

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»
Направление 12.03.01 – Приборостроение
(Приборы, комплексы и элементная база приборостроения)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____/А.Л. Шестаков/

«__» _____ 20__ г.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В
ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 12.03.01.2019.299 ВКР

Руководитель,
доцент

_____/О.Ю. Бушуев/
«__» _____ 20__ г.

Автор работы:

студент группы КЭ-464
_____/Е.С. Тугова/
«__» _____ 20__ г.

Нормоконтролер, доцент

_____/А.А. Лысова/
«__» _____ 20__ г.

АННОТАЦИЯ

Тугова Е.С. Моделирование распространения ультразвуковых волн в задаче диагностики технического состояния преобразователей давления. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-464; 2019, 67 с., 39 ил., библиогр. список – 20 наим., 2 прил.

Целью данной работы является исследование распространения ультразвуковые волн в задаче диагностики технического состояния преобразователей давления.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы необходимо выполнить следующие цели:

- провести литературный и патентный поиск аналогов по соответствующей тематике;
- создать 3D-модель преобразователя давления и исследовать данную модель с помощью математических расчетных программных пакетов (ANSYS);
- разработать конструкторскую документацию к данной модели;
- провести исследования с макетом преобразователя давления (для этого разработать исследовательский измерительный стенд для преобразователей давления);
- сравнить результаты моделирования и макета преобразователей давления.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены практические навыки работы с учебной и научной литературой и её анализа, выполнена математическая модель датчика давления, реализованы конструкторские документы к ней, создан стенд для исследования преобразователя давления и получены рекомендации по реализации датчика давления с функцией метрологического самоконтроля.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299 КР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	Моделирование распространения ультразвуковых волн в задаче диагностики технического состояния преобразователей давления	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		Тугова Е.С.					3	67
<i>Проез.</i>		Бушуев О.Ю.						
<i>Н.контр.</i>		Лысова А.А.				ЮУрГУ		
<i>Утв.</i>		Шестаков А.Л.				Кафедра ИНИТ		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ	7
1.1. Постановка задачи.....	7
1.2. Анализ современного подхода к моделированию распространения ультразвуковых волн в различных технических задачах	7
1.3. Анализ технического задания, обзор аналогов и выбор метода моделирования распространения ультразвуковых волн применительно к интеллектуальному датчику давления	15
2. РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В КОРПУСЕ ДАТЧИКА	21
2.1. Постановка задачи.....	21
2.2. Разработка 3D-модели измерительного блока датчика давления.....	21
2.3. Моделирование распространения ультразвуковых волн в корпусе датчика .	24
2.4. Разработка конструкторской документации на основании моделирования ..	33
3. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА	35
3.1. Постановка задачи	35
3.2. Описание оборудования измерительного стенда.....	36
3.3. Обеспечение обмена данными между основными элементами стенда и персональным компьютером через среду программирования MatLab	40
3.4. Разработка программного обеспечения для стенда измерения давления в среде MATLAB	43
3.5. Разработка графического интерфейса для измерительного стенда	48
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	54
4.1. Постановка задачи.....	54
4.2. Определение АЧХ пьезокерамического излучателя в виде кольца	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	60

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						4
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Спецификация. Сборочный чертеж. Чертеж корпуса 62
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Листинг ПО лабораторного стенда 65

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						5
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент в области информационно-измерительной технике ведущую роль играет так называемые интеллектуальные средства измерения.

В данной работе речь идет о моделировании процессов в интеллектуальном датчике давления.

Целью данной работы является исследование распространения ультразвуковые волн в задаче диагностики технического состояния преобразователей давления.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы необходимо выполнить следующие задачи:

- провести литературный и патентный поиск аналогов по соответствующей тематике;
- создать 3D-модель преобразователя давления и исследовать данную модель с помощью математических расчетных программных пакетов (ANSYS);
- разработать конструкторскую документацию к данной модели;
- провести исследования с макетом преобразователя давления (для того разработать исследовательский измерительный стенд для преобразователей давления);
- сравнить результаты моделирования и макета преобразователей давления.

На сегодняшний момент в промышленности предпочтение отдается таким средствам измерения, которые обладают большой безопасностью и надежностью по сравнению с традиционными средствами измерения. Такие средства измерения должны обладать возможностью самодиагностики характеристик. На создание и исследование таких средств и направлена эта работа.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						6
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

1. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ

1.1. Постановка задачи

В данной главе необходимо проанализировать современный подход к моделированию распространения ультразвуковых волн в различных технических задачах, провести обзор областей использования данного моделирования, провести анализ технического задания и выбрать метод моделирования распространения ультразвуковых волн применительно к интеллектуальному датчику давления, а также разработать структурную схему стенда для исследования параметров и состояния интеллектуального датчика давления с пьезокольцом в корпусе.

Цель проекта – построить модель распространения ультразвуковых волн пьезокерамического излучателя и установить влияние режимов работы излучателя на параметры выходного сигнала тестируемого преобразователя давления.

Для определения влияния режимов работы излучателя на параметры выходного сигнала тестируемого преобразователя давления необходимо разработать измерительный стенд.

1.2. Анализ современного подхода к моделированию распространения ультразвуковых волн в различных технических задачах

Одной из задач в области информационно-измерительной техники на современном этапе является создание интеллектуального датчика давления, обладающего функцией самодиагностики и/или метрологического самоконтроля [1]. Возможное решение данной задачи – использование избыточности, основанной на применении тестового ультразвукового сигнала пьезокерамического излучателя, установленного внутри корпуса измерительного преобразователя [2].

Для того, чтобы сделать возможным использование ультразвукового импульса в реальном датчике, необходимо установить его характеристики, другими словами актуальной является задача моделирования распространения ультразвуковых волн в конструкции преобразователя давления.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						7
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Рассмотрим следующие технические задачи, в которых в той или иной мере используется моделирование распространения ультразвуковых волн и где это моделирование необходимо и неизбежно.

Большинство задач моделирования распространения ультразвуковых волн встречаются в разделах так называемого неразрушающего контроля в таких областях как металлургия, нефтегазовая промышленность, материаловедение, диагностика прочностных свойств различных деталей и конструктивных узлов.

Так для обнаружения и диагностики состояния прочностных свойств материалов в процессе усталостных испытаний и испытаний на прочность используют зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от изменения модуля упругости и плотности материала[3].

Также измерение скорости распространения ультразвуковых волн используют при изучении свойств композитных материалов, что существенно помогает в процессе визуализации внутренней и внешней структуры данных композиционных материалах [4]. В том случае используют зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от угла отклонения траектории распространения волн от нормали поверхности материала.

Основная проблема моделирования распространения ультразвуковых волн является в трудности аналитического решения волнового уравнения, т.к. необходимо учитывать множество факторов, влияющих на решение: акустические свойства элементов, возможная дисперсия и интерференция ультразвуковых волн. Для систем с множеством элементов решения в аналитическом виде найти, таким образом, не представляется возможным. В связи с этим и в связи с увеличением мощности вычислительных машин возможно численное моделирование данных процессов.

В области неразрушающего контроля применяют метод конечных разностей во временной области [5]. Для двумерного случая распространения ультразвукового сигнала используют модель Кельвина вязкоупругой среды:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon},$$

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	8
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

где σ – напряжение системы;

ε – деформация системы;

E – коэффициент упругости системы;

η – коэффициент вязкости системы.

Итерации происходят по так называемой двухслойной схеме конечных разностей во временной области. Таким образом, возникает система линейных уравнений:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl} + \eta_{ijkl}\dot{\varepsilon}_{kl}.$$

В некоторых случаях, в зависимости от цели моделирования к модели Кельвина добавляют в совместное решение второй закон Ньютона для сплошной среды [6], например, для расчета распространения ультразвуковых волн по металлическим трубам:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i,$$

где ρ – плотность исследуемого материала;

v_i – вектор скорости;

F_i – вектор сторонних сил, которые воздействуют на среду.

Так как деформации системы являются линейными, то тензор деформации системы примет вид:

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right),$$

где U – вектор смещения среды.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						9
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Для решения подобных задач методом конечных разностей во временной области существует программный комплекс, реализованный в программной среде VisualStudio C++ [6].

В результате моделирования возможно получить наглядное представление о распространении ультразвуковых волн внутри модели металлической трубы (Рисунок 1.1).

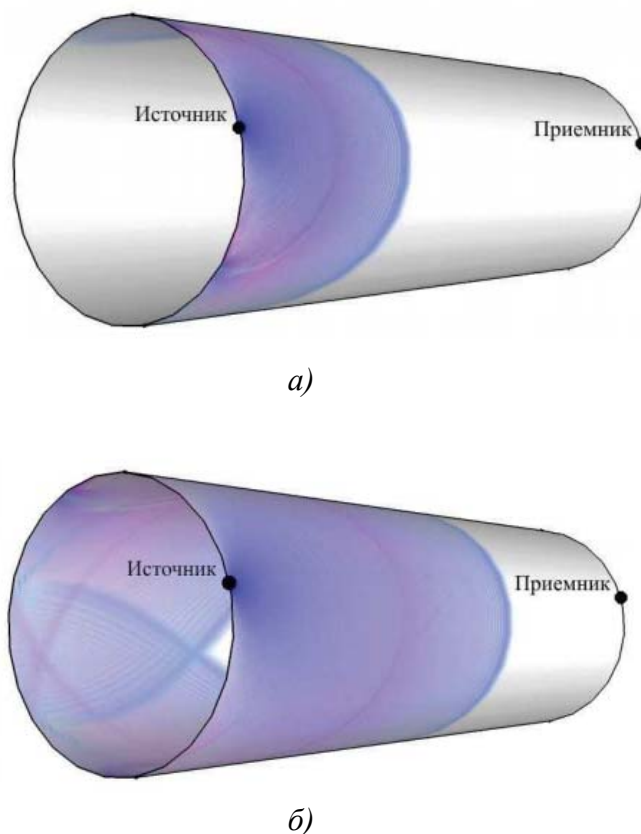


Рисунок 1.1 – Модель распространение ультразвуковых волн внутри металлической трубы:

а) – время расчетов 5мкс; *б)* – время расчетов 10 мкс

Также существует программный комплекс для решения задач распространения ультразвуковых волн методом конечных разностей во временной области, реализованный в программной среде VisualStudio C# [7], позволяющий задавать следующие параметры объектов моделирования: геометрические размеры элементов системы и их физические свойства; свойства источника и приемника

									Лист
									10
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР				

излучения (координаты, размеры излучающих поверхностей, углы излучения, длительность импульса и т.д.). В данном программном комплексе возможно наглядное представление не только модели распространения ультразвуковых волн внутри каких-либо твердых тел, но и интерференционные картины, полученные от разных типов излучателей (Рисунок 1.2).

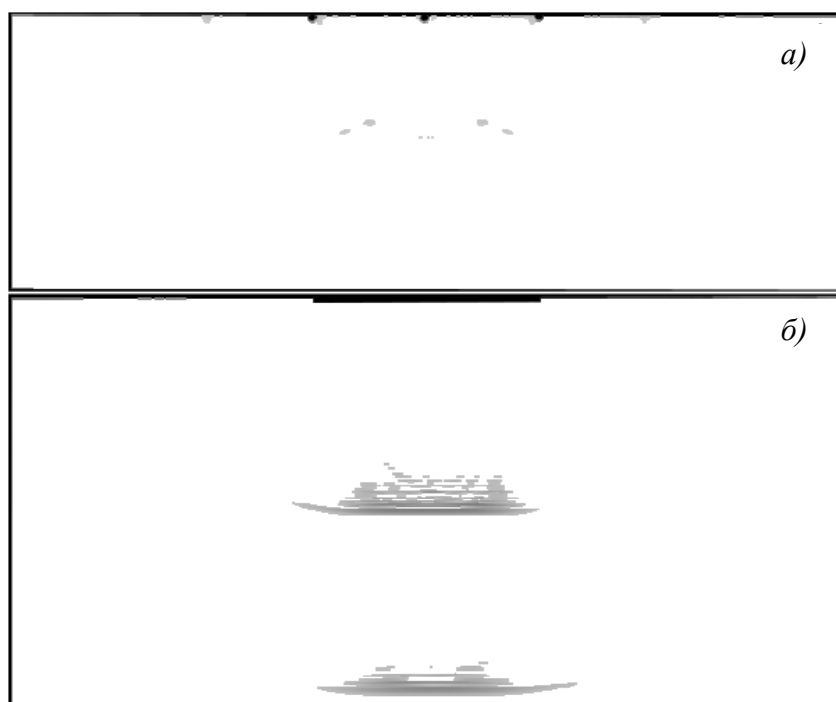


Рисунок 1.2 – Интерференционная картина:

а) – от трех точечных излучателей; *б)* – от излучающей поверхности длиной 2 мм

Метод конечных разностей во временной области имеет следующие преимущества: возможность моделировать динамические волновые процессы в неоднородных, вязкоупругих и анизотропных материалах, а также возможность задавать сложные граничные условия.

К недостаткам этого метода можно отнести накопление погрешностей при округлении на каждом шаге итерации, что впоследствии приводит к моделированию ложных процессов.

Моделирование распространения ультразвука внутри твердого тела возможно в виде распределения акустических давлений. Согласно [8], разработана

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						11
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

математическая модель характеристики направленности приемника и излучателя пьезоэлектрического преобразователя. Так для круглого излучателя давление – $P(x)$, создаваемое ультразвуковой волной, имеет вид:

$$P(x) = P_0 \left| 2 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{a^2 + x^2} - x \right] \right|,$$

где P_0 – давление, создаваемое преобразователем в любой точке под поверхностью раздела либо непосредственно на излучателе;

λ – длина волны;

a – радиус излучателя;

x – расстояние от оси излучателя до точки расчета.

На рисунке 1.3 представлена зависимость акустического поля излучателя от расстояния вдоль оси излучения.

