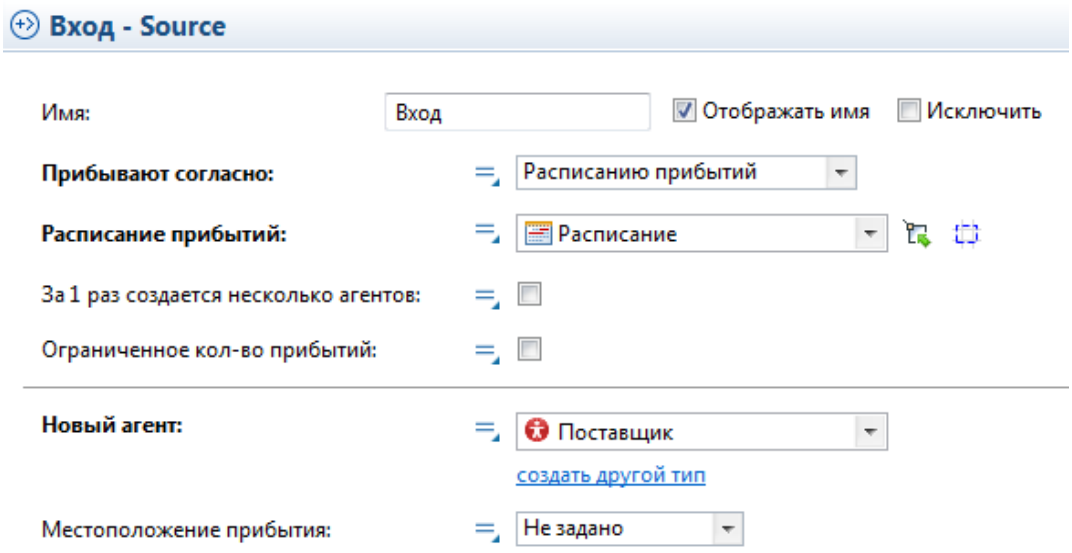



Рис. 1 – Свойства элемента Вход

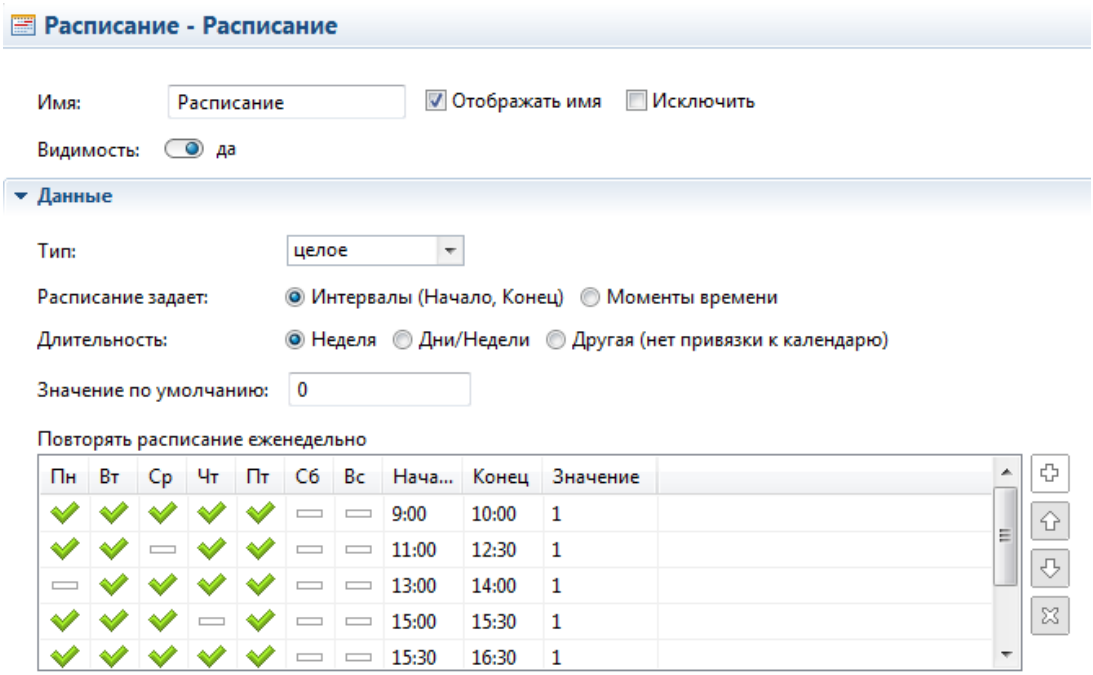



Рис. 2 – Свойства элемента Расписание

– Queue (моделирует очередь агентов, ожидающих приема объектами, следующими за данным в потоковой диаграмме): очередь грузовиков; проверка, свойства этого элемента показаны на рис.3; подготовка; перемещение; размещение.

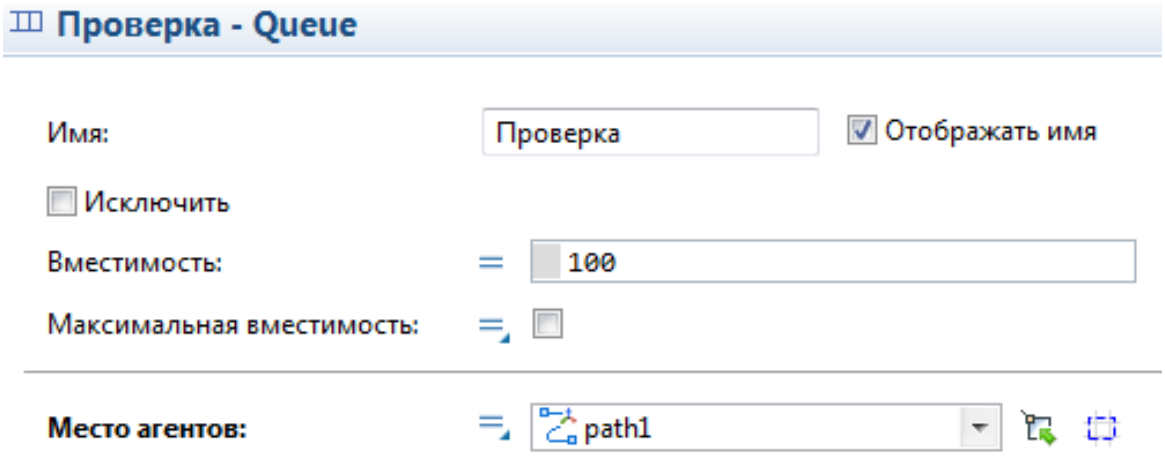



Рис. 3 – Свойства элемента Проверка

– Delay (задерживает агентов на заданный период времени):разгрузка, свойства этого элемента показаны на рис. 4;ввод

данных;маркировка.

