

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-измерительной техники

профессор

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.,

_____/ А.Л. Шестаков /

« ____ » _____ 2019 г.

Определение динамических характеристик преобразователя давления с помощью вибростенда

(наименование темы работы (проекта))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ-12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

Руководитель, доцент

_____/ О.Ю. Бушуев /

« ____ » _____ 2019 г.

Автор

студент группы КЭ – 463

_____/ А.В. Суворов /

« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Суворов А.В. Определение динамических характеристик преобразователя давления с помощью вибростенда. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-463, 2019, 66 с, 31 ил., библиографический список – 46 наименований.

В данной работе проводится разработка методики снятия динамических характеристик преобразователя давления на основе уже известных методик, также получение динамических характеристик и анализ полученных результатов. Конечной целью является работоспособная методика снятия динамических характеристик.

В данной работе была изучена информация необходимая для снятия и оценки динамических характеристик, проанализированы имеющиеся работы, в которых проводилось снятие динамических характеристик, собран стенд, проведены опыты по снятию динамических характеристик и проанализированы полученные данные.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Суворов А.В.</i>				ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИБРОСТЕНДА	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проз.</i>	<i>Бушуев О.Ю.</i>						3	
<i>Н.контр.</i>	<i>Волосников А.С.</i>				ЮУрГУ Кафедра ИНИТ			
<i>Утв.</i>								

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР ИНФОРМАЦИИ СВЯЗАННОЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	7
1.1 Динамические характеристики	7
1.2 Существующие исследования определения динамических характеристик..	9
1.3 Интерактивная среда MATLAB	22
1.4 Описание используемых приборов.....	25
Вывод по разделу один	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	36
2.1 Преобразование Фурье.....	36
2.2 Быстрое преобразование Фурье	39
2.3 Реализация БПФ в MATLAB.....	43
Вывод по разделу два	44
3 РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СНЯТИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	45
3.1 Описание конструкции стенда для снятия динамических характеристик ..	45
3.2 Снятие динамических характеристик.....	48
3.3 Анализ полученных данных	55
Вывод по разделу три.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А	63

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные средства измерения обладают большими возможностями по сравнению с обычными средствами измерения, что позволяет заменить несколько приборов одним, тем самым снизив стоимость их обслуживания, ввиду этого, к ним возрастает интерес со стороны промышленности.

Согласно ГОСТ Р 8.673-2009, датчик – конструктивно обособленное устройство, содержащее один или несколько первичных измерительных преобразователей [3].

Интеллектуальный датчик – Адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля. Под адаптивностью подразумевается, способность изменения параметров и/или алгоритмов работы датчика, в зависимости от сигналов, имеющих в нём преобразователей, с целью повышения достоверности измерений [3].

Под метрологическим самоконтролем датчика подразумевается, автоматическая проверка, осуществляемая в процессе эксплуатации, метрологической исправности датчика, то есть находится ли погрешность данного датчика в установленных пределах, которая осуществляется с использованием принятого опорного значения, которое формируется при помощи встроенного в датчик средства (меры или измерительного преобразователя) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала [3].

Современные научные исследования в области интеллектуальных датчиков тесно связаны с их методами обнаружения и диагностики неисправностей, а также с методами улучшения качества измерений и обеспечения их самоконтроля. Одним из таких методов является метод спектрального анализа.

Метод спектрального анализа – один из методов диагностики неисправностей, который основывается на оценке параметров выходного сигнала датчика. Использование данного метода предполагает, что при появлении в системе

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

неисправностей будет изменяться частотная характеристика системы [7]. Иначе говоря, методы, которые работают в частотной области, обычно применяются тогда, когда эффекты от неисправностей имеют частотные свойства, которые могут отличаться друг от друга так, что частотный спектр становится критерием обнаружения неисправностей [24, 25, 36].

Для разработки датчика самоконтроля следует предложить метод диагностики возможных ошибок, влияющих на результаты измерения. Приемлемым способом является использование дополнительной информации, содержащейся в его выходном сигнале: на основе частотных характеристик. Таким образом, ставится задача обнаружения изменения частоты с достаточной точностью.

Методика представляет собой последовательную подачу сигнала, запись ответной реакции, спектральный анализ и оценку состояния. В нашем случае входное воздействие задаётся при помощи вибростенда.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики определения динамических характеристик датчика давления с помощью вибростенда.

Задачи данной работы:

- 1) Изучить информацию касающуюся динамических характеристик и их снятия;
- 2) Ознакомиться с существующими методами снятия динамических характеристик;
- 3) На их основе разработать методику получения динамических характеристик преобразователя давления;
- 4) Собрать стенд для снятия динамических характеристик;
- 5) Провести опыты по снятию динамических характеристик с помощью данного метода;
- 6) Сделать выводы по полученным данным.

									Лист
									6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

1 ОБЗОР ИНФОРМАЦИИ СВЯЗАННОЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Динамические характеристики

Динамическая характеристика – это характеристика, отражающая инерционные свойства средств измерения при воздействии на них изменяющихся во времени величин.

Согласно ГОСТу 8.009-84 [1] есть 5 видов полных динамических характеристик:

1. Переходная характеристика, для её измерения на вход подаётся ступенчатый сигнал.

2. Амплитудно-частотная характеристика, для её измерения на вход подаётся ступенчатый сигнал.

3. Амплитудно-фазовая характеристика, для её измерения на вход подаётся синусоидальный сигнал.

4. Импульсная переходная характеристика для её измерения на вход подаётся импульсный или псевдослучайный двух или трёх уровневый сигнал.