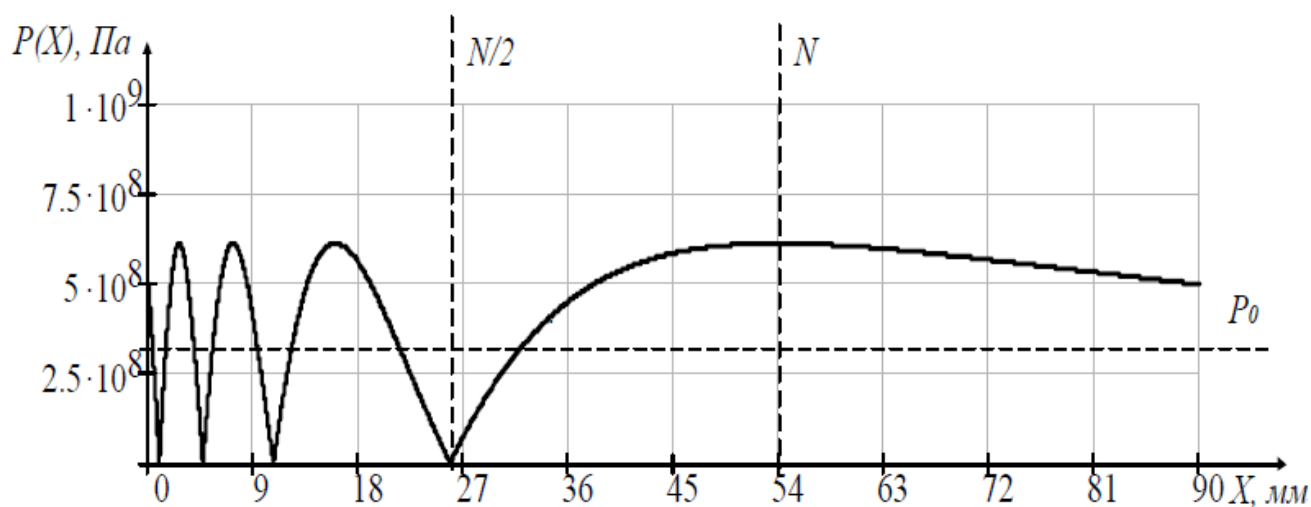


Рисунок 1.3 – Зависимость акустического поля излучателя от расстояния вдоль оси излучения

Функция для построения диаграмм направленности излучателя в поле звукового давления имеет вид:

$$\phi(\varphi) = \frac{2J(x)}{x},$$

где φ – угол расхождения ультразвуковой волны;

$J(x)$ – функция Бесселя первого порядка.

На рисунке 1.4 представлена характеристика направленности с учетом угла расхождения ультразвукового луча.

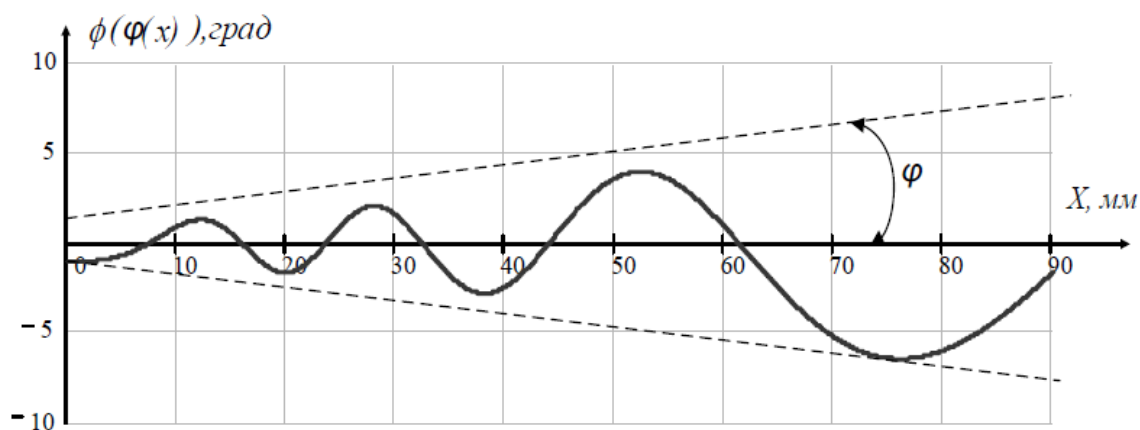


Рисунок 1.4 – Характеристика направленности с учетом угла расхождения ультразвукового луча

На рисунке 1.5 представлена диаграмма направленности, где $I_{\text{Вmax}}$ – акустическая ось диаграммы.

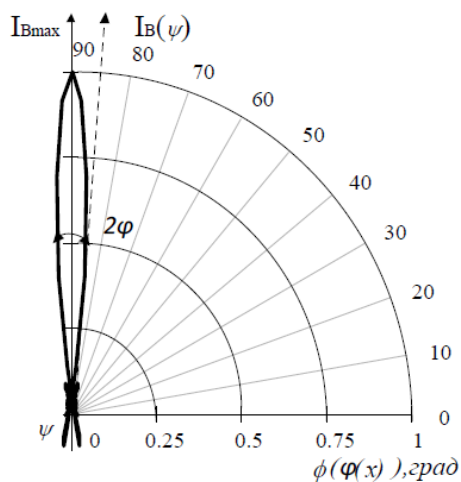


Рисунок 1.5 – Диаграмма направленности

Распространение ультразвуковых волн посредством акустических давлений широко применяется при моделировании пьезокерамических излучателей. Основным способом решения таких задач является метод конечных элементов.

Согласно [9], реализован алгоритм расчета распространения акустических давлений с помощью метода конечных элементов в программном пакете ANSYS 5.3. В данной работе рассматривается моделирование динамических процессов составного пьезоизлучателя, погруженного в жидкую среду.

Математическая модель работы пьезоизлучателя, погруженного в жидкую среду состоит из: Ω_p – самого пьезокерамического тела; Ω_{ek} – упругих сред, необходимых для согласования импедансов пьезоизлучателя и жидкости, в которую он погружен; Ω_w – жидкость, в которую погружен пьезоизлучатель.

Неизвестными полевыми функциями при моделировании являются:

$$u(x, t) = N_u(x) \cdot U(t),$$

$$\varphi(x, t) = N_\varphi(x) \cdot \Phi(t),$$

$$p(x, t) = N_p(x) \cdot P(t),$$

где $u(x, t)$, $\varphi(x, t)$, $p(x, t)$ – векторы упругих смещений, электрических потенциалов, избыточных акустических давлений соответственно;

$N_u(x)$, $N_\varphi(x)$, $N_p(x)$ – матрицы функций формы конечных элементов для полей перемещений, потенциалов и акустических давлений соответственно;

$U(t)$, $\Phi(t)$, $P(t)$ – векторы узловых смещений, потенциалов акустических давлений соответственно.

Таким образом, система уравнений, описывающая задачу распространения акустических давлений пьезоэлектрика в жидкости с соответствующими начальными условиями имеет вид:

$$M \cdot \ddot{a} + C \cdot \dot{a} + K \cdot a = F, a = [U, \Phi, P],$$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						14
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

$$M = \begin{pmatrix} M_{uu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \rho_w R_{up} & 0 & M_{pp} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} C_{uu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{pp} \end{pmatrix} \quad K = \begin{pmatrix} K_{uu} & K_{u\varphi} & -R_{up} \\ K'_{u\varphi} & -K_{\varphi\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & K_{pp} \end{pmatrix}$$

$$F = (F_u \ F_\varphi \ 0),$$

где M , C , K – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно;

F – вектор внешних механических и электрических воздействий;

ρ_w – плотность жидкости;

R_{up} – коэффициент, описывающий взаимодействие твердотельной структуры (пьезоизлучателя) с акустической средой;

K_{uu} – упругие модули;

$K_{\varphi\varphi}$ – диэлектрические проницаемости;

$K_{u\varphi}$ – пьезомодули;

K_{uu} – модуль жесткости среды;

C_{uu} – коэффициент затухания в пьезоэлектрике;

C_{pp} – коэффициент импеданса твердотельной границы и среды.

Реализация данной задачи в программном пакете ANSYS имеет ряд преимуществ, одним из которых является то, что коэффициенты дифференциальных уравнений задаются в виде понятных физических свойств и констант, что не обязывает пользователя к глубоким познаниям сложных уравнений математической физики.

1.3. Анализ технического задания, обзор аналогов и выбор метода моделирования распространения ультразвуковых волн применительно к интеллектуальному датчику давления

В данной работе требуется решить задачу распространения ультразвуковых волн в корпусе датчика давления, причем датчик давления представляет собой так

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						15
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

называемое интеллектуальное средство измерения (согласно ГОСТ Р 8.734-2011 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные»).

Исходными данными к техническому заданию, а также аналогом служит патент №2014102137/28 от 10.09.2014 года. На рисунке 1.6 представлен вид датчика давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля.

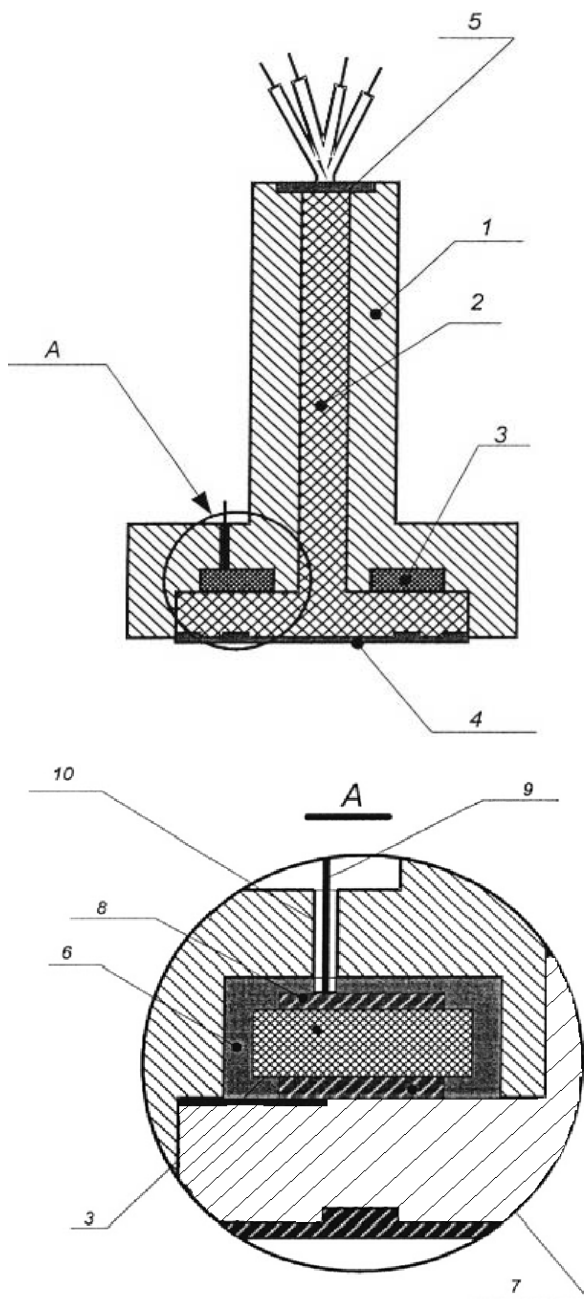


Рисунок 1.6 – Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		16

Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля содержит корпус 1, разделительную 4 и измерительную диафрагму 5, соединенные полостью 2, заполненной малосжимаемой жидкостью. В корпусе 1 напротив разделительной диафрагмы 4 в кольцевой паз 6 помещено пьезокерамическое кольцо 3. Кольцевой паз 6 является частью полости 2. Пьезокерамическое кольцо 3 выполнено с металлизированными верхними и нижними поверхностями, играющими роль электродов, при этом нижний электрод 7 соединен с корпусом датчика 1. На верхний электрод 8 подается напряжение по проводнику 9, размещенному в отверстии 10 корпуса 1, которое заполненное компаундом.

Принцип действия заключается в дополнительном контроле состояния датчика давления посредством возбуждения импульсов давления во внутренней полости датчика с помощью пьезокерамического кольца в специальном кольцевом пазу и контролю реакции датчика на возбуждаемый импульс при снятии сигнала с тензометрического преобразователя.

В основе лежит метод самодиагностики, который заключается в том, что перед непосредственной эксплуатацией датчика давления, проводится дополнительная его характеристика, а именно при строго определенных условиях снимают опорные значения собственных частот датчика. При наступлении срока поверки тем же образом снимают значения собственных частот и происходит сравнение их с опорными частотами. Структурная схема метода самодиагностики представлена на рисунке 1.7.

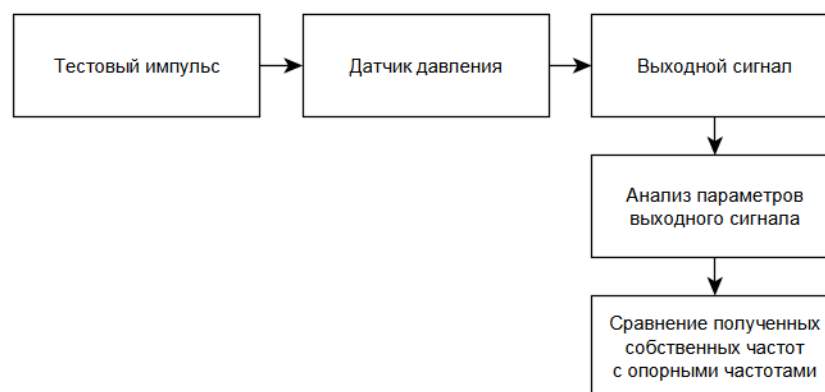


Рисунок 1.7 – Структурная схема метода самодиагностики

В данной работе необходимо применить исходный метод самодиагностики к измерительному блоку датчика давления Метран-150 ТG/ТА (Рисунок 1.8).

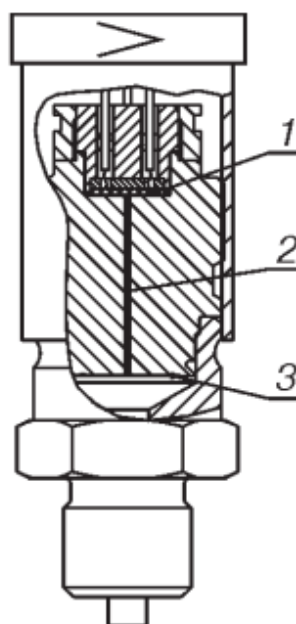


Рисунок 1.8 – Измерительный блок датчика давления Метран-150 ТG/ТА

Принцип действия заключается в том, что в данных измерительных блоках Метран-150 ТG/ТА используется тензорезистивный тензомодуль на кремниевой подложке Rosemount. Чувствительным элементом тензомодуля является пластина 1 из кремния с пленочными тензорезисторами (структура КНК – кремний на кремнии). Давление через разделительную мембрану 3 и разделительную жидкость 2 передается на чувствительный элемент тензомодуля. Воздействие давления вызывает изменение положения чувствительного элемента, при этом изменяется электрическое сопротивление его тензорезисторов, что приводит к разбалансу мостовой схемы [10].