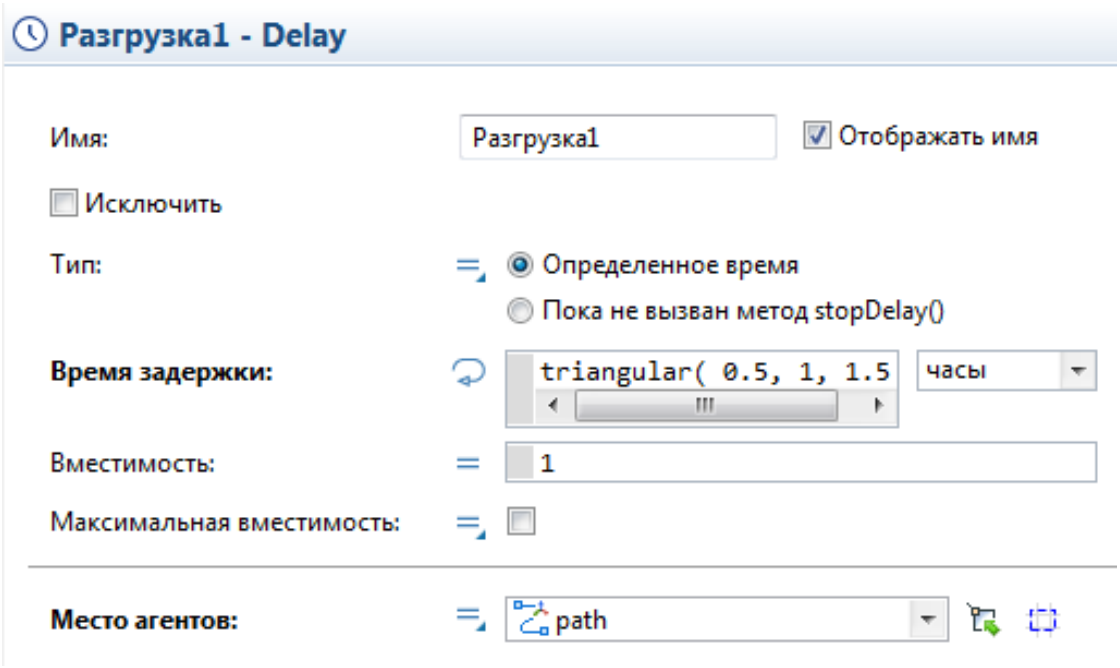



Рис. 4 – Свойства элемента Разгрузка

– Sink (уничтожает поступающие объекты): выход, в котором объект – поставщик выходит из системы; хранение, в котором объект – товар выходит из системы.

С помощью имитационного эксперимента выявлено, что весь процесс приема товара задерживает этап проверки. Поскольку товаровед может за час проверить не более 50 коробок, то в случае, если очередь грузовиков возрастает до двух, образуется очередь из грузовиков, ожидающих, пока товаровед не проверит весь товар. С увеличением количества грузовиков очередь растет, как это показано на рис. 5.

Для того чтобы не собиралась очередь при приеме товара, необходимо организовать второй канал приема товара, который будет начинать свою работу при условии, что первый поток, имеющий приоритет в приеме товара, будет занят.А также внедрить систему управления складом (Warehouse Management System – WMS) иметод автоматической радиочастотной идентификации (Radio Frequency IDentification,

радиочастотная идентификация – RFID).

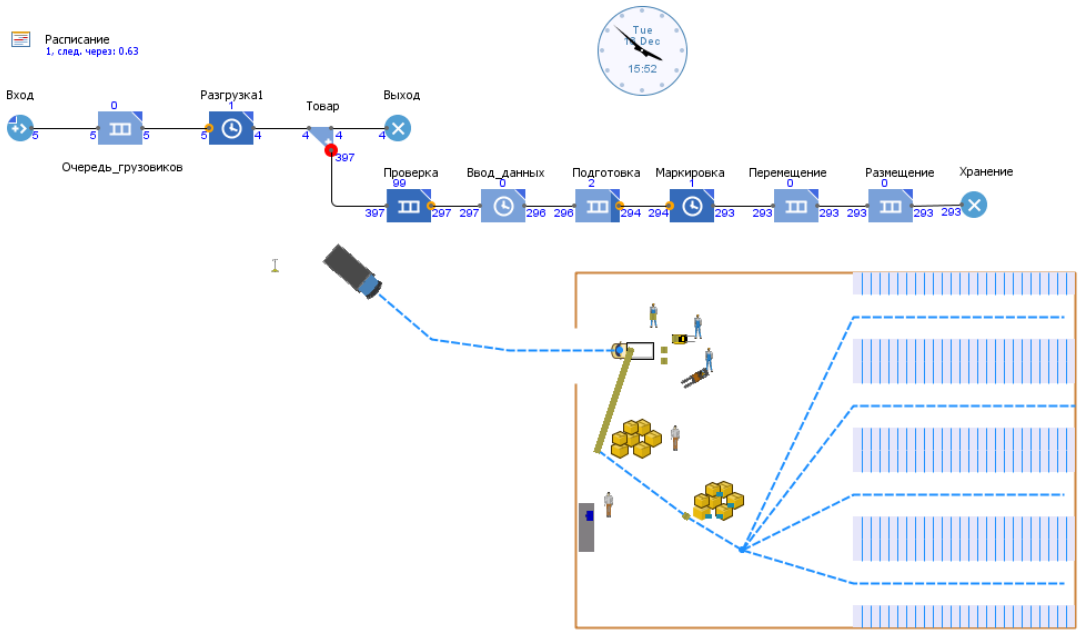



Рис. 5– Структура имитационной модели и результаты имитационного эксперимента до нововведений

В результате внедрения WMS-системы и современной системы считывания информации RFID время ввода данных, по мнению независимых экспертов, уменьшится на 50 процентов [1,3]. Использование автопогрузчиков такжепозволит снизить продолжительность перемещения товара по складу и его размещения.

Структура новой модели с учетом предложенных нововведений приведена на рис. 6. Имитационный эксперимент показал, что при увеличении входящего потока грузовиков в пределах прогнозируемого роста очереди не возникают.

Таким образом, использование имитационной модели позволило оценить эффективность предложенных мероприятий по повышению производительности работы складского хозяйства на основе внедрения автоматизированной системы управления складом и методов радиочастотной идентификации.