5. Передаточная функция, вычисляется по другим непосредственно измеримым полным динамическим характеристикам.

Динамические характеристики по полноте описания инерционных свойств подразделяются на два вида, частные и полные.

Частные включают в себя характеристики, полностью не описывающие инерционные свойства, но необходимые для выполнения измерений с заданной точностью, или отдельные параметры полных характеристик.

Полные:

1. Дифференциальное уравнение – выражение описывающие работу системы в динамике.

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

2. Передаточная функция – это отношение преобразования Лапласа выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала при ненулевых начальных условиях. $W(p) = y(p)/x(p)$.

3. Импульсная характеристика – это отклик системы, при нулевых начальных условиях, на единичный импульс.

4. Переходная характеристика – это отклик системы, при нулевых начальных условиях, на единичное воздействие.

Любая из этих характеристик может быть получена из другой.

В настоящее время имеется множество схем оценки частотной характеристики, которые обобщив, можно разделить на два вида, параметрические и непараметрические.

Параметрические методы, которые подразумевают собой наличие некоторой математической модели анализируемого сигнала. Используются тогда, когда предполагается, что модель является близким приближением к реальному объекту [12]. Спектральный анализ сводится к решению задачи оптимизации, то есть отысканию таких параметров модели, при которых она была бы как можно ближе к реально наблюдаемому сигналу. Примерами таких методов могут быть: метод Прони, авторегрессионная модель, ESPRIT, MUSIC и метод матричных пучков[17].

Непараметрические методы, в них используется только информация содержащаяся в отсчётах анализируемого сигнала. К ним относятся: быстрое преобразование Фурье (БПФ), периодограмма, метод Уэлча [17].

Преимущества параметрических методов над непараметрическими заключается в возможности обеспечивать наиболее высокое разрешение и точные оценки, что позволяет избежать трудностей при анализе сложных колебаний с широким спектром, нестационарных сигналов и низким соотношением сигнал/шум.

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

1.2 Существующие исследования определения динамических характеристик

Абсолютное большинство датчиков характеризуется как статическими, так и динамическими характеристиками (ДХ). Статические характеристики дают оценку параметрам датчика в установившемся состоянии. По ним определяют порог чувствительности, коэффициент преобразования и т.д. Динамические характеристики датчика проявляются в том, что на его выходной сигнал влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени.⁷³ ДХ оценивают показатели качества переходных процессов, к числу которых относят, время переходного процесса, дающее представление о быстродействии датчика, перерегулирование, показывающее, насколько динамическая ошибка больше по сравнению с установившимся состоянием; степень колебательности и т.д.

Одним из важнейших параметров системы, определяющим её реакцию на изменение внешних воздействий является её динамическая характеристика. В данной работе нас интересует амплитудно частотная характеристика преобразователя давления, так как один из методов диагностики неисправностей, основанных на оценке параметров выходного сигнала датчика, это метод спектрального анализа. По изменению частотного спектра исследуемой системы можно оценить исправность системы в том случае, если неисправности влияют на частотные свойства, таким образом, что по изменениям внесёнными ими в частотный спектр, можно судить о наличии неисправностей, например изменение целостности конструкции преобразователя [39, 40].

Ещё в 1986 году, Р. Паттон выдвинул теорию использования информации содержащейся в частотной области для разработки методик выявления неисправностей [42]. Р. Айзерман в своей монографии «Системы диагностики неисправностей» [43] описывает каким образом можно реализовать диагностику неисправностей оценивая модели сигнала. Используя определённые математические модели для описания сигналов, вычисляют соответствующие параметры, например, фазы, амплитуды или частотный спектр. Сравнения

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

наблюдаемые параметров с их опорными значениями можно выявить их изменение и сообщить о наличии ошибки.

Для анализа периодических сигналов применяются полосовая фильтрация, корреляционные функции, преобразование Фурье, спектральное оценивание методом максимума энтропии.

Преобразователи давления представляют собой электромеханическую конструкцию, это говорит нам о том, что выходной электрический сигнал содержит информацию о их динамических характеристиках. Основываясь на предположении, что в зависимости от технического состояния преобразователя изменяются его частотные характеристики, можно разработать методику обнаружения неисправностей, по частотной характеристике системы.

Исследования с целью диагностики технического состояния средств измерения, оценивая динамические характеристики проводились отечественными и зарубежными учеными: А.С. Семеновым, А.Л. Шестаковым, К. А. Алексеевым, В.П. Иосифовым, Дж. АмадиИченду, Х. Зу, Е. Хайемом, О.Л. Ибряевой, Р. Зангом, Р. Кингом, Л. Олсоном, С. Биби, Н. Гребхемом.

Вопросам диагностики по оценке частотных характеристик посвящены работы Л. А. Русинова, Р. Тайманова, О. Ю. Бушуева [5, 44, 45]. В ГОСТ Р 8.734-2011 ГСИ более подробно описываются способы воздействия на систему и проводится их сравнение, однако, собственные частоты не рассматриваются как средство диагностики неисправностей датчик [2].

До недавнего времени, зависимость выходного сигнала датчика от действительного значения измеряемого параметра, являлась основной характеристикой датчиков. Подразумевается, что значение измеряемого параметра не изменяется на протяжении измерения. Для контроля действительного значения используется прибор более высокого класса точности. Поведение датчика в случае быстро меняющихся входных воздействий остаётся неопределённым. Информация, которую несёт динамическая характеристика, даёт возможность учесть отклик датчика на изменение внешних условий.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

В качестве признаков технического состояния преобразователя могут выступать частоты собственных колебаний, которые связаны с параметрами его конструкции. Неисправности и дефекты конструкции могут оказывать влияние на амплитудно-частотные характеристики преобразователя, но большинство дефектов могут вызывать относительное изменение частот в пределах 0,5-1,5%, следовательно, требуется использование более точных методов спектрального анализа для исследования реальных сигналов

При экспериментальной оценке динамической характеристики датчика основной проблемой является необходимость создания воздействия с контролируемыми параметрами, в характерном для изучаемого устройства, диапазоне частот.