Возможная проблема применения метода самодиагностики к измерительному блоку датчика давления Метран-150 ТG/ТА является неопределенность положения пьезокерамического кольца в корпусе измерительного блока.

Для решения той проблемы необходимо:

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						18
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

- 1) разработать 3D-модель измерительного блока датчика давления Метран-150 TG/TA;
- 2) провести моделирование процессов, происходящих внутри измерительного блока при реализации применяемого метода самодиагностики;
- 3) на основе моделирования определить положение пьезокольца в корпусе измерительного блока и разработать на основе этого конструкторскую документацию к улучшенному измерительному блоку датчика давления Метран-150 TG/TA.

Основываясь на том, что метод самодиагностики подразумевает подачу высокочастотного ультразвукового импульса через пьезокерамическое кольцо в корпусе, можно сказать, что наиболее оптимальным методом моделирования распространения ультразвуковых волн будет реализация метода конечных элементов при решении задачи распространения акустических давлений в программной среде ANSYS, который был рассмотрен в п. 1.2.

Превосходства данного метода перед другими является то, что коэффициенты дифференциальных уравнений задаются в виде понятных физических свойств и констант, что не обязывает пользователя к глубоким познаниям сложных уравнений математической физики, а также, в случае изменений в конструкции измерительного блока датчика, возможность экспорта файла 3D-модели в среду ANSYS из более удобной среды проектирования, например, Компас-3D.

Для физических испытаний и проведения экспериментов необходимо разработать лабораторный стенд, который позволит, во-первых, проверить и сопоставить полученную модель пьезокольца с реальным пьезокерамическим кольцом, используемом в представленном аналоге, а, во-вторых, позволит в дальнейшем использовать лабораторный стенд для характеристики параметров интеллектуальных средств измерений. Структурная схема лабораторного стенда представлено на рисунке 1.9.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						19
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

2. РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В КОРПУСЕ ДАТЧИКА

2.1. Постановка задачи

В данной главе необходимо разработать 3D-модель измерительного блока датчика давления в среде проектирования КОМПАС-3D с ее номинальными размерами, провести моделирование распространения ультразвука в программном пакете ANSYS. Промоделировать работу пьезокерамического излучателя в виде кольца, для определения его собственных частот и АЧХ, что в последующем станет критерием соответствия модели реальной конструкции преобразователя, также смоделировать работу измерительного блока датчика давления Метран-150 с измененной улучшенной конструкцией с пьезокерамическим кольцом внутри, построить диаграмму направленности излучателя. По итогам моделирования разработать улучшенную конструкцию измерительного блока и комплект конструкторской документации.

2.2. Разработка 3D-модели измерительного блока датчика давления

В исходной конструкции измерительного блока датчика давления Метран-150 входит металлический корпус с измерительным каналом заполненным несжимаемой жидкостью. Соединение мембраны к корпусу осуществляется посредством сварочных работ (роликовая сварка), причем диаметр мембраны меньше чем диаметр основания корпуса датчика. Передача давления осуществляется через мембрану и измерительный канал, затем поступает на чувствительный элемент тензомодуля. Также в корпусе имеется керамический гаситель резких скачков давлений. Рисунок исходной конструкции измерительного блока датчика давления Метран-150 представлен на рисунке 2.1.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР</i>	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

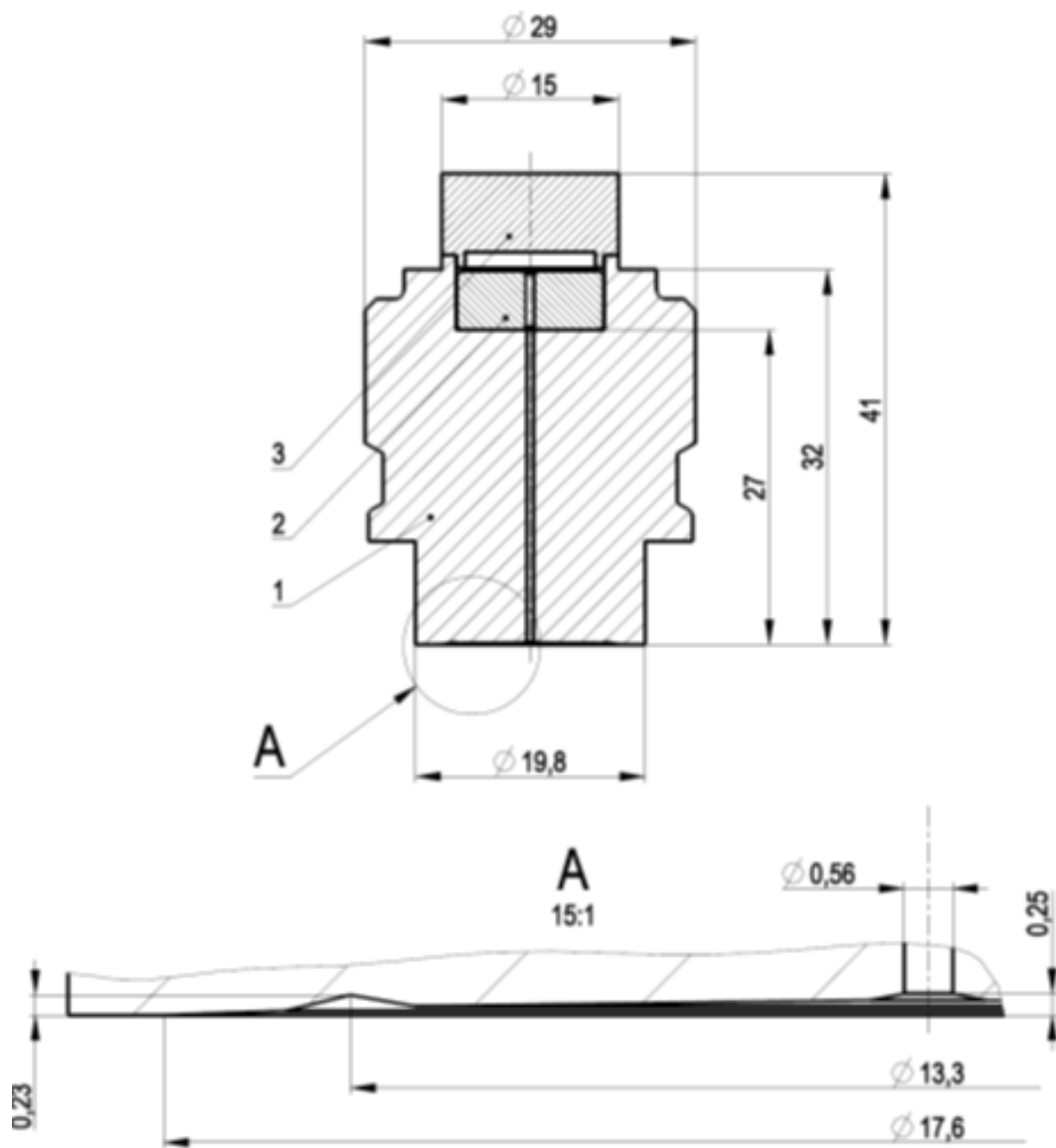


Рисунок 2.1 – Исходная конструкция измерительного блока датчика давления Метран-150

Исходная конструкция измерительного блока датчика давления Метран-150 (Рисунок 2.1) состоит из 1 – корпус измерительного блока; 2 – керамический гаситель резких давлений; 3 – тензорезистивный тензомодуль на кремниевой подложке Rosemount (структура КНК – кремний на кремнии). На рисунке также представлены геометрические параметры мембраны.

Материалы, из которых изготовлены элементы конструкции измерительного блока представлены в таблице 1.

									Лист
									22
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР				

Таблица 1 – Материалы элементов конструкции

Элемент конструкции	Материал
Корпус	Сталь SST316
Керамический гаситель резких давлений	Техническая керамика
Тензорезистивный тензомодуль Rosemount	Сталь SST316
Мембрана	Сталь 316L/Hastelloy C-276
Жидкость измерительного канала	Silicone DC200 industrial /inert FC-43, 3M

На основании исходного чертежа была реализована 3D-модель в пакете проектирования Компас-3D, модель представлена на рисунке 2.2.

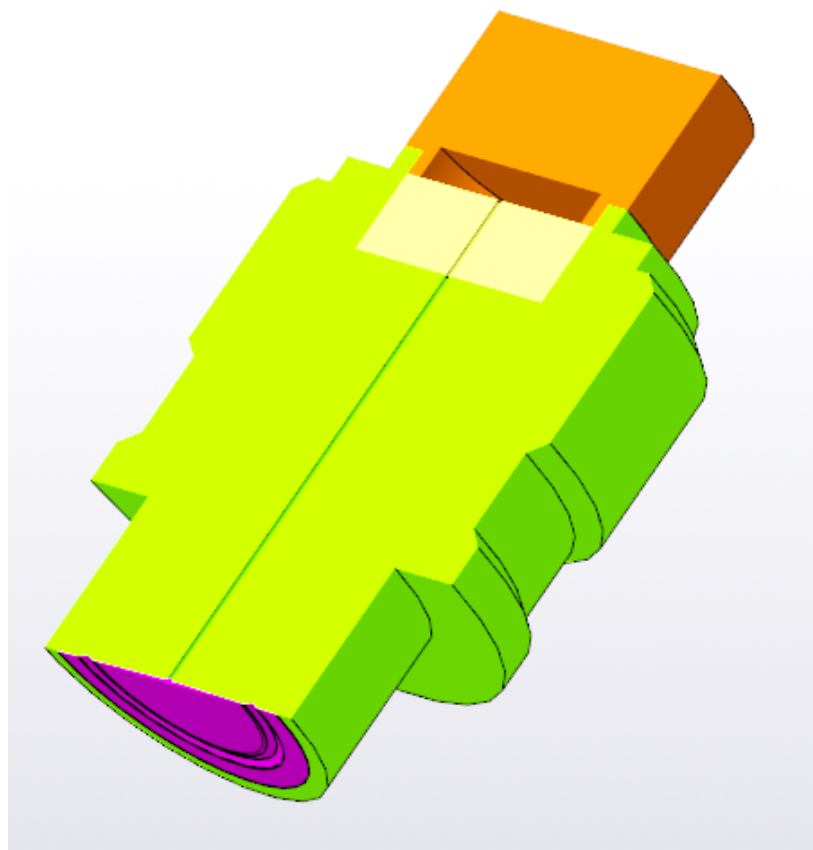


Рисунок 2.2 – 3D- модель измерительного блока датчика давления Метран-150

2.3. Моделирование распространения ультразвуковых волн в корпусе датчика

Моделирование распространения ультразвука в задаче диагностики состояния датчика давления, сводится к следующему:

1. Моделирование излучателя в виде пьезокерамического кольца (при моделировании необходимо доказать, что модель соответствует действительности, критерием являются собственные частоты реального кольца и модели, либо их АЧХ).

2. Построение диаграммы направленности излучателя, моделирование распространения ультразвуковых волн непосредственно в корпусе датчика(?), моделирование распределения акустических давлений в корпусе датчика, моделирования реакции разделительной мембраны датчика на излучение кольца.

2.3.1. Моделирование кольца-излучателя

Действие пьезокерамического излучателя основано на явлении обратного пьезоэффекта, который заключается в изменении формы пьезоэлектрического вещества при приложении к нему напряжения.

Конструктивно пьезоизлучатель представляет из себя пьезокерамику с нанесенными электродами. Пьезоизлучатели могут быть разнообразной формы: в виде дисков, колец, трубок, пластин, сфер и др [11].

Связь между приложенным напряжением и механической деформацией зависит от пьезоэлектрических свойств пьезокерамики, размера и форм образца, направления электрического возбуждения [12].

Для определения направлений в пьезокерамическом элементе используются три оси [13]. Эти оси, называемые 1, 2 и 3, аналогичны X, Y и Z классического трехмерного ортогонального набора осей (Рисунок 2.3).

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						24
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

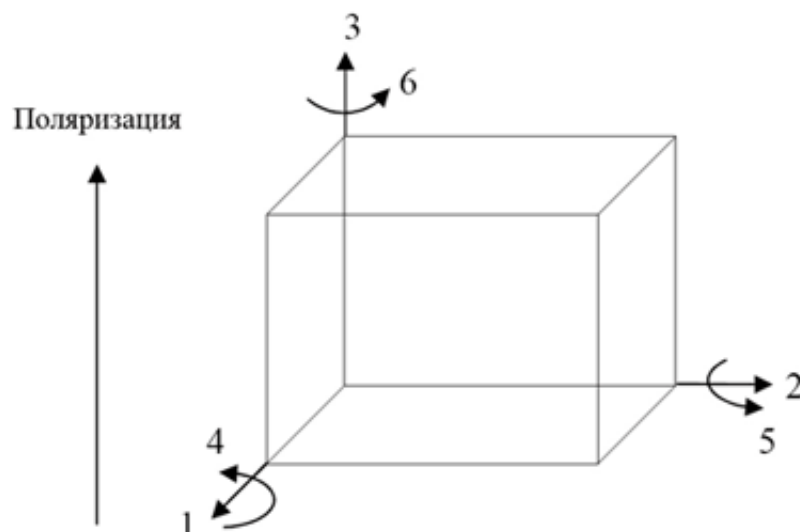


Рисунок 2.3 – Направление и ориентация осей пьезоэлектрического материала

Для задания электромеханических свойств пьезокерамики в ANSYS используются следующие величины:

- плотность;
- упругие жесткости c_{ij} ;
- пьезоэлектрические константы e_{ij} ;
- относительные диэлектрические проницаемости ϵ_{ij}/ϵ_0 .

Упругие жесткости определяют величину деформации, возникающей под воздействием приложенного механического напряжения. Первая нижняя цифра показывает направление деформации, вторая – направление механического напряжения.

Пьезоэлектрические константы определяют величину деформации, возникающей под воздействием приложенного электрического напряжения. Константа e_{33} характеризует сжатие/растяжение вдоль оси поляризации. Константа e_{31} характеризует сжатие/растяжение перпендикулярно оси поляризации. Константа e_{15} характеризует сдвиговую деформацию перпендикулярно оси поляризации.

Относительные диэлектрические постоянные являются отношением диэлектрической проницаемости материала к диэлектрической проницаемости

вакуума (ϵ_0). Первый нижний индекс показывает направление диэлектрического смещения, а второй – направление электрического поля.