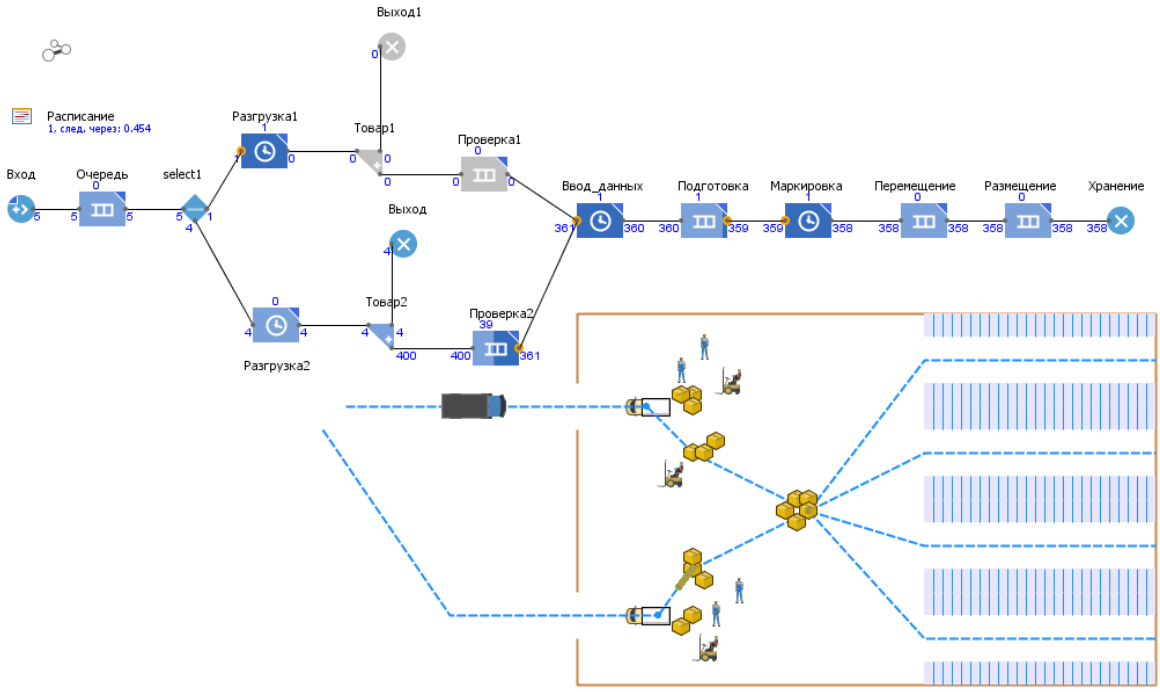



Рис. 6 – Структура имитационной модели с учетом нововведений

**Список литературы**

1.Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 (+ CD) / Ю. Г. Карпов. – БХВ-Петербург - Москва, 2010. - 400 с.

2. Девятков, В.В. Имитационное моделирование: Учебное пособие / Н.Б. Кобелев, В.А. Половников, В.В. Девятков. - М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 368 с.

3. Лоу, Аверилл М.Имитационное моделирование / Аверилл М.Лоу, В. Дэвид Кельтон. – СПб: Питер - Москва, 2010. - 848 с.

**Управление внедрением и развитием системы управления качеством на основе модели результативного менеджмента**

***Е.А. Студенникова, О.А. Субботина, Е.В. Корохова***

*Институт высоких технологий и пьезотехники, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Современный уровень конкуренции на рынке предъявляет высокие требования к качеству продукции, к эффективности работы производства. Качество продукта базируется на применении системы менеджмента качества (СМК) и требует комплексного подхода к решению инженерно-технических проблем. Сертификация систем по стандарту ИСО 9001 является объективным и независимым доказательством готовности производства стабильно выпускать продукцию высокого качества. Однако внедрение и обеспечение эффективного функционирования СМК на основе всестороннего мониторинга и анализа внутренней и внешней среды организации и системного использования методов стратегического и проектного управления является актуальным. Целью исследования является повышение эффективности внедрения и последующей сертификации СМК путем принятия решений на основе оценки состояния СМК с помощью модели результативного менеджмента.

Модель результативного менеджмента [1] характеризуется девятью критериями, сгруппированных в две группы «возможности» и «результаты». Восемь из критериев позволяют оценить степень выполнения в организации основных принципов современного менеджмента качества, отраженных в стандартах ИСО серии 9000: ориентация на потребителя, роль руководства, вовлеченность работников, взаимовыгодные отношения с поставщиками, системный подход, процессный подход, принятие решений, основанное на фактах, постоянное улучшение. Десятый критерий – ключевые результаты бизнеса - соответствует интегральной оценки показателей деятельности (Key Performance Indicators – KPI). Данная модель позволяет дать комплексную оценку системы менеджмента качества любой организации и использовать

данные интегральные показатели для стратегического и среднесрочного планирования внедрения и развития СМК и оценки достижимости планов.

Управление внедрением и развитием СМК на основе модели результативного менеджмента осуществляется в соответствии со следующим обобщенным алгоритмом (рис. 1).

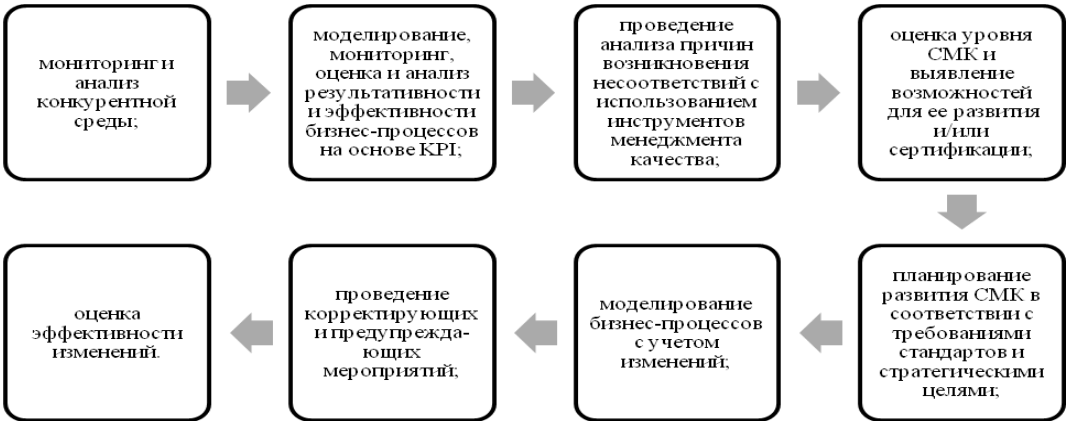



Рис. 1 - Этапы управления внедрением и развитием СМК

На первом этапе проводится анализ внешней среды с использованием методов маркетинга и традиционного стратегического анализа. Для компании «Аква Маркет» проведена оценка конкурентных преимуществ продукта, выявлены угрозы конкуренции для товара и определены необходимые важные стратегические решения для сохранения и укрепления конкурентоспособности компании в долгосрочном периоде. На втором этапе построены модели бизнес-процессов компании, определены показатели их результативности и эффективности, которые наряду с традиционно используемыми в организации показателями использованы для формирования перечня KPI. На следующем этапе разработаны контрольные листки и проведен сбор и анализ статистических данных контроля качества сырья, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции, а также анализ результатов мониторинга удовлетворенности потребителей.