В исследовании Пирогова А.В. и Стучебникова В.М., в качестве внешних воздействий на преобразователь давления использовались удары стальными стержнями, разных длин и диаметров, по мембране датчика.

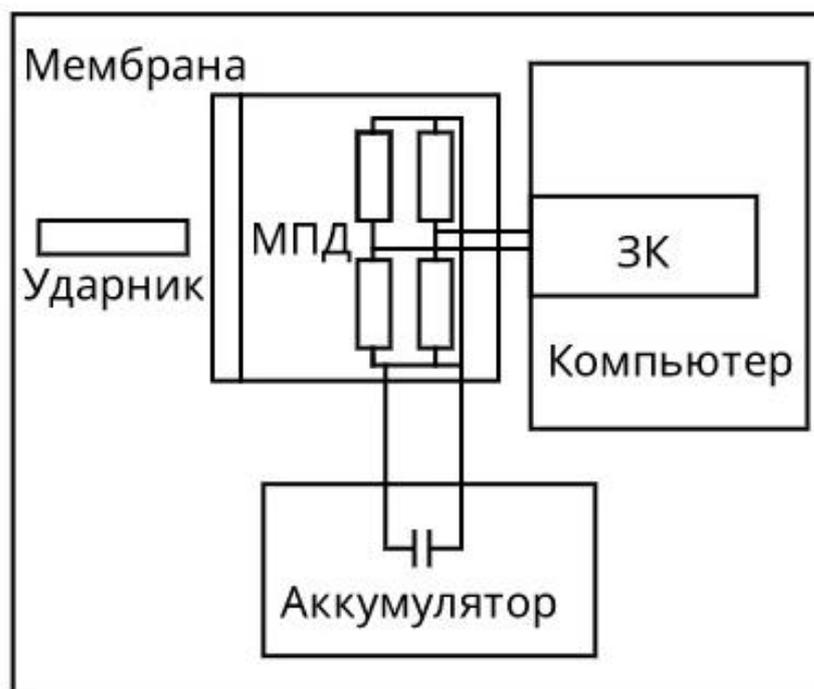


Рисунок 1 – Схема стенда

Питание модуля преобразования давления (МПД) осуществлялось напряжением в 12 В через аккумулятор, для того чтобы снизить влияние электрических наводок. Механические колебания мембраны МПД возбуждались стальными ударниками двух разных длин, 50 и 140 мм и диаметром 2,5 мм. После удара по мембране её колебания преобразовывались в электрический сигнал который передавался на звуковую карту компьютера (Sound-max integrated digital audio), где подвергался дискретизации. Обработывался дискретизированный сигнал при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) с разложением на простые множители.

В ходе опыта записывались сигналы создаваемые генератором частоты ГЗ-113. Чувствительность по входу определялась при подаче на вход звуковой карты синусоидального сигнала 0.3 в амплитуда 0.42 В 1 кГц зафиксированное максимальное значение в дискретах составляло 16000 т е чувствительность по входу звуковой карты составляла мкВ/дискрету.

В данной работе, проблемой затрудняющей определение частотной характеристики, является определение длительности и формы входного воздействия, а также учёт взаимодействия мембраны и стержня. Поэтому вопрос поиска подходящих для решения данной проблемы воздействий остаётся актуальным.

В работе О.С. Филатовой, на ударной трубе высокого давления (УТВД) проводится определение переходной характеристики (ПХ) прямым методом – путем регистрации реакции датчика на перепад давления газа амплитудой до 6–7 МПа, при этом датчик установлен в торце УТВД. По графику ПХ, получаемому в ходе испытаний, определяются предварительные значения периода T_0 и нулевой частоты f_0 датчика. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассчитывается на основе информации об экспериментальной ПХ, хранящейся на персональном компьютере (ПК). Важность определения АЧХ состоит в отображении относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении его частоты. Как правило, для описания динамических характеристик (ДХ) датчиков используется

									Лист
									12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывая, на какой частоте происходит 30-процентное уменьшение выходного сигнала. Схема испытательной установки приведена на рисунке 2.