В качестве материала изготовления пьезокерамического кольца была выбрана распространенная марка пьезокерамики ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца).

Для задания свойств пьезокерамики в ANSYS применялось расширение Piezoelectric and MEMS (пьезоэлектрика и микроэлектромеханические системы). В моделируемом излучателе электроды расположены на верхней и нижней грани кольца. Модель пьезокерамического кольца в ANSYS с указанием электродов представлена на рисунке 2.4.

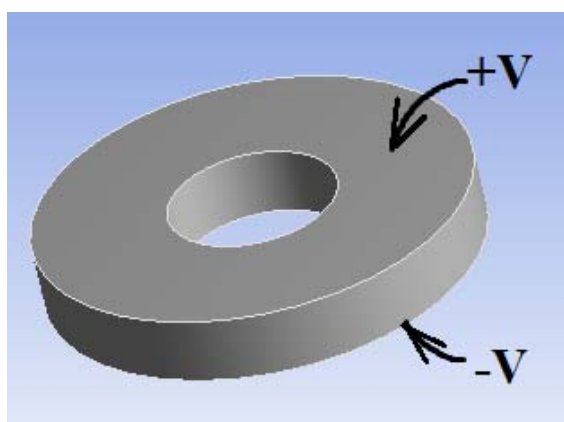


Рисунок 2.4 – Модель пьезокерамического кольца

2.3.2 Моделирование картины излучения пьезокерамического кольца

Была построена конечноэлементная сетка для моделирования пьезокерамического кольца, она представлена на рисунке 2.5.

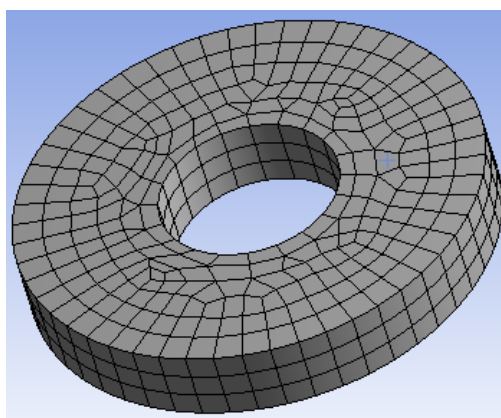


Рисунок 2.5 – Конечноэлементная сетка пьезокольца

Шаг сетки (размер элемента) составляет 0,8 мм. Количество узлов сетки при таком шаге составляет 4338, количество элементов – 795.

Для решения задачи самодиагностики технического состояния датчика давления (а конкретно разделительной мембраны, как самой уязвимой части датчика) по анализу собственных частот его конструкции, необходимо знать амплитудно-частотную характеристику преобразователя. Амплитудно-частотная характеристика смоделированного пьезоизлучателя представлена на рисунке 2.6.

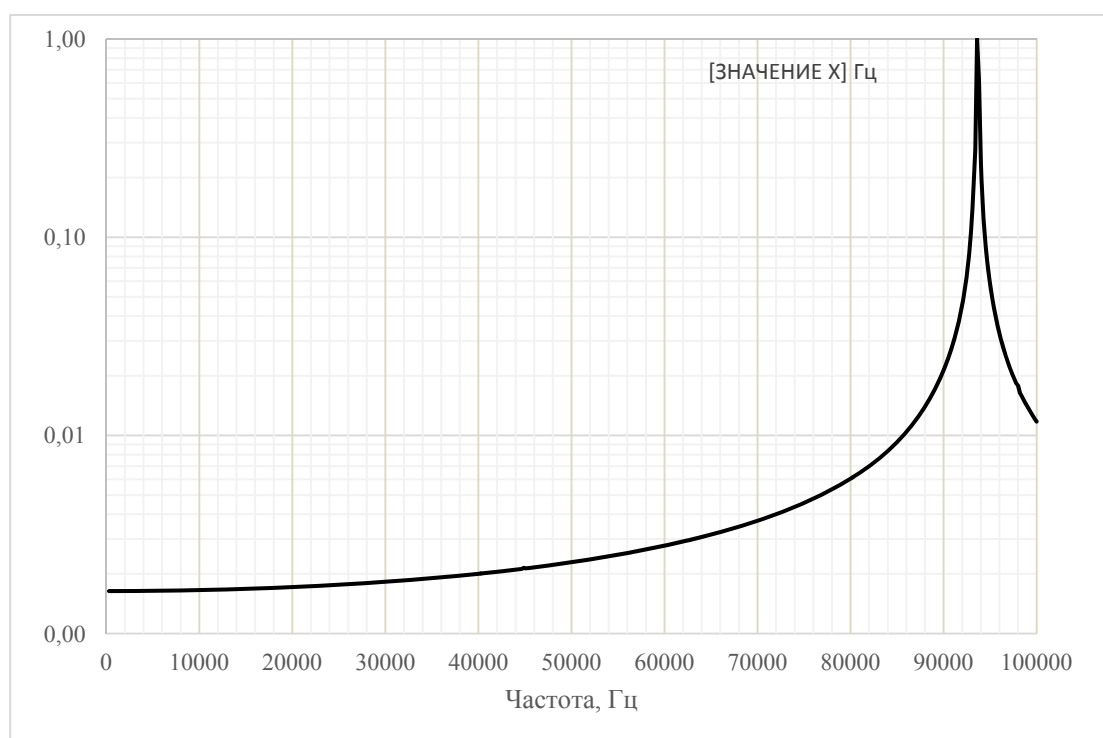


Рисунок 2.6 – Амплитудно-частотная характеристика пьезоизлучателя

По полученной АЧХ можно осуществить коррекцию спектра отклика на тестовый импульс в области резонансной частоты.

Форма колебаний на резонансной частоте кольца представлена на рисунке на рисунке 2.7. Из рисунка видно, что преимущественной деформацией на данной частоте является радиальное сжатие-растяжение.

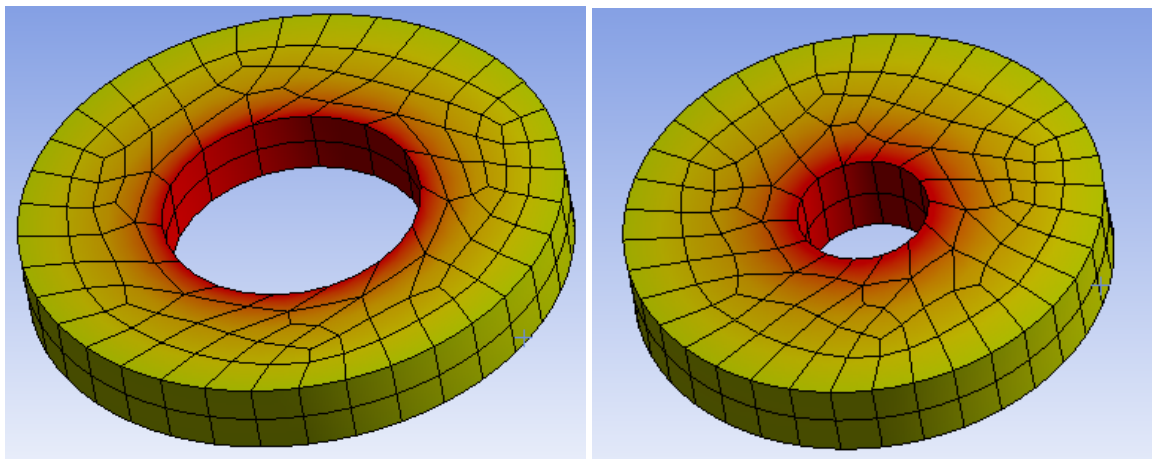


Рисунок 2.7 – Форма колебаний кольца на резонансной частоте

Если говорить о моделировании распространения звуковых колебаний от излучателя в окружающей его среде, то хорошим методом описания и визуализации таких колебаний является анализ распределения акустических давлений, вызванных излучением в пространстве.

Мгновенное значение звукового давления в точке среды изменяется как со временем, так и при переходе к другим точкам среды, поэтому практический интерес представляет среднеквадратичное значение данной величины:

$$I = \frac{\langle p^2 \rangle_t}{Z_{уд}}$$

где I – интенсивность звука, Вт/м²;

p – звуковое давление, Па;

$Z_{уд}$ – удельное акустическое сопротивление среды, Па · с/м.

Также для измерения звукового давления используется такая величина, как уровень звукового давления, измеряющаяся в децибелах.

Пьезокерамическое кольцо, помещенное в трехмерную систему координат, представлено на рисунке 2.8.

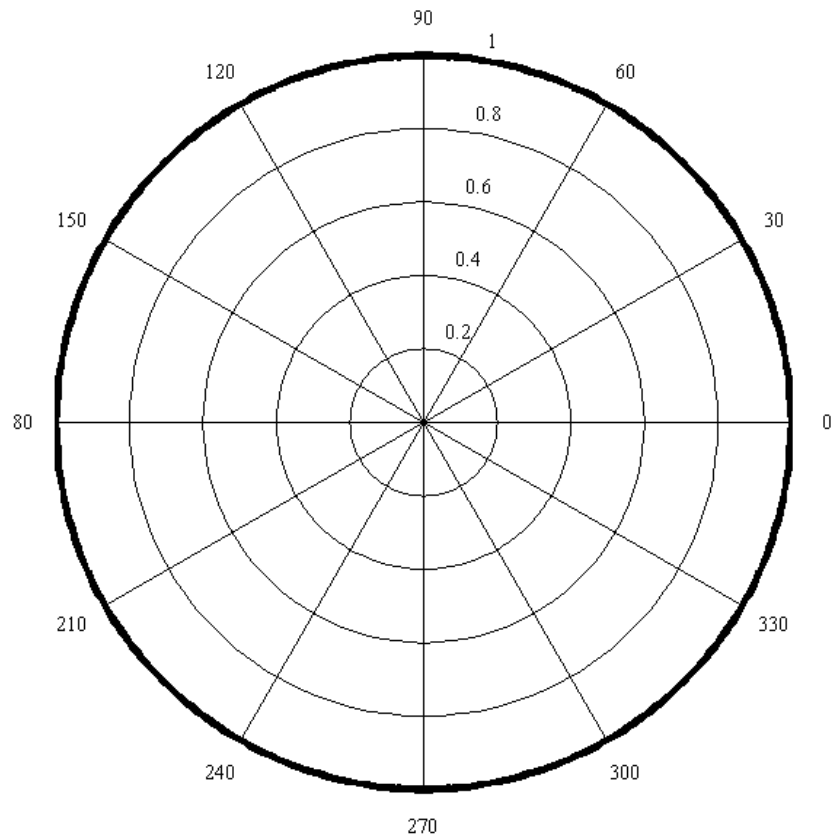


Рисунок 2.9 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XY

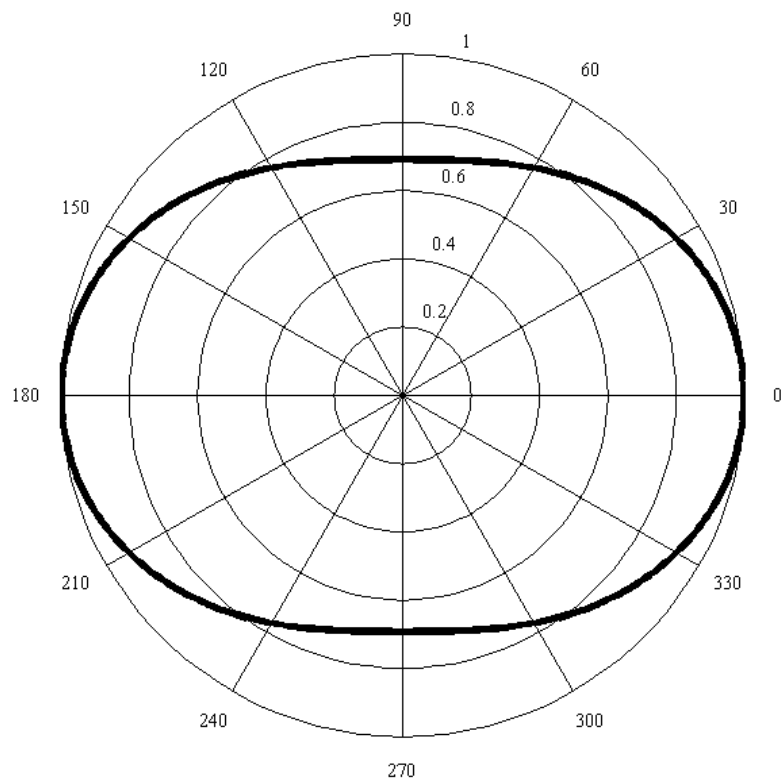


Рисунок 2.10 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XZ на частоте 30 кГц

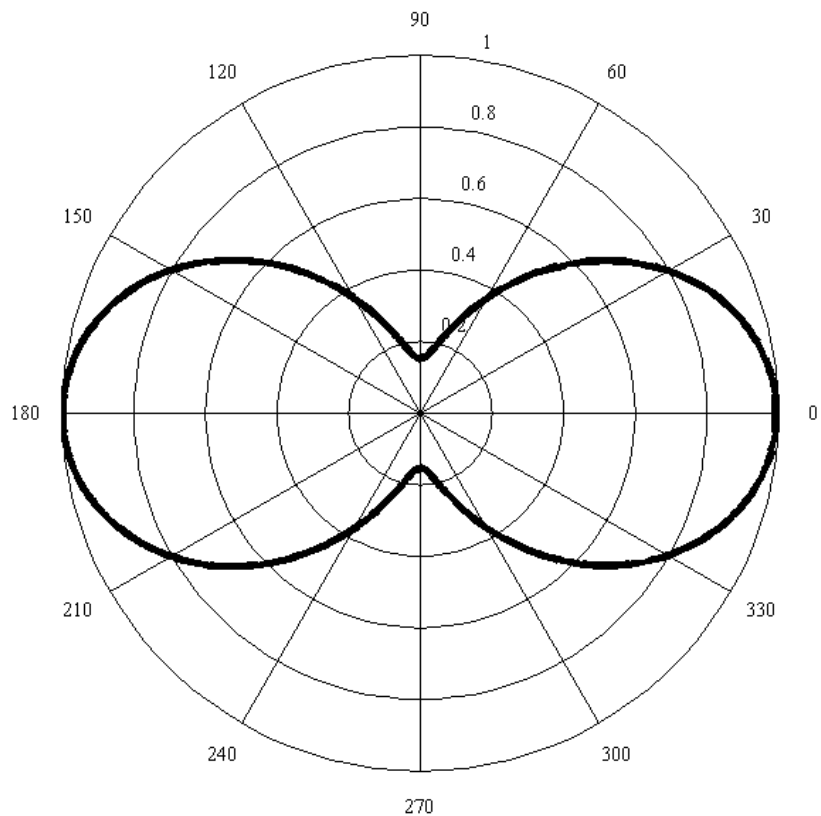


Рисунок 2.11 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XZ на частоте 50 кГц