С использованием инструментов менеджмента качества (гистограмм, диаграмм Парето, диаграмм Ишикавы, контрольных карт по количественному и альтернативному признакам) был выявлен ряд недостатков, которые ведут к увеличению затрат на производство, а также

к увеличению времени, необходимого для выполнения заказов. Для устранения проблем одного из «узких» мест производства - процесса производства пробки для бутылей – предложен ряд организационно-технологических изменений.

Анализ результатов оценки СМК (четвертый этап) компании «Аква Маркет» на основе модели результативного менеджмента, приведенных в табл. 1., показал, что компании «Аква Маркет» не хватает 31,5 % для полного охвата управления организацией (максимальная общая оценка достижений – 1000 баллов), при этом результат от управления достигается лишь в 68,5 % случаев. Таким образом, можно сделать вывод о неэффективности методов управления качеством, поскольку используются почти все возможности, но при этом не получается достичь результата.

Таблица 1 – Оценка уровня СМК

| **Критерии** | **Макс. оценка, балл** | **Вес, балл** | **Фактическая оценка, балл** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Эксп. 1** | **Эксп. 2** | **Эксп. 2** | **Сред-няя** | **Итоговая** |
| Роль руководителя | 100 | 1 | 90 | 80 | 95 | 88,3 | 88,3 |
| Вовлечение работников | 90 | 0,9 | 60 | 50 | 60 | 56,7 | 51,0 |
| Постоянное улучшение | 80 | 0,8 | 100 | 70 | 70 | 80,0 | 64,0 |
| Взаимовыгодные отношения с поставщиками | 90 | 0,9 | 100 | 90 | 95 | 95,0 | 85,5 |
| Процессный подход | 140 | 1,4 | 70 | 70 | 60 | 66,7 | 93,3 |
| **Всего возможности** | **500** | **5** | **420** | **360** | **380** | **386,7** | **382,2** |
| Системный подход | 90 | 0,9 | 80 | 80 | 90 | 83,3 | 75,0 |
| Ориентация на потребителя | 200 | 2 | 70 | 65 | 80 | 71,7 | 143,3 |
| Принятие решений, основанных на фактах | 60 | 0,6 | 90 | 60 | 70 | 73,3 | 44,0 |
| Ключевые результаты бизнеса | 150 | 1,5 | 60 | 70 | 80 | 70,0 | 105,0 |
| **Всего результаты** | **500** | **5** | **300** | **275** | **320** | **298,3** | **367,3** |
| **Общая оценка достижений** | | | | | | | **685,0** |

Анализ результата суммарного оценочного листа (рис. 2) показал, что предприятие в целом готово к внедрению и сертификации СМК, однако по некоторым критериям, таким как «вовлечение работников», «процессный подход», ориентация на потребителя» и «ключевые показатели бизнеса» наблюдается существенное отклонение от требований стандарта. Поэтому именно на эти критерии следует обратить особое внимание при подготовке к сертификации.

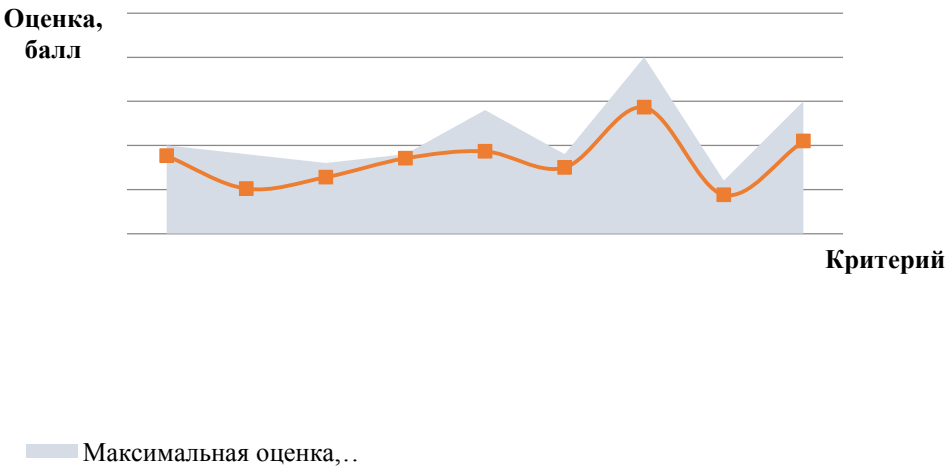



Рис. 2 – Диагностический профиль СМК

На следующем этапе разработан план внедрения СМК, включающий мероприятия по разработке документации СМК, обучению сотрудников, созданию нового подразделения – отдела качества, функции которого заключаются в осуществлении контроля качества и разработке мер по повышению качества продукции и др. Построены модели бизнес-процессов с учетом изменений, которые могут служить основой для формирования документов и реализации последующих этапов внедрения и сертификации СМК.

Предварительная оценка предложенных корректирующих и предупреждающих мероприятий на основе модели результативного менеджмента, проведенная экспертами организации, позволяет прогнозировать повышение качества продукции и эффективности работы предприятия в целом. Таким образом, использование модели результативного менеджмента позволяет проводить комплексную оценку состояния СМК и принимать эффективные решения по управлению развитием организации с учетом требования стандарта ИСО 9001.

**Список литературы**

1. Шокина, Л.И. Оценка качества менеджмента компаний : учебное пособие / Л.И. Шокина ; под ред. проф. М.А. Федотовой. — М. : КНОРУС, 2012. — 344 с. ISBN 978-5-406-01792-0

## Мультипроектное управление с использованием пула ресурсов

***В.М. Плотников, Н.С. Пономарева***

*Институт высоких технологийи пьезотехники Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Проектная деятельность в нашей стране стеснена рамками графика финансовой отчетности, консервативности законодательства, сложности документооборота. Актуальной является задача внедрения современных методов управления проектами и информационных систем их поддержки, доказавших эффективность использования в мировой практике проектного управления. Эффективное использование времени сотрудников при параллельной работе над несколькими проектами обеспечивается внедрением методов мультипроектного управления.