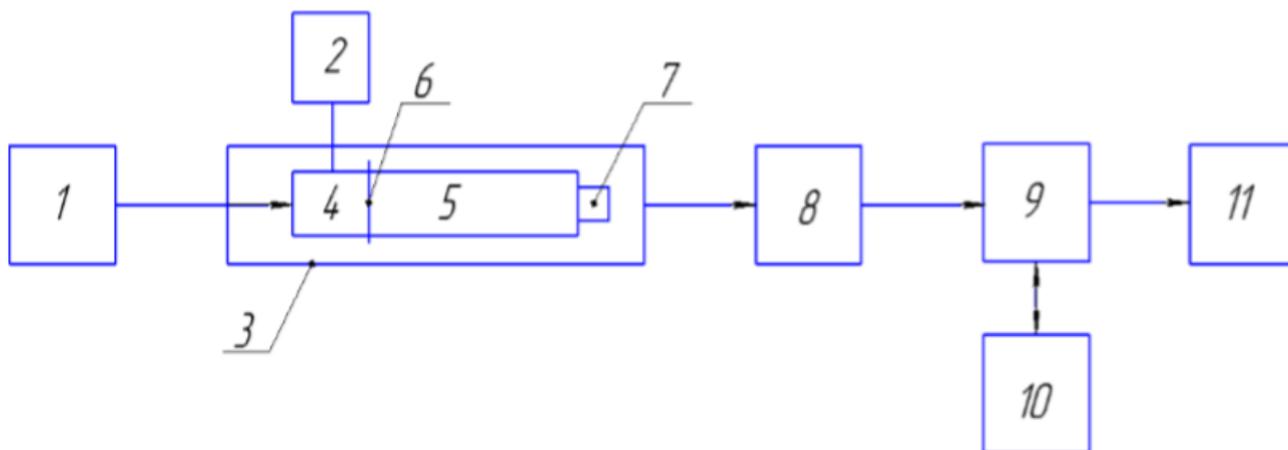


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки:

1 – система подачи высокого давления воздуха; 2 – манометр; 3 – ударная труба высокого давления; 4 – камера высокого давления (КВД); 5 – камера низкого давления (КНД); 6 – мембрана; 7 – испытываемый датчик; 8 – усилитель; 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – ПК; 11 – запоминающий осциллограф

В ходе испытаний регистрируются импульсные переходные характеристики (ИПХ) датчиков. УТВД формирует ступенчатое воздействие, реакцией на которое является переходная характеристика, описываемая следующим выражением:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq 0 \\ 1, & \text{если } t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $h(t)$ – переходная характеристика датчика.

Импульсная и переходная характеристики связаны интегральной зависимостью:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh(t)}{dt} dt = h(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} = 1, \quad (2)$$

где $\delta(t)$ – импульсная характеристика датчика;

$h(t)$ – переходная характеристика датчика.

После нахождения ИПХ определяются значения периода T_0 и частоты f_0 их собственных колебаний.

Отклик тензодатчиков на входное воздействие имеет сложный спектр. Он состоит из ряда низкочастотных и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие чаще всего не проявляются при определении АЧХ на пульсаторах. Поэтому при определении рабочего диапазона частот датчика, предназначенного для измерения переменного пульсирующего давления, их не следует принимать во внимание и использовать только высокочастотные пики. Однако при измерении импульсных и ударно-волновых давлений низкочастотные пики следует учитывать при анализе измерительной информации или при определении рабочего диапазона частот.

Расчет АЧХ по полученным значениям ПХ проводится программным способом. Так как из теории линейных систем известно, что выходной сигнал системы может быть представлен как свертка входного сигнала и импульсной характеристики системы, выражение в частотной области выглядит следующим образом:

$$Y(f) = H(f)X(f), \quad (3)$$

где $Y(f)$ – фурье-образ выходного сигнала $y(t)$;

$X(f)$ – фурье-образ импульсной характеристики выходного сигнала $x(t)$;

$H(f)$ – фурье-образ импульсной характеристики системы $h(t)$.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Для того чтобы определить значения частотной характеристики, подставляем в выражение (3):

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 G_{xx}(f), \quad (4)$$

где $H(f)$ – искомая частотная характеристика;

$G_{yy}(f)$ – спектральная плотность входного процесса;

$G_{xx}(f)$ – спектральная плотность выходного процесса.

Взяв в качестве входного сигнала, сигнал с равномерным спектром, можно по выражению (4) определить передаточную функцию системы, в данном случае частотные спектры выходного сигнала и исследуемого датчика совпадут. Программа включает в себя сервисные операции по считыванию отсчетов ПХ, формированию массивов и т.д., вычислительные операции преобразования Фурье. Учитывая, что вместо непрерывного сигнала используются его цифровые отсчеты, в программу заложено обратное дискретное преобразование Фурье, определяемое выражением

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi}{N} kn}, \quad (5)$$

где $n = 0, \dots, N - 1$, N – количество значений сигнала, измеренных за период;

x_n – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках;

X_k – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, слагающих исходные сигналы (обозначают одновременно амплитуду и фазу);

k – частота k -й колебания синусоиды за период.

Также исследования в области определения динамических характеристик проводились в лаборатории ЮУрГУ, О.Ю. Бушуевым. Используемая им методика определения динамических характеристик описывается далее.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Для снятия и исследования частотных характеристик преобразователя использовался стенд, схема которого представлена на рисунке 3.