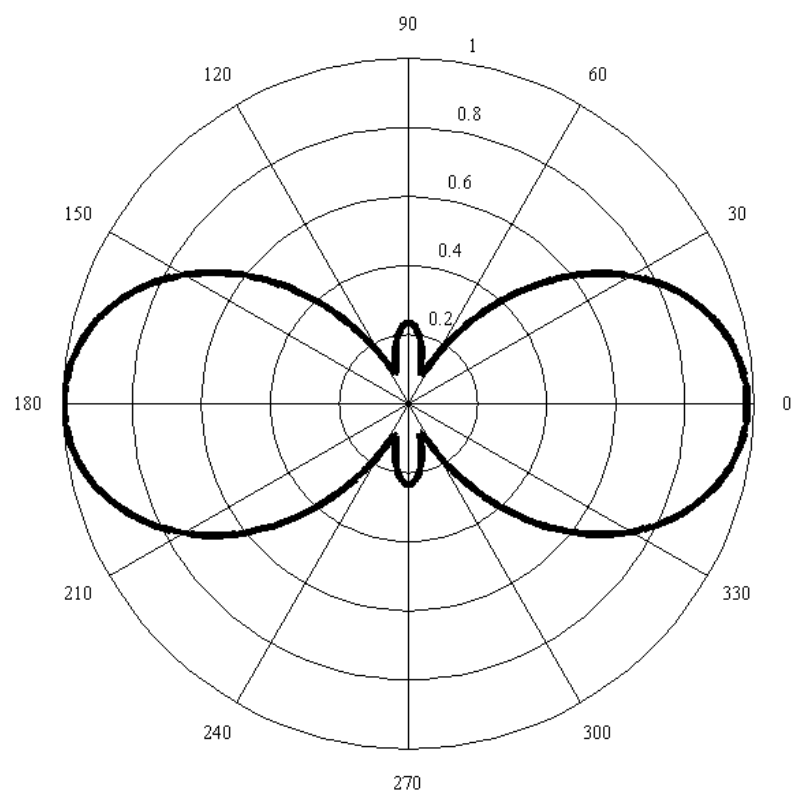


Рисунок 2.12 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XZ на частоте 70 кГц

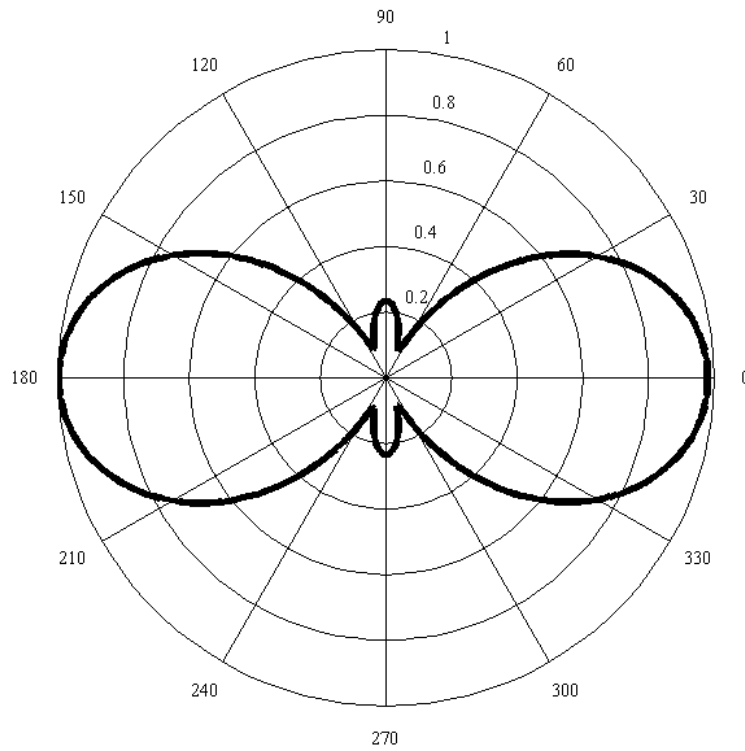


Рисунок 2.13 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XZ на частоте 90 кГц

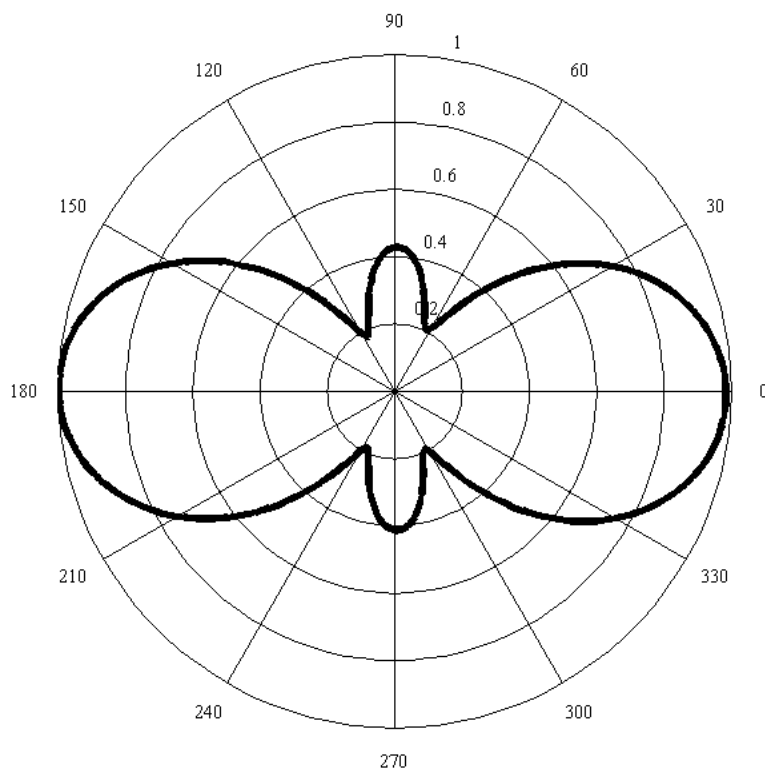


Рисунок 2.14 – Диаграмма направленности излучателя в плоскости XZ на частоте 93,6 кГц (главная резонансная частота)

Как видно из рисунков 2.9 – 2.14, излучение кольца на всем диапазоне рассматриваемых частот сконцентрировано в плоскости XY. Таким образом, было выбрано оптимальное с точки зрения интенсивности звукового излучения расположения кольца в корпусе датчика – это расположение кольца боковой поверхностью, обращенной к мембране.

2.4. Разработка конструкторской документации на основании моделирования

На основании проведенного моделирования можно утверждать, что измененная конструкция корпуса измерительного блок датчика давления Метран-150 имеет право на существование. Метод самодиагностики, приведенный в патенте 145163, приведенном в качестве аналога в п.1.3 может быть применен к измерительному блоку, на основании этого предложена именная конструкция, имеющая следующие отличия от исходной: изменена нижняя часть основания измерительного блока, в которой сделан паз по пьезокерамическое кольцо и отверстие под вывод проводов к электродам кольца.

На рисунке 2.15 представлен вид измененной конструкции измерительного блока датчика давления Метран-150.

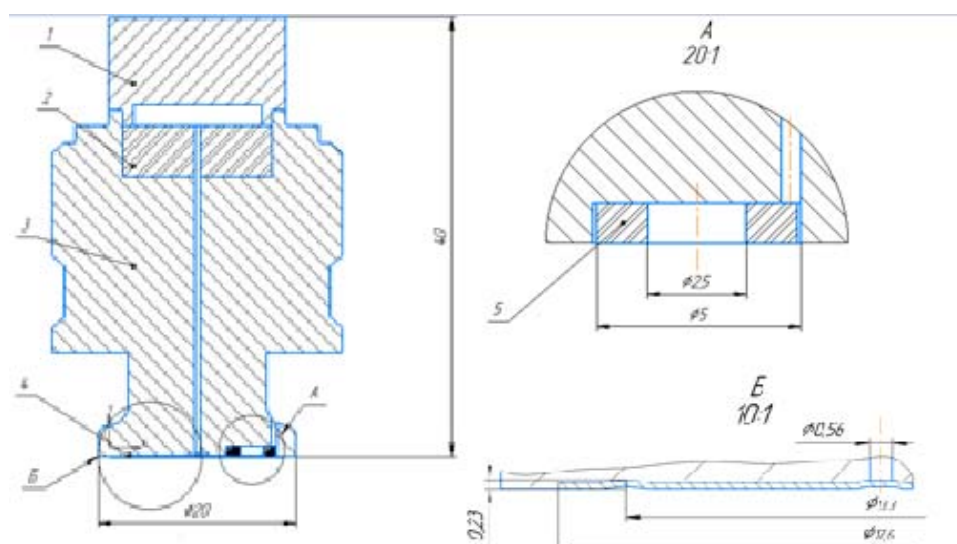


Рисунок 2.15– Вид измененной конструкции измерительного блока датчика давления Метран-150

Вид измененной конструкции измерительного блока датчика давления Метран-150 (Рисунок 2.15) содержит: 1 – тензорезистивный тензомодуль на кремниевой подложке Rosemount (структура КНК – кремний на кремнии); 2 – керамический глушитель резких давлений; 3 – измененный корпус измерительного блока.

Спецификация на сборочный чертеж измерительного блока датчика давления Метран-150, сборочный чертеж и рабочий чертеж измененного корпуса измерительного блока представлен в приложении А.

Вывод по разделу 2: в данной главе была разработана 3D-модель измерительного блока датчика давления в среде проектирования КОМПАС-3D с ее номинальными размерами, проведено моделирование распространения ультразвука в программном пакете ANSYS. Про моделирована работа пьезокерамического излучателя в виде кольца, для определения его собственных частот и АЧХ, что в последующем станет критерием соответствия модели реальной конструкции преобразователя, также смоделирована работа измерительного блока датчика давления Метран-150 с измененной конструкцией с пьезокерамическим кольцом внутри, построена диаграмма направленности излучателя. По итогам моделирования разработана измененная конструкция измерительного блока и комплект конструкторской документации.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						34
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

3. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

3.1. Постановка задачи

В данной главе необходимо разработать лабораторный стенд для исследования характеристик пьезокерамического излучателя и измерительного блока датчика давления Метран-150. Проектирование осуществляется по структурной схеме, представленной в п.1.3. Реализация системы сбора и обработки информации будет осуществляться в среде программирования Matlab. Также необходимо разработать графический интерфейс для удобства использования оператором.

Автоматизация процесса измерения – необходимая часть исследовательской работы в современной науке. Автоматизация действий исследователя решает такие вопросы как:

- оптимизация работы исследователя;
- накопление статических данных за сравнительно малый промежуток времени;
- быстрое изменение программы эксперимента в зависимости от цели исследования и т.д.

Благодаря наличию персональных компьютеров, различных модулей связи между измерительными устройствами и устройствами управления с портами компьютера стало возможно наличие лабораторных испытательных стендов.

Наличие таких лабораторных испытательных стендов в процессе измерений позволяет эффективно собирать и хранить, также обрабатывать информацию в большом количестве за сравнительно малый промежуток времени.

Существует большое множество видов автоматизированных систем в различных областях проведения экспериментов и исследований, все они имеют общие принципы, направленные на оптимизацию эксперимента:

- быстрое получение информации и дальнейшая ее обработка;
- повышенная надежность, безотказная работа в течение длительного времени;
- удобство эксплуатации для оператора, использование стандартных блоков;

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						35
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

- обращения оператора с системой посредством диалогового окна;
- гибкость системы, позволяющая подстраиваться под разные цели эксперимента.

Исследовательская работа, под которую разрабатывается лабораторный стенд, начинается с цели. Главной целью разработки лабораторного испытательного стенда является совмещение процессов измерения, сбора и обработки информации непосредственно на персональном компьютере. Особенностью разработки стенда на ранних этапах является то, что необходимо предусмотреть заменяемость частей и блоков лабораторного стенда. Наличие лабораторного исследовательского стенда позволяет сократить трудовые и материальные затраты и в особенности сократить срок проведения исследовательской работы, что в свою очередь позволяет существенно сократить время до получения результатов исследования.

Также необходимо обратить внимание на анализ устройств сопряжения, или так называемым протоколам связи между устройствами системы и персональным компьютером. Каждое устройство может иметь индивидуальный протокол связи, что в свою очередь обязывает разработчика выполнять программные алгоритмы в унифицированной среде программирования.

Целесообразно разделять данные, полученные в режиме реального времени с помощью лабораторного стенда, таким образом, чтобы часть из них использовалась в виде обратной связи на систему, а другая часть записывается в виде массивов на память устройства для дальнейшей статистической обработки.

3.2. Описание оборудования измерительного стенда

3.2.1. Осциллограф

Выходной сигнал с измерительного моста, вызванный импульсом давления, регистрируется помощью осциллографа TDS2002C. Данный осциллограф обладает функциями регулирования частоты дискретизации, квантования, задания количества отсчетов сигнала, а также позволяет сохранять данные на съемном носителе. Ниже приведены характеристики данного осциллографа.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						36
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

В данной работе использовался осциллограф модели Tektronix TDS2002C (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Осциллограф TDS2002C

Технические характеристики: [14]

- количество каналов – 2;
- полоса пропускания – 70 МГц;
- объем памяти – 2,5 тыс. точек на канал;
- интерфейсы: USB, GPIB.

В данной работе подключение осциллографа происходит по GPIB интерфейса в такой среде моделирования как Matlab (библиотека tmtool) на основе драйвера IVI. Осциллограф выполняет главную функцию в автоматизированном стенде, а именно, с помощью него, в среде Matlab осуществляется сбор данных с испытуемого устройства. Пример работы с программой Matlab представлен ниже.

3.2.1. Генератор импульсов

В данной работе использовался генератор модели PM8571 (Рисунок 3.2). Ниже приведены характеристики данного генератора.