Проанализированы этапы разработки конкурсной документации (рис. 1) и процедура составления отчетности (рис.2) организации. Для составления документации первоначально формируется техническое задание с учетом всех основных аспектов, необходимых для реализации проекта и достижения соответствующих целевых показателей. На следующем этапе, основываясь на техническом задании, собираются коммерческие предложения от различных фирм, готовых поставить продукцию или оказать услугу.

В зависимости от способа закупки «Запрос цен» или «У единственного поставщика» составляется служебная записка. Основная задача данного документа определить начальную (максимальную) цену договора, для выставления контракта на торги.

После проверки пакета документов начальником отдела, экономическим блоком и бухгалтерией он отправляется на согласование. На этапе согласования рассматривается целесообразность данной закупки (оказания услуги) и соответствие документов юридическим и экономическим требованиям.

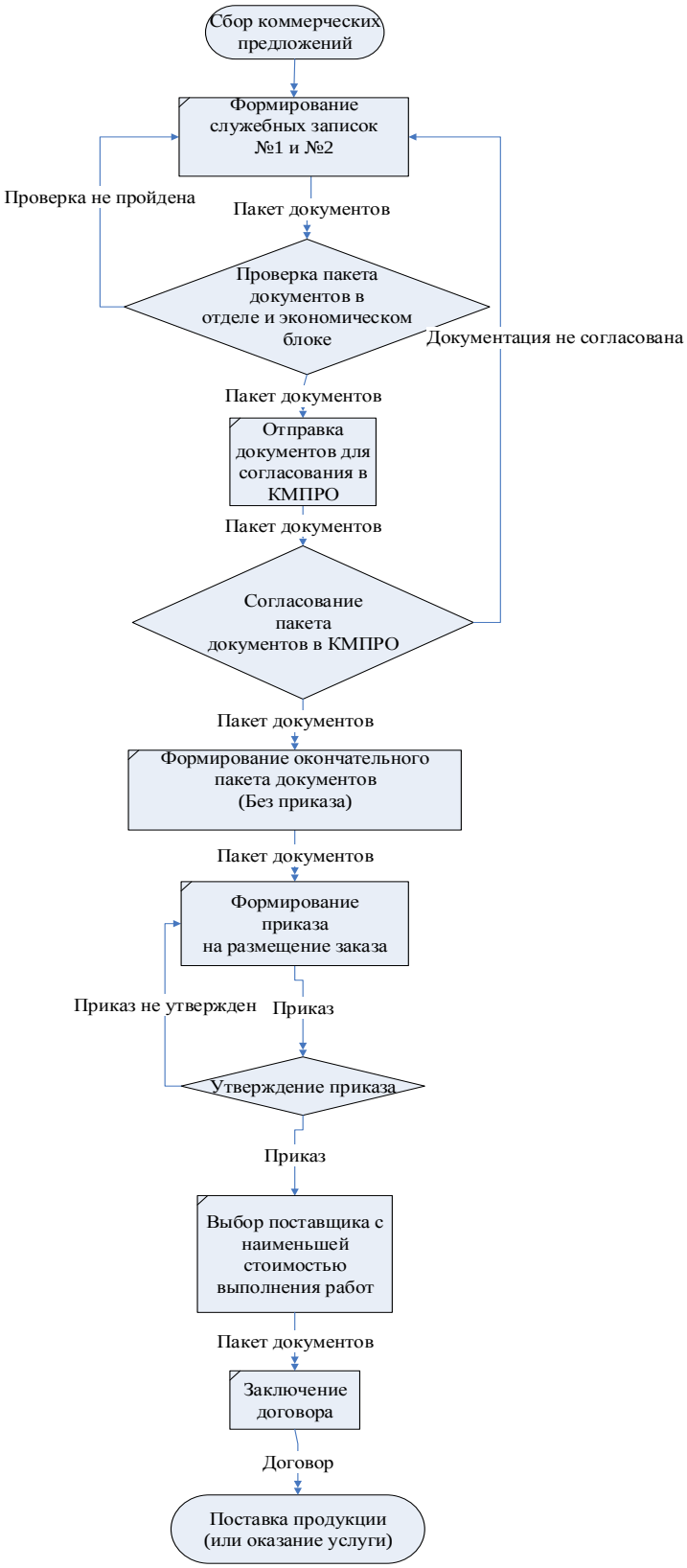



Рис 1 – Этапы разработки конкурсной документации (Нотация Процесс)

Следующим шагом добавляется таблица с указанием мероприятия и его соответствия плану мероприятий центра, а также стоимостью оказания услуги (закупки), таким образом, формируется окончательный пакет документов.

Разработка приказа о размещении заказа на выполнение работ основывается на расчетах в служебной записке. Далее на основании утвержденного приказа проводятся торги и выбирается поставщик для заключения договора на поставку (оказание услуг).

После формирования закупочной документации, заключения договора с поставщиком и проведения мероприятия, в течение 7 рабочих дней составляет отчет. Структура отчета и этапы его разработки представлены на следующей диаграмме (рис 2.).

Отметим, что для упрощения на данной диаграмме рассматривается составление одного отчета специалистом, в то время как в реальном рабочем процессе одновременно формируется четыре отчетных документа сотрудниками в соответствии со своими направлениями работы.

Процедура составления отчета (рис.2) начинается с разработки аналитического отчета. Следующим шагом специалистом ответственным за мероприятие составляются экономические документы: акт целевого использования, акт на списание товарно-материальных ценностей, сводный финансовый отчет, после их утверждения на основании аналитического отчета готовится «Фотоотчет СМИ» и фотоотчет выдачи участникам мероприятия предоставленных поставщиком товаров (оказанных услуг). На последнем этапе специалист сверяет основные отчетные документы – ведомости и заявки. После их проверки сформированный отчет утверждается директором учреждения. Кроме того, на данной диаграмме каждая процедура разработки документов и их утверждения имеет обратную связь, в случае если документ составлен неверно или имеет ошибки.