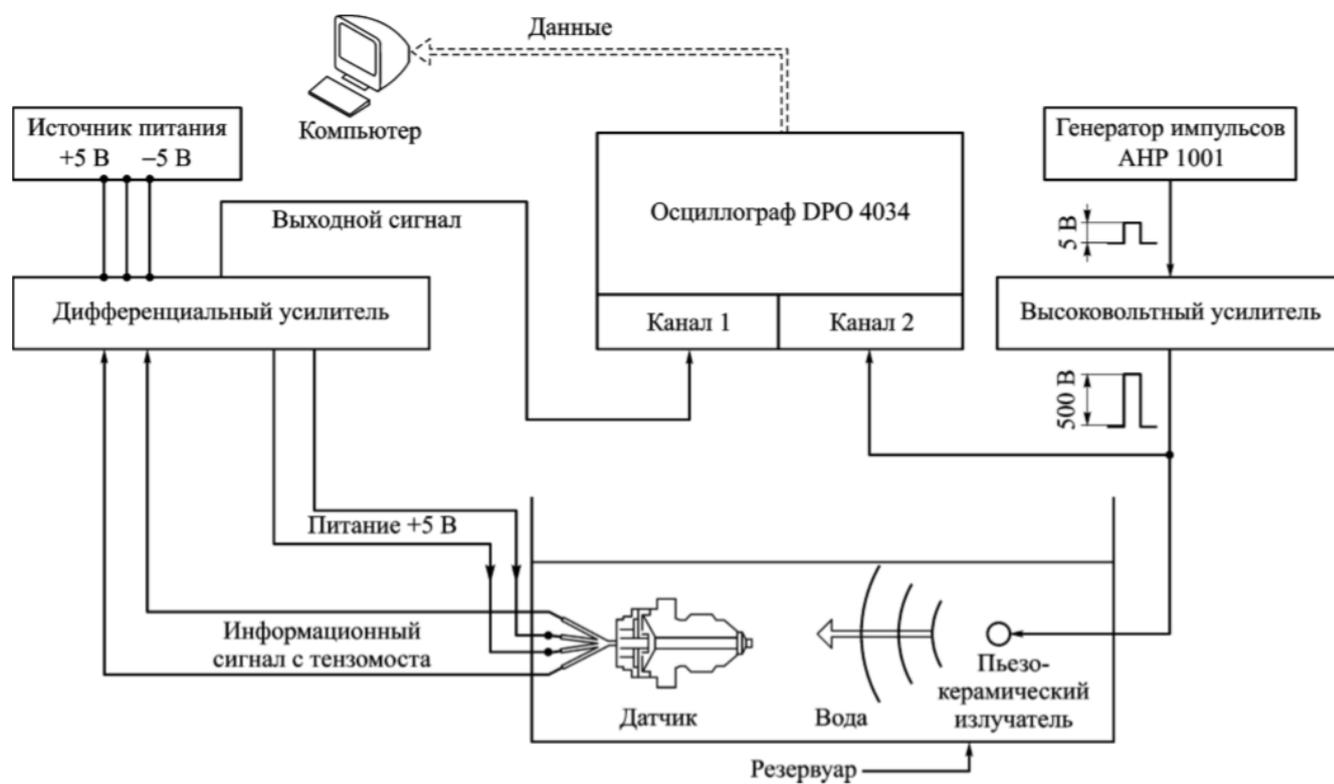


Рисунок 3 – Схема стенда

Рабочая ёмкость - цилиндрический бак со съёмной монтажной крышкой, которая выполнена из нержавеющей стали. В верхней части бака располагаются: узел подвода общей среды, монтажная крышка с узлом крепления испытываемого прибора, термосопротивление. Боковая часть содержит в середине датчик внутреннего давления, снизу - смонтированы выводы электронагревателя. В нижней части располагается сливной кран и регулируемые опоры бака.

Датчик и пьезокерамический излучатель помещались в резервуар с водой. Питание датчика осуществлялось напряжением 5 В с помощью источника питания подсоединённого через дифференциальный усилитель к одной из диагоналей тензомоста. Для создания импульсов использовался многофункциональный генератор АНР 1001, способный генерировать сигнал с

заданной периодичностью, необходимой амплитудой и продолжительностью импульса. Генератор импульсов генерирует прямоугольный сигнал амплитудой 5 В, однако данной амплитуды недостаточно для генерации импульса, возбуждающего преобразователь, поэтому для усиления сигнала использовался Tektronix ADA400A, проходя через который амплитуда сигнала возрастала до 500 В и поступала на пьезокерамический излучатель, который воздействовал на датчик.

Сигнал с преобразователя и с высоковольтного усилителя через дифференциальный усилитель поступают на осциллограф DPO4034, где записывается на флэш память. Полоса пропускания усилителя была рассчитана таким образом, чтобы не вносить искажений на интервале от 0 до 80 кГц. Информация с осциллографа записывалась на флэш-память и переносилась на компьютер, где обрабатывалась в пакете прикладных программ Matlab.

В опытах использовались два вида тензометрических преобразователей давления типа “кремний на сапфире”.

Тип А – двухмембранный тензопреобразователь давления с узким каналом, изготовленный ЗАО “НПК ВИП” (г.Екатеринбург) по ВЮМА40130 309.001.ТУ. Конструкция преобразователя типа А приведена на рисунке 4, а, б.

Тип В – двухмембранный тензопреобразователь с разделительной мембраной 2130М2ДИ, изготовленный ООО “ИТеК БМВ” (г.Челябинск). Конструкция преобразователя типа В приведена на рисунке 4, в, г.

Предел измерений у обоих образцов от 0 до 100 кПа.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