										Лист
										37
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат						

- импульс: режим работы – одиночный, парный, задержанный, фиксированной скважности; период – 20 нс-10 с, разрешение 11 разрядов; длительность импульса: 8нс-10с, разрешение 10пс;
- сигналы произвольной формы: виды сигналов – синус, треугольник, меандр, пила, гаусс, шум, постоянное напряжение, $\sin(x)/x$;
- произвольная форма: частота дискретизации – 1,5Гц-250 МГц; память 1Мб;
- частотомер: диапазон частот 20 Гц – 100МГц; время отсчета – 100мкс-1сек; режим работы – частота, период, длительность импульса, число импульсов.

В данной работе генератор нужен для изменения характеристик входного сигнала, т.е. для того, чтобы изменять номинальные частоту, форму сигнала, его амплитуду. Это позволит наиболее полно исследовать испытуемый прибор с помощью автоматизированного стенда.

3.2.1. Источник питания

В данной работе использовался источник питания модели Agilent E3634A (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Источник питания Agilent E3634A

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		39

Технические характеристики: [16]

- общая мощность – 200Вт;
- амплитуда напряжения – 50В;
- число выходов – 1;
- количество диапазонов – 2;
- интерфейсы – GPIB и RS-232.

В данной работе источник питания нужен для обеспечения функционирования всей системы и гибкости режима работы цепи.

Для подключения в общую систему стенда использовался такой интерфейс как RS-232. При этом для подключения к ПК с целью управления источником питания использовали конвертер USB в RS-232 модели ICP-CON I-7561 (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Конвертер USB в RS-232 модели ICP-CON I-7561

3.3. Обеспечение обмена данными между основными элементами стенда и персональным компьютером через среду программирования MatLab

3.3.1. Подключение источника

Для подключения источника к ПК использовался RS-232 интерфейс, причем непосредственное подключение осуществлялось с помощью конвертера из USB в RS-232 модели ICP-CON I-7561. Отличительной особенностью RS-232 интерфейса

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	40
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

является наличие трех выводов, для чего и потребовался конвертер. После непосредственного подключения к ПК, использовалась библиотека tmtool среды Matlab и IVI драйвер. Для проверки правильности подключения использовалась программа COM Port Toolkit (Рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Программа COM Port Toolkit

3.3.2. Подключение генератора

Подключение генератора импульсов к ПК происходило с помощью LAN протокола путем синхронизации IP-адресов самого прибора (генератора) и исходного ПК. Для этого нужна вспомогательная программа Tabor Electronics devices via their GPIB & LAN ports) (Рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Программа Tabor Electronics devices via their GPIB & LAN ports

Для проверки правильности подключения использовалась программа ArbConnection, которая является официальным программным обеспечением производителя генератора импульсов PM8571 (Рисунок 3.7) [17].

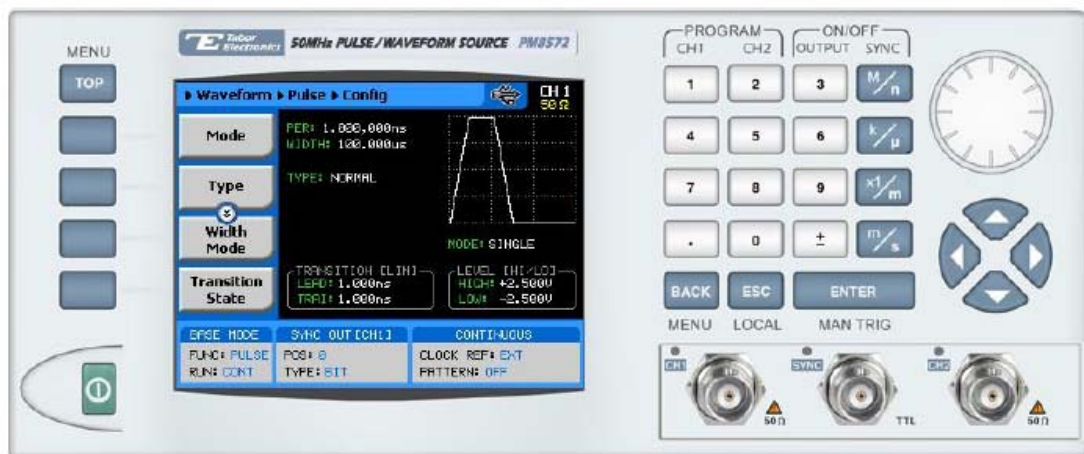


Рисунок 3.7 – Интерфейс программы ArbConnection

3.3.3. Подключение осциллографа

Подключение осциллографа осуществлялось с помощью USB-интерфейса, проводилось полностью за счет IVI-драйвера и библиотеки tmtool среды Matlab (Рисунок 3.8).

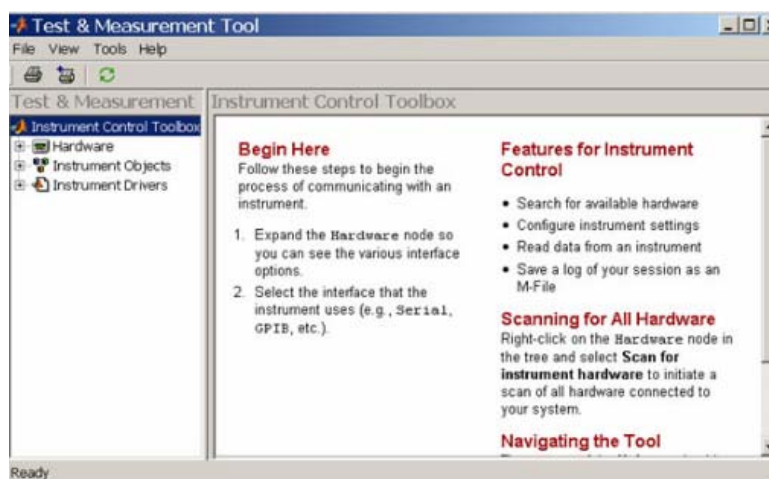


Рисунок 3.8 – Библиотека tmtool среды программирования Matlab

Контроль правильности подключения осуществлялся в рабочем пространстве Matlab с помощью Manual Programmer [18], также с помощью библиотеки tmtool было проверено подключение генератора.

3.4. Разработка программного обеспечения для стенда измерения давления в среде MATLAB

Для достижения поставленной цели, а именно: автоматическая обработка регистрируемого сигнала; разработка программного алгоритма для получения спектральных оценок сигнала; обеспечение статической обработки данных, – необходимо определенным образом согласовать компоненты лабораторного стенда компьютером.

При решении поставленных задач использовался протокол связи VISA. Данный протокол является совокупностью правил, которые регламентируют обмен информацией между различными блоками системы и персональным компьютером, а также формат данного обмена информацией между ними.

Протокол VISA – стандарт на интерфейс ввода/вывода, согласно которому строятся все программные компоненты VXIplug&play. Разработкой VISA занимается компания National Instruments (Рисунок 3.9). Архитектура VISA стандартизирована в качестве открытого промышленного стандарта систем VXIplug&play [19].



Рисунок 3.9 – Установка ПО NI-VISA

									Лист
									43
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР				

Данный протокол строится на модели аппаратно-ресурсной независимости. Данная модель представляет собой сочетание подхода «снизу-вверх» в отношении возможностей прибора и подхода «сверху-вниз» в отношении функционального представления у пользователя. Подход «снизу-вверх» фокусируется на индивидуальных возможностях приборов, связанных с интерфейсами всех типов, для того чтобы выявить все свойства разнотипных устройств. Подход «сверху-вниз» группирует свойства приборов таким образом, чтобы пользователи видели простой, удобный, знакомый интерфейс, но при необходимости предоставляющий доступ к более сложным функциям. Эта модель достигает независимости в её наиболее полном смысле – на уровне устройства, а не только на уровне интерфейса.

Управление непосредственно приборами осуществлялось с помощью языка SCPI, для каждого прибора в его инструкции существует перечень команд, которые позволяют установить тип передачи данных, переменную, которую необходимо изменить, размер данных и т.д.

Пример синтаксиса данного языка:

OUTPUT:SOUR:FUNC:SHAP SIN – команда меняет форму сигнала на генераторе на синусоиду.

Использование языка SCIP неудобно для автоматизированной системы ввиду его узкого применения. Поэтому при осуществлении программного алгоритма системы автоматизации была использована такая среда программирования как MatLab. Благодаря унификации этой программной среды и наличию специальных блоков, так называемых toolbox, используемых при решении множества различных узконаправленных задач, Matlab часто используют при автоматизации систем измерения.

При проектировании системы автоматизации измерений в виде лабораторного испытательного стенда в данной работе используется Instrument Control toolbox, предназначенный для взаимодействия с блоками стенда: осциллографом и функциональным генератором, непосредственно из Matlab (рисунок 3.10). Благодаря поддержке коммуникационных протоколов GPIB и VISA, становится

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						44
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

возможным обеспечить обмен данных между устройствами и компьютером. Таким образом, тулбокс позволяет как отправлять управляющие сигналы на устройства, так и принимать с них данные для последующего анализа и визуализации.

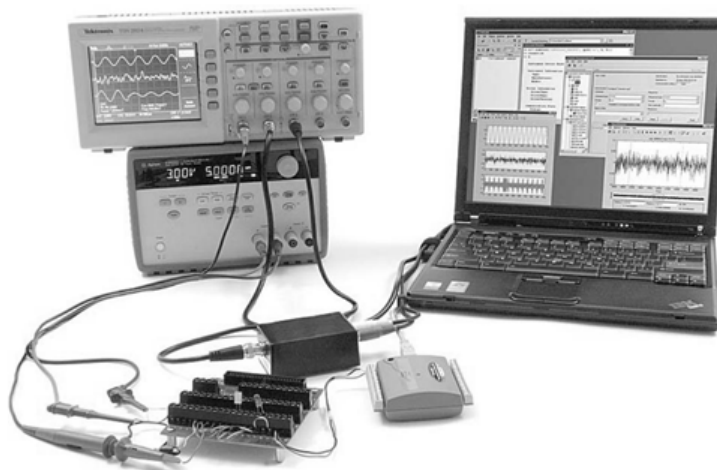


Рисунок 3.10 – Работа осциллографа с помощью Instrument Control toolbox

Данный тулбокс представляет собой совокупность программ и интерфейсов пользователя, обеспечивающих удобную работу с различными устройствами, соединенными с Matlab. Тулбокс поддерживает асинхронные операции, которые блокируют выполнение каких-либо действий во время обмена данными с устройством и синхронные, которые разрешают их выполнение.

Instrument Control toolbox предоставляет широкий набор функций для работы с устройствами. С помощью тулбокса можно, например, послать запрос на чтение с устройства или дистанционно изменять его конфигурацию. Преимуществом работы с тулбоксом является автоматическая генерация кода Matlab при его использовании.

С помощью Instrument Control Toolbox была написана программа, позволяющая полностью автоматизировать управление осциллографом. Это позволило осуществить сбор большого объема данных для последующего анализа.

Пример кода, сгенерированного библиотекой tmtool для генератора импульсов PM8571:

```
obj1 = instrfind('Type', 'tcpip', 'RemoteHost',  
'192.168.0.240', 'RemotePort', 23, 'Tag', '');
```

```

if isempty(obj1)
    obj1 = tcpip('192.168.0.240', 23);
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end

fopen(obj1);

```

Пример кода осциллографа, сгенерированного библиотекой tntool:

```

fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH1');
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 2');
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(obj1, 'DATA:STAR 1000');
%fprintf(obj1, 'DATA:STOP 1500');
%fprintf(obj1, 'WFMPre:NR_Pt');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YMULT');
%data2 = query(obj1, 'WFMPRE:YMULT?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
%data3 = query(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
%data4 = query(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
%data5 = query(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
data6 = query(obj1, 'CURVE?');

```

Для снятия показаний основным прибором является осциллограф. Ниже представлен код для снятия информации об изменении состояния испытываемого прибора (датчика).

```

N=512;    % кол-во точек
fs=50;   % частота дискретизации
Num=50;   % число реализаций, по которым идет усреднение

Y=zeros(1,N);
Yout=zeros(Num, N);    % для хранения выходного сигнала
системы(1 канал)
obj1 = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0699::0x03A1::C011437::0::INSTR', 'Tag', '');

if isempty(obj1)
    obj1 = visa('NI',
'USB0::0x0699::0x03A1::C011437::0::INSTR');
else

```

									Лист
									46
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР				

```

        fclose(obj1);
        obj1 = obj1(1)
end

fopen(obj1);

fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH1');
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 1');
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(obj1, 'DATA:STOP N');
fprintf(obj1, 'WFMPRE:YMULT');
data2 = query(obj1, 'WFMPRE:YMULT?');
fprintf(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
data3 = query(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
fprintf(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
data4 = query(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
fprintf(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
data5 = query(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
data6 = query(obj1, 'CURVE?');

Y=zeros(1,N);
YUNIT=zeros(1,N);
XUNIT=zeros(1,N);
Yout=zeros(1, N);

for i=1:Num
    %получаем осциллограмму с осциллографа
    %для выходного сигнала системы - первого канала
    [Youti, Xouti, YUNIT, XUNIT] = data6;
    Yout(i,1:N)=Youti;
    Y=Y+Youti;
end

```

Программа состоит из следующих блоков. Сначала происходит создание объекта VISA с помощью функции `instrfind()` и создание объекта `deviceObj`, ассоциированного с устройством. Задаются глобальные параметры, например, максимальный объем используемой памяти. Затем реализуется инициализация и первоначальная настройка осциллографа: задается начало сбора данных, количество собираемых данных, частота дискретизации. Далее задается квантование по уровню и частота пропускания каналов осциллографа. После этого иницируется запуск осциллографа с вышеописанными настройками. Применяется

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						47
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

режим синхронизации по переднему фронту входного импульса. Считывание отклика осуществляется посредством функции WaveForm, которая выполняет работу по принятию сигнала на компьютер, последующей обработке и представлению сигнала в виде переменной.

В заключительной части программы переменные обрабатываются при помощи алгоритмов спектрального оценивания, которые предполагают возможность статистической обработки больших массивов данных и их усреднение.

3.5. Разработка графического интерфейса для измерительного стенда

Для непосредственного создания графического интерфейса необходимо объединить сгенерированные в отдельности коды в один m-файл и отладить совместную работу трех приборов: источника питания, генератора и осциллографа.