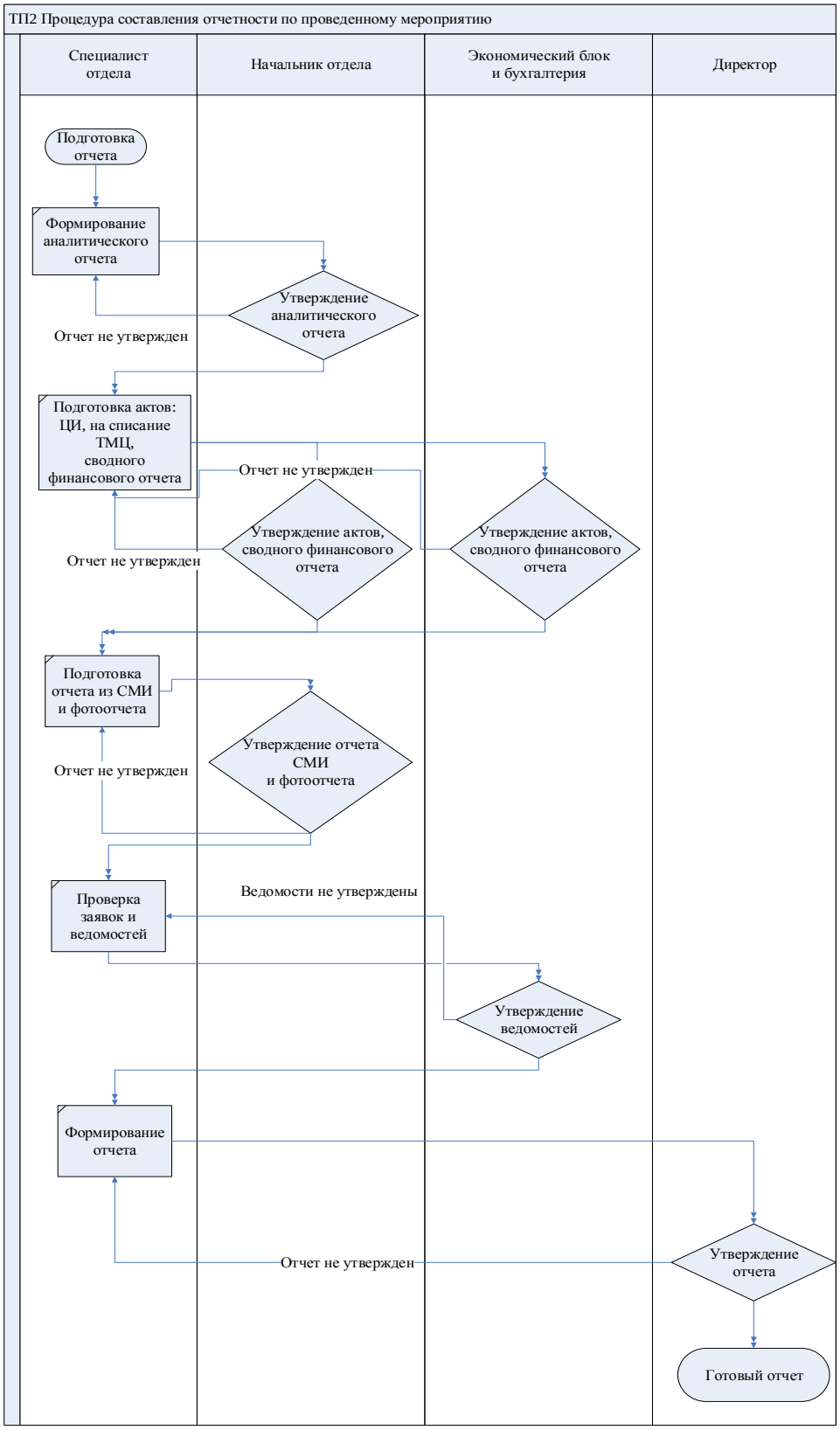



Рис.2 – Процедура составления отчетности
(Нотация процедура)

По результатам анализа этапов разработки конкурсной документации и процедуры составления отчетности создана структурная декомпозиция работ типового проекта с использованием информационной среды MicrosoftProject. Загруженность сотрудников организации добавленных в пул ресурсов рассчитана при помощи информационной среды, и значительно превышает имеющиеся ресурсы. График загруженности ведущего специалиста, работающего над двумя проектам параллельно, представлен на рис.3