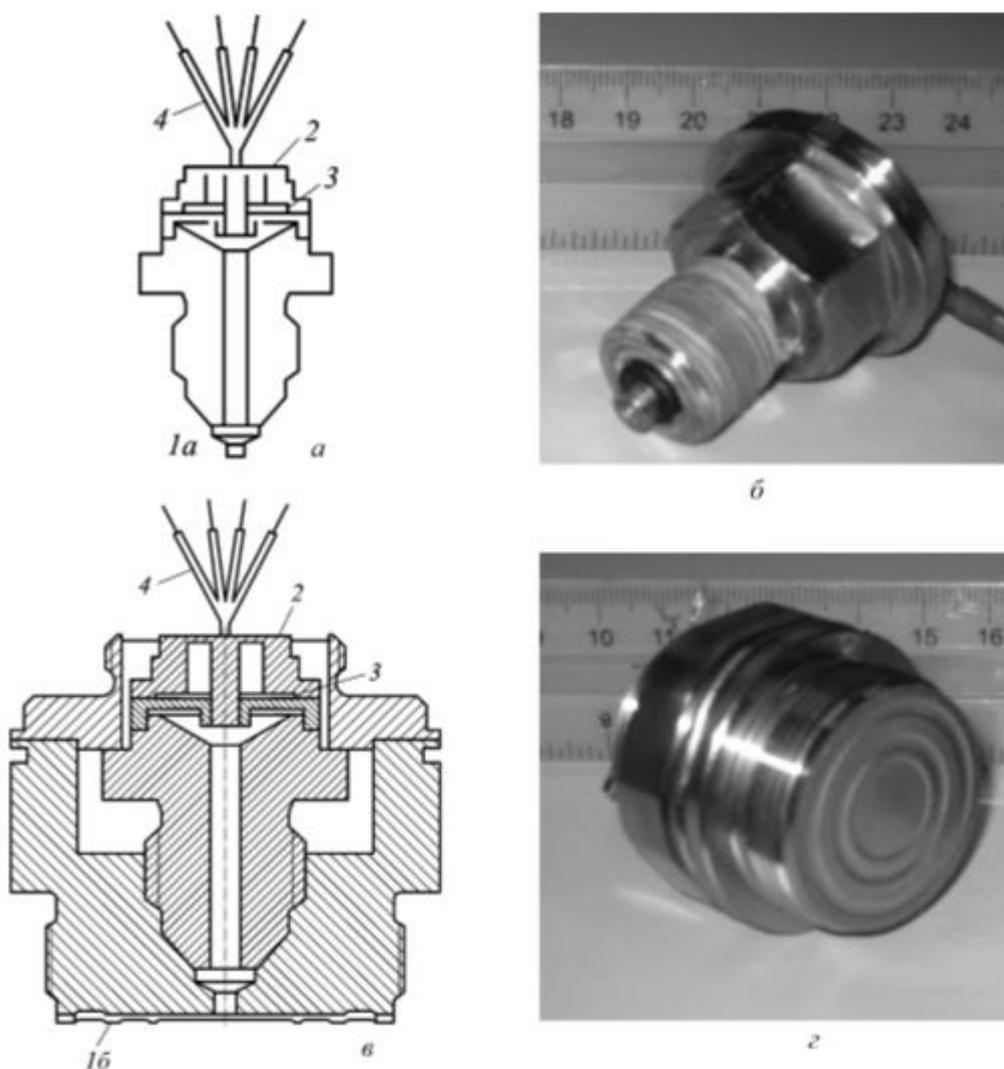


Рисунок 4 – Конструкция и общий вид (б, г) преобразователей давления типов А (а) и В (в): 1а – узкий канал, заполненный кремнийорганической жидкостью; 1б – разделительная мембрана; 2, 3 – чувствительные мембраны имеющие структуру «кремний на сапфире»; 4 – выходы тензомоста

В качестве излучателей использовались пьезокерамические преобразователи на основе пьезокерамики ЦТС-19. Общий вид ультразвуковых излучателей представлен на рисунке 5.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

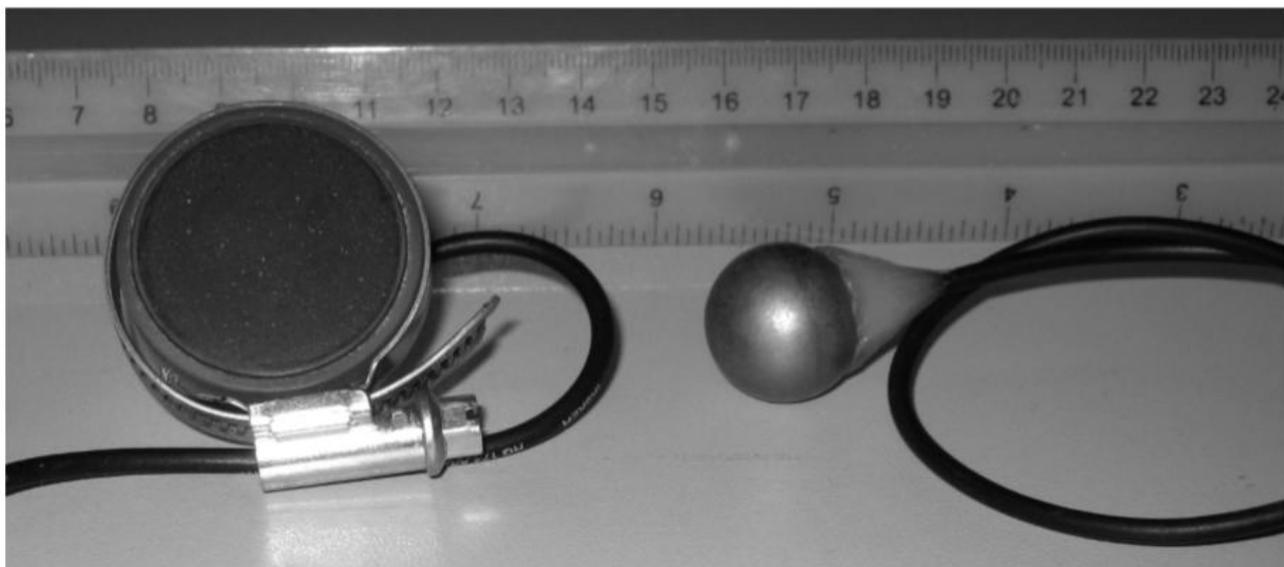


Рисунок 5 – Общий вид ультразвуковых излучателей II (слева) и III (справа)

Сначала для каждого типа датчиков были получены по два массива данных: $\{X_{ul}[t_n], Y_{ul}[t_n]\}$ и $\{X_n[t_n], Y_n[t_n]\}$, где $X_{ul}[t_n], Y_{ul}[t_n]$ и $X_n[t_n], Y_n[t_n]$ – значения входных и выходных сигналов, полученные при использовании излучателей III и II, $n = 1, \dots, 1000000$, n – номер отсчета. Дискретизировался сигнал с частотой 500 кГц, что определило длину записываемого сигнала, ввиду выбранного объема выборки. За 2 секунды записываемого сигнала генерировалось 15 импульсов давления. Были получены две реализации сигналов:

1. При использовании в качестве излучателя типа II, а в качестве приемника типа III, далее ПШ.