В ходе работы был разработан следующий план выполнения данного условия:

1. Сначала задаем параметры работы источника, т.е. задаем амплитуду рабочего напряжения на источнике питания.
2. Устанавливаем частоту и тип сигнала на генераторе.
3. Снимаем осциллограмму с осциллографа.

3.5.1. Создание общего m-файла

При выполнении пунктов плана необходимо помнить, что приборы при генерации кода в m-файле являются объектами m-файла, поэтому необходимо каждому объекту дать свое имя, отличающееся от остальных.

Пусть источник будет иметь имя объекта ist, генератор – gen, а осциллограф – osc. Тогда вид общего m-файла будет выглядеть:

```
ist = instrfind('Type', 'serial', 'Port', 'COM4', 'Tag', '');  
  
if isempty(ist)  
    ist = serial('COM4');  
else  
    fclose(ist);  
    ist = ist(1)  
end  
fprintf(ist, 'VOLTagе 1');  
  
fopen(ist);  
instrfind
```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	48
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		


```

a2=str2num(data9);
a3=str2num(data10);
fclose(osc);
fclose(gen);
fclose(ist);

```

3.5.2. Разработка графического интерфейса

Графический интерфейс был создан на основе GUI. Программный пакет MATLAB включает в себя среду специализированную надстройку GUIDE для проектирования приложений к удобным графическим интерфейсом. Разработка в GUIDE удобна и проста, т.к. содержит такие элементы управления как кнопки, раскрывающиеся списки и т.д. Эти элементы помещаются в рабочее пространство с помощью мыши. Взаимодействие элементов GUI с человеком достигается за счет событий, возникновение которых происходит при обращении пользователя к этим элементам. При этом программирование таких событий облегчает автоматическая генерация кода. Среда разработки не накладывает ограничение на количество окон приложения и позволяет размещать в них графическую и текстовую информацию. GUIDE обладает широким спектром возможностей для создания стандартных диалоговых окон – таких как окна выбора шрифта, ввода данных, сохранения файла и пр.

Данный графический интерфейс будет состоять из двух блоков, команды для генератора и команды для осциллографа. В первом блоке должны задаваться такие параметры как амплитуда входного напряжения в вольтах, частота(Гц) и тип сигнала (синусоидальный, треугольный, миандр), а во втором должен отображаться график осциллограммы, который можно будет в дальнейшем сохранить или очистить. Вид графического интерфейса в среде GUIDE представлен на рисунке 3.11.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						50
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

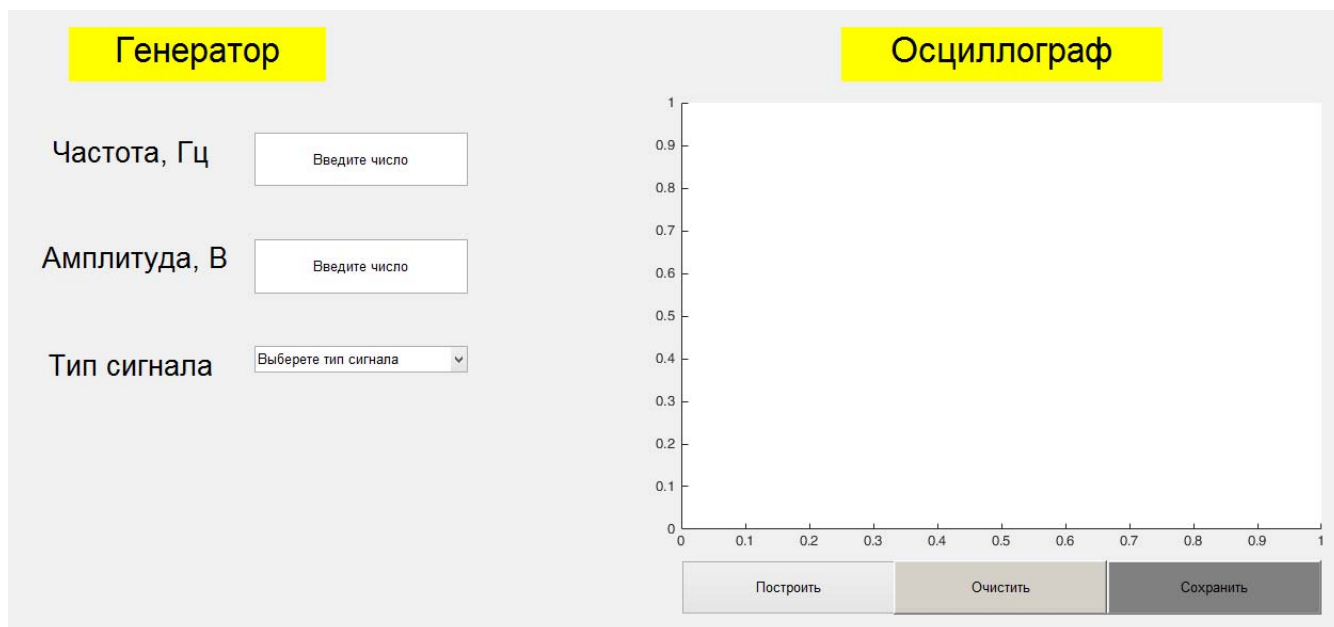


Рисунок 3.11 – Графический интерфейс

При создании в среде GUIDE данного интерфейса после его сохранения автоматически был сгенерирован код в отдельный m-файл с тем же именем, что и сам интерфейс.

Для того чтоб начать программировать все элементы интерфейса необходимо перенести код интерфейса в ранее созданный общий m-файл и начать программирование элементов интерфейса.

3.5.3. Программирование элементов интерфейса

Для начала, необходимо задать переменные, в которые бы передавались значения из блока интерфейса «Генератор» в код. Пусть для амплитуды будет переменная *amp*, для частоты – *frc*.

Тогда вид соответствующих функций для окон ввода будет выглядеть:

```
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles) % ВВОД АМПЛИТУДЫ
amp=get(hObject, 'String');
fprintf(gen, 'VOLTage amp')

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles) % ВВОД ЧАСТОТЫ
frc=get(hObject, 'String');
fprintf(gen, 'FREC frc')
```

Перейдем к программированию раскрывающегося списка. Перед программированием в параметрах списка были заданы исходные типы сигналов (Рисунок 3.12).

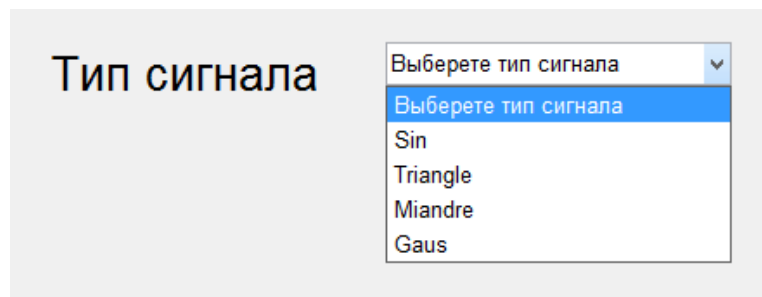


Рисунок 3.12 – Раскрывающийся список

Для программирования раскрывающегося списка будем использовать оператор `switch`. Тогда вид кода для раскрывающегося списка будет выглядеть:

```
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Определение номера выбранной строки
Num=get(hObject, 'Value');
Switch Num
case 1
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на sin
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP SIN');
case 2
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на triangle
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP TRI');
case 3
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на miandre
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP MIAN');
case 4
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на gaus
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP GAUS');
en
```

Итак, программирование блока «Генератор» закончено. Теперь пользователь может задавать частоту, амплитуду и тип сигнала на генераторе (Рисунок 3.13).

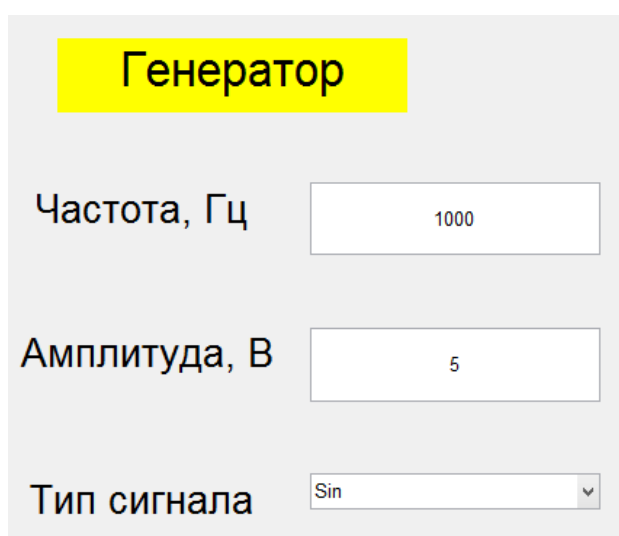


Рисунок 3.13 – Запрограммированный блок «Генератор»