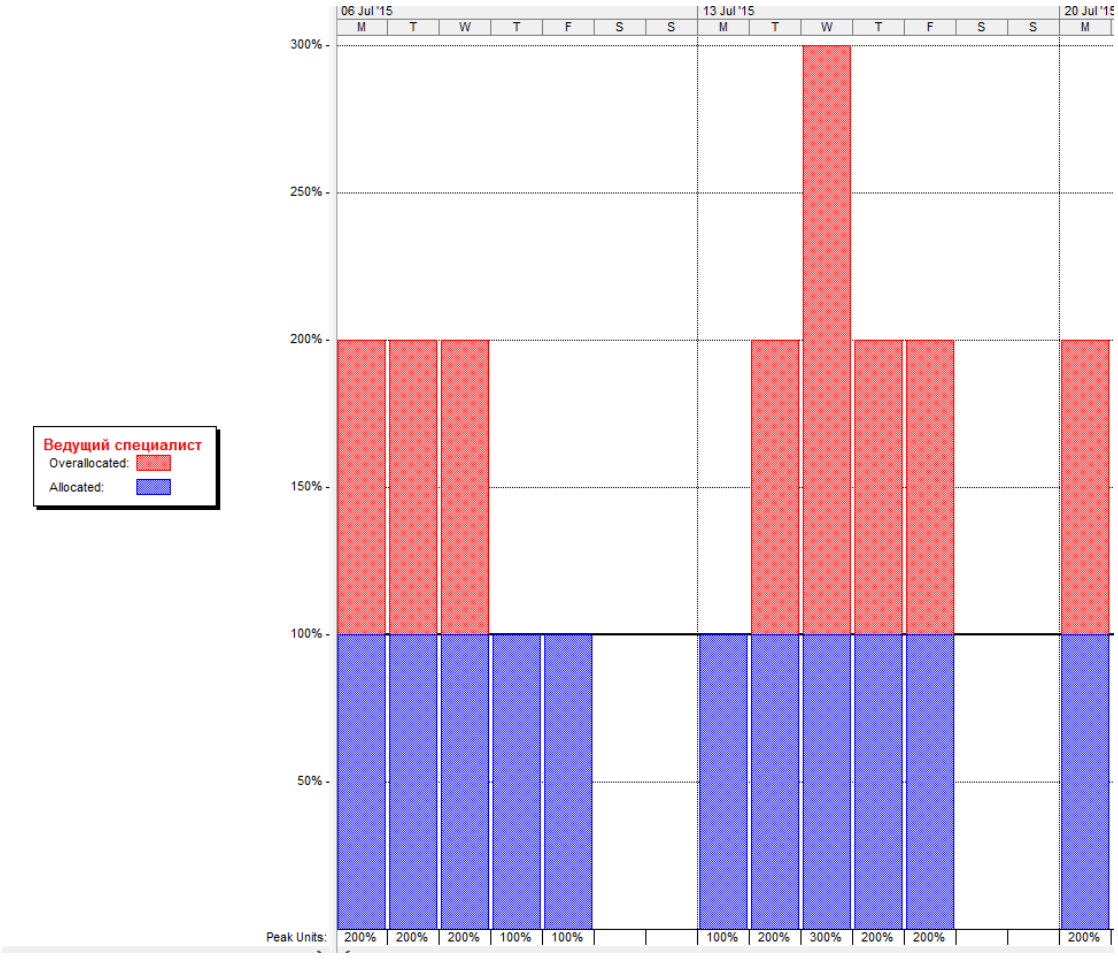



Рис. 3– График загруженности ведущего специалиста по двум проектам

После применения функции распределения ресурсов к процессу подготовки документации уменьшилась степень загруженности ведущего специалиста, но при этом время разработки конкурсной и отчетной документации увеличилось.

С введением системы управления проектами и программного средства MicrosoftProject в разработку конкурсной документации и составления отчетности по проектам, время разработки данных документов сократилось. Система позволяет специалистам распределять временные ресурсы по задачам, отслеживать прогресс и анализировать объем работ.

Если по итогам 2014 года разработка документации до внедрения системы управления проектами в организацию заняла около трех месяцев, а составление отчетного пакета документов два месяца, то в 2015 году на разработку документов потрачено около 50 дней, а на отчетные документы 24 дня (рис.4). Таким образом, время разработки конкурсной документации сократилось на 45 %, а отчетной документации на 60 % .

Рис. 4 – Временной график разработки документов

Сокращение времени разработки документациипо текущим проектам, как конкурсной, так и отчетной, позволит специалисту перейти к формированию документов по новым проектам. Использование пула ресурсов при мультипроектоном типе работ повышает экономическую эффективность и заметно снижает материалоемкость организаций.

# Адаптация свободных параметров роя частиц на основе дробного исчисления

***И.Г. Дутова[1], В.А. Мохов[1,2]***

*[1] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия*

*[2] Институтвысоких технологий и пьезотехники Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Роевая оптимизация (PSO), в последнее время все чаще находит применение в различных областях науки и жизни. Теперь социальное моделирование, компьютерная графика, моделирование и анимация природных стада и стаи, распознавание образов, квантование изображения и вычислительная биология связаны с роевой оптимизацией. Метаоптимизация связана с процессами настройки или управления свободными параметрами роевого алгоритма [1, 2]. Существуют различные способы объединения PSOс другими методами или алгоритмами с целью компенсации недостатков.

Целью работы является адаптация свободных параметров (метаоптимизационная модификация) алгоритма роя частиц на основе использования механизмов дробного исчисления с целью улучшения качества его сходимости.

В качестве оптимизационной составляющей классического роевого алгоритма авторы предлагают использовать дробные производные. Для исследования использовался классический алгоритм роя. С момента появления теории дифференциального и интегрального исчисления, ряд математиков исследовали расчет дробных производных и интегралов. Дробное исчисление (Fractional Calculus) является естественным продолжением классической математики. Тем не менее, применение дробного исчисления (FC) было малоизвестно до недавнего времени, но последние научные достижения мотивировали повышенный интерес в этой области.

Для улучшения свойств алгоритма авторами был использован метод адаптивного ограничения скорости. Ограничение скорости – один из

методов повышения эффективности PSO. Для него используется уравнение изменения скорости. Это уравнение содержит три слагаемых, которые регулируют величину и направление изменения скорости частицы. Ранее было замечено, что скорость частиц может резко увеличиваться. В итоге частицы выходят за границу поиска, то есть расходятся. Во избежание таких ситуаций вводится ограничение скорости. $V_{maxi}$ – максимально допустимая скорость в $i$ – $й$ компоненте. Скорость частицы можно регулировать следующим образом:

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i'(t+1) \text{если} v_i'(t+1) < V_{maxi} \\ V_{\max i} \text{если} v_i'(t+1) \geq V_{maxi} \end{cases} \quad (1)$$

Данный подход имеет преимущество в том, что сдерживает резкое увеличение скорости [3]. Ограничение скорости влияет также на направление движения частицы. В данной модификации PSO можно отметить такой важный момент: при удерживании скорости в определенном диапазоне не ограничивается позиция частицы и из этого следует, что изменяется только скорость. Обратим внимание на скорость частицы, которая выражена формулой:

$$v_i \leftarrow \omega v_i + \phi_b(b_i - x_i) + \phi_g(g - x_i) \quad (2)$$

Если рассматривать $v_i$, как мгновенную скорость неравномерно движущегося тела (в данный момент времени, в данной точке траектории), можно записать:

$$v_{t+1} = \omega v_t + \phi_b(b - x_t) + \phi_g(g - x_t) \quad (3)$$

Перепишем формулу для скорости частицы в алгоритме при значении $\omega = 1$:

$$v_{t+1} = v_t + \phi_b(b - x_t) + \phi_g(g - x_t) \quad (4)$$

Перенесем $v_t$ в левую часть, получаем:

$$v_{t+1} - v_t = \phi_b(b - x_t) + \phi_g(g - x_t) \quad (5)$$

Левую часть можно интерпретировать как разностную аппроксимацию первой производной, т.е.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_{t+1} - v_t}{T}, \text{ где T=1} \quad (6)$$

Подставим (6) в выражение (5):

$$\frac{dv}{dt} = \phi_b(b - x_t) + \phi_g(g - x_t) + (\omega - 1)v \quad (7)$$

Ввиду нелинейности функции $\phi_b$ и $\phi_g$ рой может допускать самоорганизацию, которая обеспечивает достижение общих целей роя на основе низкоуровневого взаимодействия. Из этого можно сделать вывод, о том, что формулам (4) и (5) присуще свойство нелокальности.