2. При использовании в качестве излучателя типа III, а в качестве приемника типа II, далее ШП.

Отклики преобразователя давления на излучатели представлены на рисунке 6.

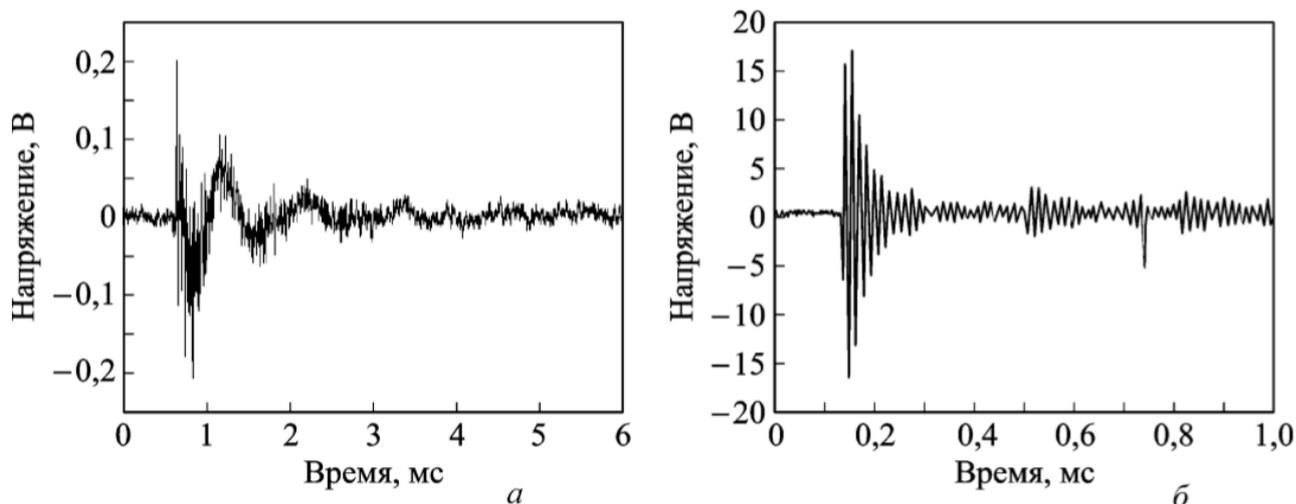


Рисунок 6 - Отклики преобразователя давления (типа В) на возбуждение излучателем Ш (а) и излучателя, используемого в качестве приемника сигнала, на возбуждение другим излучателем (б)

Записанные массивы данных, обозначим как $\{X_{nu}[t_n], Y_{nu}[t_n]\}$ для первой реализации и $\{X_{un}[t_n], Y_{un}[t_n]\}$ для второй.

В теории, для линейных систем, передаточные функции каскадных систем ШП и ПШ должны быть идентичны, однако для компенсации случайных искажений в дальнейшем будем использовать их усреднённый спектр.

Так как преобразование Фурье случайного сигнала является статистически неустойчивой операцией [5], то в качестве спектральных характеристик сигналов использовался усредненный спектр независимых сегментов реализации. После проведения операции усреднения:

$$U[f_m] = \frac{1}{15} \sum_{k=1}^{15} U_k[f_m], \quad (6)$$

где $U = \{X_{us}, Y_{us}, X_n, Y_n, X_{un}, Y_{un}, X_{nu}, Y_{nu}\}$.

Дополнительно определяя среднее сигналов ШП и ПШ, получаем усредненные спектры, подставив которые в соотношение (6), получаем искомую оценку частотного спектра преобразователей:

$$W[f_m]^4 = \frac{Y_{Ш}[f_k]Y_{П}[f_k]X_{\Sigma}[f_k]}{X_{Ш}[f_k]X_{П}[f_k]Y_{\Sigma}[f_k]}. \quad (7)$$

Частотные характеристики датчиков типа А и В приведены на рисунке 7.