Приступим к программированию блока «Осциллограф». Вид программного кода кнопок «Построить», «Очистить», «Сохранить» будет выглядеть:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Построить»
% получение осциллограммы
x=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);
fplot(x, kate);
grid on;
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Очистить»
cla % очистка осей
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Сохранить»
saveas(h, 'oscilloscope', 'jpg');
```

Полный код программы представлен в приложении Б.

Вывод по разделу 3: в данной главе разработан лабораторный стенд для исследования характеристик пьезокерамического излучателя и измерительного блока датчика давления Метран-150. Проектирование осуществлялось по структурной схеме, представленной в п.1.3. Реализация системы сбора и обработки информации осуществлялась в среде программирования Matlab. Также был разработан графический интерфейс с помощью встроенной библиотеки GUI Matlab для удобства использования оператором.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						53
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Постановка задачи

В ходе данной главы необходимо экспериментально определить АЧХ пьезокерамического излучателя в виде кольца с помощью собранного лабораторного стенда, подтвердив тем самым теоретическую модель, созданную в программном пакете ANSYS.

Благодаря наличию автоматизированного стенда процесс снятия экспериментальной ЧХ происходит значительно эффективней, что позволяет существенно уменьшить время обработки информации при решении данной задачи.

Определение АЧХ пьезокерамического кольца с помощью автоматизированного лабораторного стенда позволит расширить знания в области диагностики средств измерений, наличие автоматизированного стенда позволяет подробнее изучать характеристики так называемых средств измерений, а именно интеллектуальных датчиков давлений. В дальнейшем возможно экспериментальное определение АЧХ самих средств измерений.

4.2. Определение АЧХ пьезокерамического излучателя в виде кольца

Определение АЧХ кольца необходимо для того, чтобы знать, что кольцо в интересующем нас диапазоне частот не имеет локальных максимумов. Для этого проведем несколько опытов, следующего характера:

1. Излучатель-Гидрофон.
2. Излучатель-Кольцо.
3. Кольцо-Гидрофон.

При проведении данных опытов была собрана следующая установка, состоящая из Гидрофона, Кольца и Излучателя рисунок 4.1.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						54
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		



Рисунок 4.1 – Установка для нахождения АЧХ кольца

Получены АЧХ трех опытов, нормированный на максимальное значение АЧХ трех опытов представлен на рисунке 4.2.

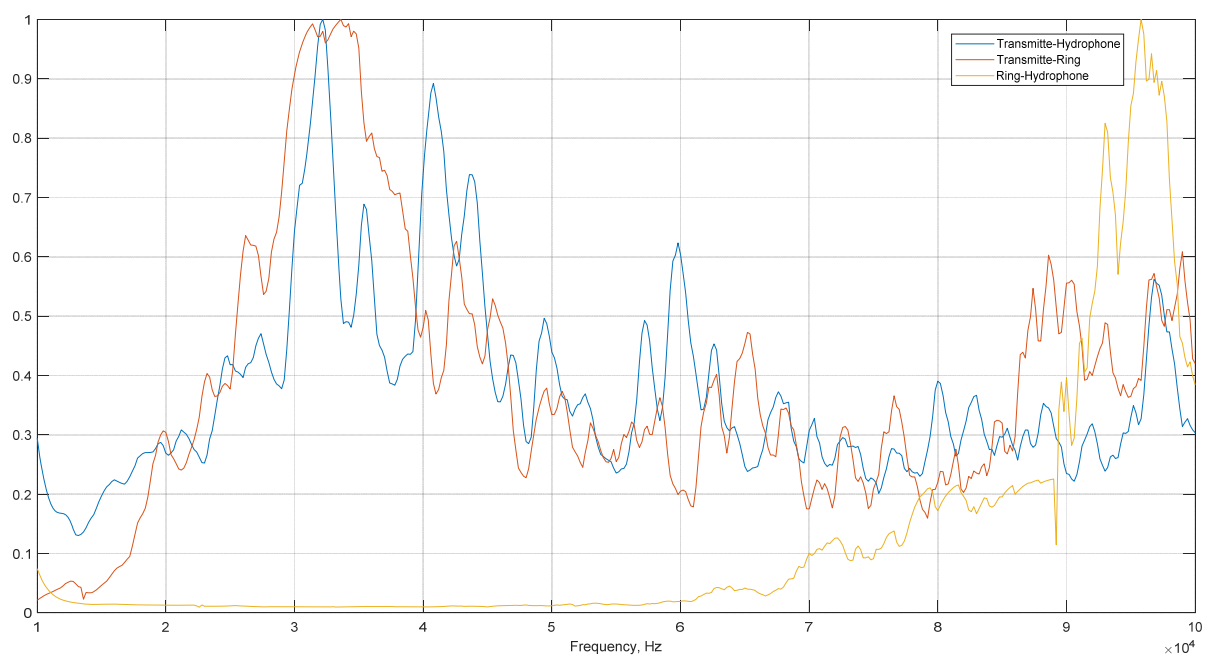


Рисунок 4.2 – Нормированный на максимальное значение АЧХ 3 опытов

Для нахождения АЧХ каждого элемента решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Y_1(f) = H_t(f) \cdot H_h(f) \\ Y_2(f) = H_t(f) \cdot H_r(f), \\ Y_3(f) = H_r(f) \cdot H_h(f) \end{cases} \quad (4.1)$$

где $H_t(f)$ – АЧХ излучателя;

$H_h(f)$ – АЧХ гидрофона;

$H_r(f)$ – АЧХ кольца.

Решим систему уравнений (4.1), получим АЧХ кольца, уравнение – (4.2), гидрофона, уравнение – (4.3) и излучателя, уравнение – (4.4).

$$H_r(f) = \sqrt{\frac{Y_3 \cdot Y_2}{Y_1}}, \quad (4.2)$$

$$H_h(f) = \sqrt{\frac{Y_3 \cdot Y_1}{Y_2}}, \quad (4.3)$$

$$H_t(f) = \sqrt{\frac{Y_2 \cdot Y_1}{Y_3}}. \quad (4.4)$$

На рисунке 4.3 представлен нормированная АЧХ кольца, излучателя и гидрофона.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						56
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

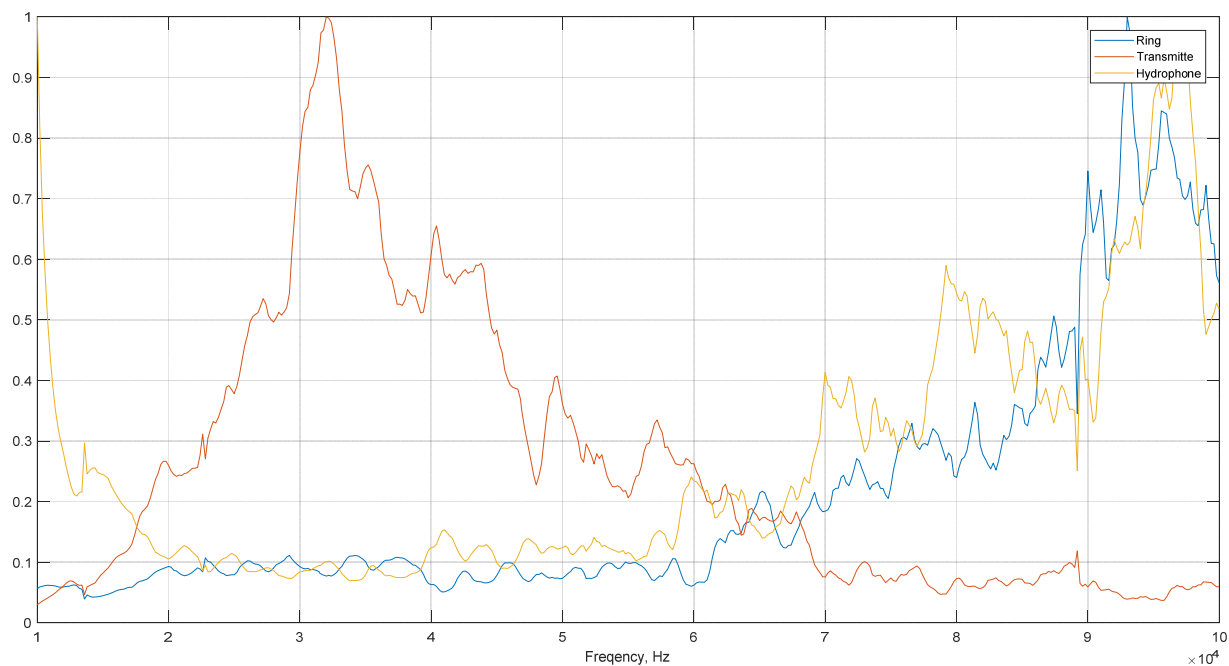


Рисунок 4.3 – Нормированный график АЧХ кольца, излучателя и гидрофона

Как видно из графика, АЧХ гидрофона и АЧХ кольца имеют похожую структуру. Если говорить об использовании кольца в качестве излучателя в самодиагностирующем датчике давления, на АЧХ датчика в исследуемом диапазоне частот от 10 до 60 кГц, кольцо не будет привносить существенного изменения частотных составляющих, т.е. в первом приближении АЧХ датчика можно считать АЧХ самого преобразователя давления.

Таким образом, по экспериментально найденной АЧХ можно корректировать параметры модели пьезокерамического кольца в программном пакете ANSYS.

Вывод по разделу 4: в ходе данной главы была экспериментально определена АЧХ пьезокерамического излучателя в виде кольца с помощью собранного лабораторного стенда, теоретическая модель излучателя, созданная в программном пакете ANSYS имеет похожий характер АЧХ, что и экспериментальная АЧХ (пик в диапазоне 90-95 кГц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен анализ современного подхода к моделированию распространения ультразвуковых волн в различных технических задачах, рассмотрены различные методы моделирования распространения ультразвуковых волн, проведен анализ технического задания на выпускную квалификационную работу, на основе выбранного аналога был предложен для реализации метод самодиагностики, был выбран метод моделирования распространения ультразвуковых волн в измерительном блоке датчика давления Метран-150 ТГ/ТА посредством акустических давлений, реализованных с помощью метода конечных элементов в программном пакете ANSYS.

Во второй главе была разработана 3D-модель измерительного блока датчика давления в среде проектирования КОМПАС-3D с ее номинальными размерами, проведено моделирование распространения ультразвука в программном пакете ANSYS. Промоделирована работа пьезокерамического излучателя в виде кольца, для определения его собственных частот и АЧХ, что в последующем станет критерием соответствия модели реальной конструкции преобразователя, также смоделирована работа измерительного блока датчика давления Метран-150 с измененной конструкцией с пьезокерамическим кольцом внутри, построена диаграмма направленности излучателя. По итогам моделирования разработана измененная конструкция измерительного блока и комплект конструкторской документации.

В третьей главе разработан лабораторный стенд для исследования характеристик пьезокерамического излучателя и измерительного блока датчика давления Метран-150. Проектирование осуществлялось по структурной схеме, представленной в п.1.3. Реализация системы сбора и обработки информации осуществлялось в среде программирования Matlab. Также был разработан графический интерфейс с помощью встроенной библиотеки GUI Matlab для удобства использования оператором.

В четвертой главе была экспериментально определена АЧХ пьезокерамического излучателя в виде кольца с помощью собранного

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						58
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

лабораторного стенда, теоретическая модель излучателя, созданная в программном пакете ANSYS имеет похожий характер АЧХ, что и экспериментальная АЧХ (пик в диапазоне 90-95 кГц).

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						59
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

2. Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля (патент на полезную модель): пат. 145163 Рос. Федерация; / Семенов А.С., Синицин В.В., Бушуев О.Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – №2014102137/28; заявл. 22.01.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25 – 2 с., 1 ил.

3. Зуев, Л.Б. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей / Л.Б. Зуев, В.Е. Целлермаер, В.В. Муравьев // Журнал технической физики. – 1997. – Вып.1. – №9(1). – С. 23-25.

4. Самокрутов, А.А. Исследование распространения ультразвука в слоистых композиционных материалах / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Вып. 1. – №1(2). – С. 45-51.

5. Римлянд, В.И. Численное моделирование распространения ультразвука в трубах / В.И. Римлянд, А.И. Южно // Современные инновации в науке и технике. – 2018. – Вып. 2. – №1(2). – С.198-200.

6. Драчев, К.А. Моделирование распространения ультразвука в модели металлической трубы / К.А. Драчев, В.И. Римлянд // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. – 2017. – Вып. 1. – №1(2). – С. 136-139.

7. Авдеев, Д.А. Моделирование распространения ультразвука в твердом теле / Д.А. Авдеев, В.И. Римлянд // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. – 2014. – Вып. 1. – №2(3). – С. 3-6.

8. Соломичева, С.В. Моделирование звукового поля пьезопреобразователя ультразвукового измерителя уровня жидкости в барабане котла / С.В. Соломичева, В.П. Тарасюк // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 1. – №4(53). – С. 35-43.

9. Белоконь, А.В. Моделирование пьезоизлучателей ультразвуковых волн с использованием программного комплекса ANSYS / А.В. Белоконь, А.В. Наседкин // Известия ТРТУ. – 1998. – Вып. 2. – №4(10). – С. 147-150.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						60
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

10. Датчик давления Метран-150. – <https://www.emerson.ru/documents>
11. Прилипко, Ю.С. Пьезокерамика для ультразвуковых преобразователей: технология и свойства / Ю.С. Прилипко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2015. – Вып. 2. – №11(12). – С. 27-33.
12. Смотряков, В.Г. Высокотемпературная пьезокерамика ЦСТ / В.Г. Смотряков, В.В. Еремкин, А.Г. Лутохин // Фундаментальные проблемы радиолектронного приборостроения. – 2018. – Вып. 2. – №2(3). – С. 384-387.
13. Теплых, А.А. Теоретический анализ распространения акустических волн в круглом цилиндрическом волноводе / А.А. Теплых, Б.В. Зайцев, И.Е. Кузнецова // Радиотехника. – 2015. – Вып. 2. – №10(11). – С. 93-101.
14. [taborelec.com](http://www.taborelec.com) [Электронный ресурс] // Model PM8571A URL: <http://www.taborelec.com/pm8571a>
15. [tequipment.net](http://www.tequipment.net) [Электронный ресурс] // Agilent E3634A 200W Power Supply. URL: <http://www.tequipment.net/AgilentE3634A.asp>
16. [taborelec.com](http://www.taborelec.com) [Электронный ресурс] // ArbConnecion URL: <http://www.taborelec.com/arbconnection>
17. sdphca.ucsd.edu [Электронный ресурс] // Manual Programming URL:http://sdphca.ucsd.edu/Lab_Equip_Manuals/tek_tds2000_programming_manual.pdf
18. matlab.exponenta.ru [Электронный ресурс] // Работа с MATLAB. URL: <http://matlab.exponenta.ru/matlab/default.php>
19. Бушуев, О. Ю. Автоматизация обработки данных при разработке лабораторного макета самодиагностирующегося датчика давления / О.Ю. Бушуев // Материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов. – 2011. – Т. 2, №1. – С. 94–97.
20. СТО ЮУрГУ ГОСТ 08-2008. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / сост. Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейшикова, В.И. Гусев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						61
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Спецификация. Сборочный чертеж. Чертеж корпуса

Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Масса ед, кг	Приме- чание
		<u>Документация</u>			
	ЮУрГУ - 12.03.01.2019.299.00.00 СБ	Измерительный блок датчика давления Метран-150			
		<u>Детали</u>			
1	ЮУрГУ - 12.03.01.2019.299.01.00	Корпус измерительного блока	1	0,12	
		<u>Стандартные изделия</u>			
2		Керамический датчик давления	1	0,015	
3		Тензорезистивный модуль на кремниевой подложке Rosemount	1	0,01	
4		Мембрана измерительного блока	1	0,003	
5		Пьезокерамическое кольцо ЦСТ-19	1	0,002	
ЮУрГУ - 12.03.01.2019.299.00.00 СБ					
Изм. Кол. Лист № док. Подп. Дата			Измерительный блок датчика давления Метран-150		
Разраб. Тугова Е.С. 27.05.19					
Провер. Бишиев О.Ю. 27.05.19			Стадия Лист Листов		
			п 1		
Н. контр. Лысова А.А. 27.05.19			ЮУрГУ		
Утв. Шестаков А.Л. 27.05.19			Кафедра ИНИТ		
Не для коммерческого использования			Копировал		
			Формат А4		

КОМПАС-3D v17.1 Учебная версия © 2017 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены.
Имя № папки: \Паша и дата: 27.05.2019 11:01:00

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						63
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						64
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг ПО лабораторного стенда

```
ist = instrfind('Type', 'serial', 'Port', 'COM4', 'Tag', '');

if isempty(ist)
    ist = serial('COM4');
else
    fclose(ist);
    ist = ist(1)
end
fprintf(ist, 'VOLTage 1');

fopen(ist);
instrfind

gen = instrfind('Type', 'tcpip', 'RemoteHost', '192.168.0.240', 'RemotePort', 23,
'Tag', '');

if isempty(gen)
    gen = tcpip('192.168.0.240', 23);
else
    fclose(gen);
    gen = gen (1)
end

fopen(gen);
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP SIN');
fprintf(gen, 'VOLTage 1');

pause(0.5);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

osc = instrfind('Type', 'tcpip', 'RemoteHost', '192.168.0.240', 'RemotePort', 23,
'Tag', '');

if isempty(osc)
    osc = tcpip('192.168.0.240', 23);
else
    fclose(osc);
    osc = osc(1)
end

n=20000; %количество точек с осциллографа
set(osc, 'InputBufferSize', 10*n); %опытным путем установленный параметр
InputBufferSize выделение памяти

fopen(osc);
fprintf(osc, 'DATA:SOU CH1');
fprintf(osc, 'DATA:WIDTH 2');
fprintf(osc, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(osc, 'DATA:STAR 0');
fprintf(osc, 'DATA:STOP 20000');
%fprintf(obj1, 'WFMPre:NR_Pt');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YMULT');
%data2 = query(obj1, 'WFMPRE:YMULT?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	65
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		


```

%data3 = query(obj1, 'WFMPRE:YZERO?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
%data4 = query(obj1, 'WFMPRE:YOFF?');
%fprintf(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
%data5 = query(obj1, 'WFMPRE:XINCR?');
data6 = query(osc, 'CURVE?');
%Y=zeros(1,N);
%YUNIT=zeros(1,N);
%XUNIT=zeros(1,N);
%Yout=zeros(1, N);
kate=str2num(data6)/3000;
%h=(b-a)/n;%шаг
x=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);
plot(x,kate);
grid;
%%получение осциллограммы с помощью цикла
data7 = query(osc, 'WFMP:XIN?');%%интервал измерения на графике по x
data8 = query(osc, 'WFMP:YMU1?');%%интервал измерения на графике по y
data9 = query(osc, 'WFMP:YOF?');%%конечные точки
data10 = query(osc, 'WFMP:XOF?');%%конечные точки
a1=str2num(data7);
a2=str2num(data9);
a3=str2num(data10);
function varargout = stend(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @stend_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @stend_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function stend_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = stend_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles) % ВВОД АМПЛИТУДЫ
amp=get(hObject,'String');
fprintf(gen, 'VOLTage amp')
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles) % ВВОД ЧАСТОТЫ
frc=get(hObject,'String');
fprintf(gen, 'FREC frc')
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	66
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Определение номера выбранной строки
Num=get(hObject, 'Value');
Switch Num
case 1
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на sin
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP SIN');
case 2
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на triangle
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP TRI');
case 3
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на miandre
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP MIAN');
case 4
%Выбрана первая строка, подаем команду переключить сигнал на генераторе на gaus
fprintf(gen, 'SOUR:FUNC:SHAP GAUS');
end

function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Построить»
% получение осциллограммы
x=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);
fplot(x,kate);
grid on;
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Очистить»
cla % очистка осей
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles) % кнопка «Сохранить»
saveas(h,'oscilloscope','jpg');

fclose(osc);
fclose(gen);
fclose(ist);

```

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 114299. КР	Лист
						67
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		