Нелокальность – это понятие, которое можно определить как наличие полной информации о всей системе и её элементах в каждой отдельной точке системы, либо как саму возможность того, что любая точка системы может иметь в себе полную информацию о всей системе. В правой части (6) член, содержащий $v_t$, можно интерпретировать как память частицы о ее предыдущем состоянии. Однако наличие производной $\frac{dv}{dt}$в (7) в полной мере не позволяет построить нелокальную модель изменения $v$, так как не учитывает возможные значения $v$ в более ранние моменты, чем t. Выходом из этого состояния является поиск дифференциального оператора, позволяющего учесть приведенное выше обстоятельство. В ряде случаев поведению роя при использовании родственных алгоритмов может быть характерна фрактальная динамика [4, 5], выражающаяся в самоподобной конфигурации роя частиц при выполнении поиска оптимума для некоторых нелинейных функций. Ввиду этого искомый оператор должен допускать возможность своего применения в отношении фрактальных объектов.

Выше перечисленным требованиям удовлетворяет производная нецелого порядка.

Производная нецелого порядка (или дробного порядка) является обобщением математического понятия производной. Это нелокальная характеристика функции: она зависит не только от поведения функции в окрестности рассматриваемой точки x, но и от принимаемых ею значений на всем интервале$(a, b)$. Изменение плотности потока частиц зависит и от её значений в удаленных точках пространства. Для функции$f(x)$, заданной на отрезке $[a, b]$, каждое из выражений:

$$D_{a+}^{\alpha} f(x) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dx} \int_a^x \frac{f(t)dt}{(x-t)^{\alpha}} (8)$$

$$D_{b-}^{\alpha} f(x) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dx} \int_x^b \frac{f(t)dt}{(t-x)^a} \quad (9)$$

называется дробной производной порядка $\alpha$, $0 < \alpha < 1$, соответственно левосторонней и правосторонней. Запишем формулу (7) с учетом (8)-(9):

$$D^{\alpha}[v_t] = \phi_b(b - x_t) + \phi_{\mathrm{g}}(\mathrm{g} - x_t) \quad (10)$$

Таким образом, можно наблюдать учет предыдущих значений $v_t, v_{t+1}$ и так далее.

Аппроксимируя (10) с порядком r=4 и повышая порядок r, получим:

$$v_{t+1} = \alpha v_t + \frac{1}{2}\alpha v_{t-1} + \frac{1}{6}\alpha(1-\alpha)v_{t-2} + \phi_b(b - x_t) + \phi_{\mathrm{g}}(\mathrm{g} - x_t) \quad (11)$$

Оценим качество сходимости алгоритма с учетом аппроксимаций (11) и вклад в него параметра $\alpha$. Результат тестирования изображен на рисунке 1. Для тестирования алгоритма была выбрана функция Розенброка:

$$100(y - x^2)^2 + (1 - x)^2 \quad (12)$$

Тестовая функция рассматривается в диапазоне $-0{,}8 \le x \le 1{,}2$, $0{,}1 \le y \le 1.5$ и имеет глобальный минимум равный 0 в точке(1,1).

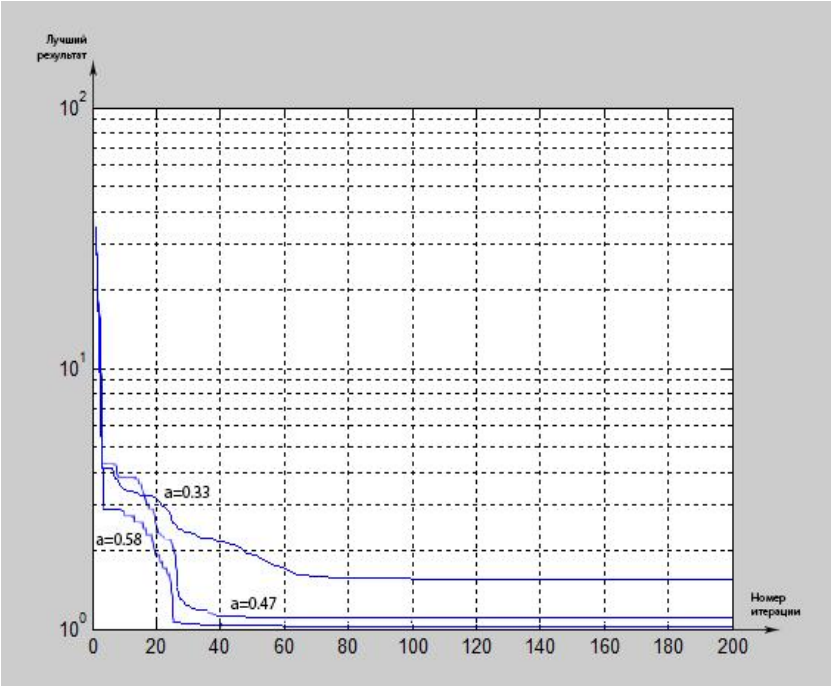



Рис. 1 - График зависимости лучшего результата от итерации с учетом параметра $\alpha$

Дробное исчисление или FC – хорошо развитый математический инструмент, который позволяет понять, как локальные и глобальные

скоростные характеристики влияют на поведение PSO. Понятия FC открывают новые перспективы в направлении разработке более эффективной оптимизации роя.

Предложенный способ адаптации свободных параметров, основанный на дробном исчислении дает возможность для нахождения оптимального значения скорости движения частиц и позволяет сделать предположение о возможности его распространения для настройки значений свободных параметров из других известных роевых алгоритмов.

**Список литературы**

1. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой [Текст] / А.П. Карпенко. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.

2. Мохов, В.А. К вопросу о параметрической оптимизации роевых алгоритмов [Текст] / В.А. Мохов, Е.Н. Бородулина – Ростов-на-Дону: «Известия ЮФУ. Технические науки», 2014, №4, – С. 230-234

3. Скобцов, Ю.А. Метаэвристики: монография [Текст] / Ю.А. Скобцов, Е.Е. Федоров. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. – 426 с.

4. Шелушин, О.И. Самоподобие и фракталы [Текст] / О.И. Шелушин, А.В. Осин, С.М. Смольский – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.

5. Solteiro Pires E. J. Particle swarm optimization with fractional-order velocity [Текст] / E. J. Solteiro Pires, J. A. Tenreiro Machado, P. B. de Moura Oliveira, J. Boaventura Cunha, Luís Mendes // Nonlinear Dynamics, July 2010, Volume 61, Issue 1-2, pp 295-301

*Научное издание*

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

сборник трудов
II международной молодежной научной конференции

г. Ростов-на-Дону, 6–10 сентября

2 том

Подписано в печать 26.08.2015 г . Заказ № 4661.
Тираж 150 экз. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 15,23. Уч.-изд. л. 9,37.
Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 247-80-51.