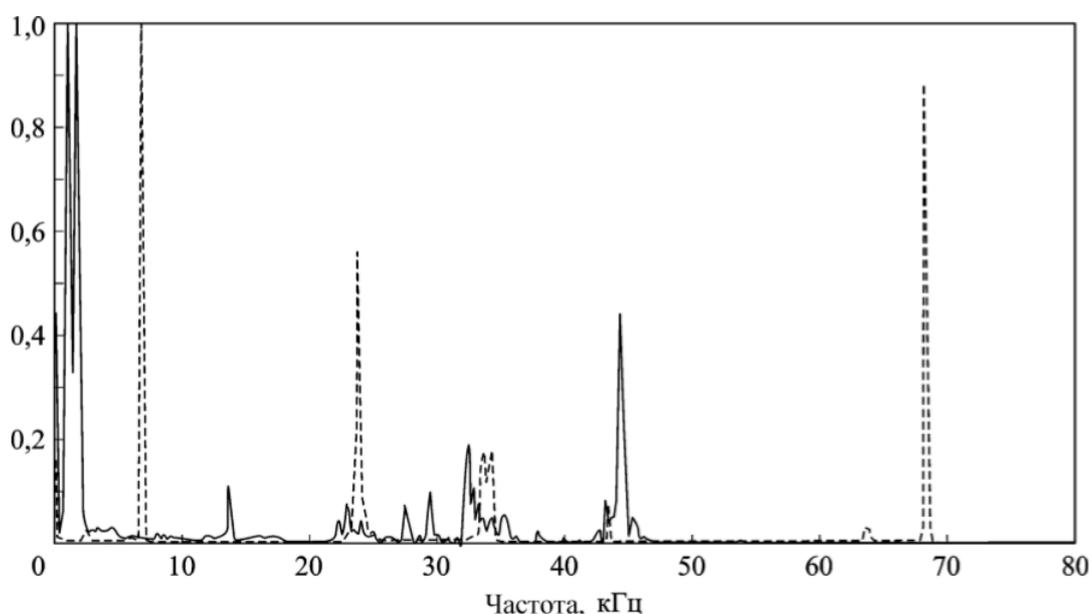


Рисунок 7 – Частотные характеристики датчиков типов В (сплошные кривые) и А (штриховые)

Как видно на рисунке 7, спектры имеют четко выраженные максимумы, притом для датчиков разных конструкций максимумы находятся на разных частотах. Для проверки постоянства АЧХ рассчитывали коэффициенты корреляции, проводили повторные опыты по получению частотного спектра и оценивали разницу между:

1. Частотными спектрами, полученными в разное время.
2. Спектральными характеристиками разных датчиков.

Коэффициент корреляции в первом случае изменялся в пределах от 0,92 до 0,99, а во втором в пределах от 0,14 до 0,2.

По полученным данным можно сделать вывод о надёжности методики получения и оценки частотного спектра, так как коэффициент корреляции для датчиков одного типа достаточно высок.

О том, что частотный спектр является характеристикой, определяющей конкретный прибор, можно сделать вывод по низким значениям коэффициентов корреляции между разными датчиками. Ввиду этого, предложенная в работе методика позволяет определить динамическую характеристику преобразователя давления. То для чего будут использоваться полученные данные определяет дальнейшую их обработку, например, в случае определения возможности работы датчика в условиях синусоидального давления, достаточно того, чтобы собственные частоты динамической характеристики датчика не находились в области частот изменения давления. Если же по динамической характеристике должны компенсироваться динамические погрешности, то нужно перейти к параметрическому представлению ДХ и оценить точность определения параметров, что само по себе является отдельной сложной задачей.

Также, наличие того факта, что характеристика индивидуальна для каждого датчика, возможно, при применении соответствующих методик, позволит оценить состояние внутренних элементов конструкции.

В данной работе предлагается методика оценки динамических характеристик преобразователей давления с использованием вибростенда.

1.3 Интерактивная среда MATLAB

MATLAB – высокоуровневый язык и пакет прикладных программ используемый для программирования, расчётов их визуализации. Благодаря функциям MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения. Поддерживается на всех современных, распространённых операционных системах.

									Лист
									22
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

MATLAB является главным инструментом для решения многих видов различных научных и прикладных задач, в таких областях как интересующая нас обработка сигналов, системы управления, и многих других.

Одним из преимуществ является то, что он гораздо быстрее таких языков программирования как Java, Pascal или C/C++, в решении типовых задач, благодаря отсутствию необходимости объявления и определения типов переменных, выделения памяти, также отсутствует необходимость использования циклов из-за перехода на векторные и матричные операции, что в результате приводит к тому что одна строка MATLAB кода может заменить несколько строк кода традиционных языков программирования, делая его более компактным и удобным.

Язык MATLAB обладает поддержкой векторных и матричных операций, которая необходима для решения инженерных и научных задач, и предназначена для быстрой разработки и запуска. Также MATLAB содержит GUI графический интерфейс пользователя, данное средство позволяет создать инструмент для анализа и расчёта часто встречаемых задач, максимально близкий к потребностям пользователя, например встроенные функции быстрого преобразования Фурье, использующееся в данной работе, что упрощает нам его реализацию,

Ниже представлен список распространённых функций MATLAB.

Вещественные функции:

Sin, sinh, asin, asinh, cos, cosh, acos, acosh, tan, tanh, atan, atan2, atanh, sec, sech, asec, asech, csc, csch, acsc, acsch, cot, coth, acot, acoth exp, log, log10, log2 pow2, sqrt.

Целочисленные функции:

- fix – округление в сторону нуля;
- floor – округление в сторону – бесконечности;
- ceil – округление в сторону бесконечности;
- round – округление до ближайшего целого;
- mod – остаток со знаком;
- rem – остаток от деления по модулю.

									Лист
									23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

Векторные функции:

Функции, представленные ниже, при работе с векторами возвращают скаляр. Если аргументом функции является массив, то функция работает со столбцами, возвращая на выходе результат в виде вектор-строки.

- `max` – функция максимальный элемент массива;
- `min` – функция минимальный элемент массива;
- `sort` – функция располагает элементы массива в порядке их возрастания;
- `sum` – функция суммирует элементы массива;
- `prod` – функция перемножает элементы массива;
- `std` – функция определения стандартных отклонений массива;
- `median` – функция определения срединных значений элементов массива;
- `mean` – функция определения средних значений элементов массива;
- `any` – функция проверки массива на наличие ненулевых элементов, если имеется хотя бы один элемент не равный 0, то возвращает 1, в противном случае возвращает 0;
- `all` – функция проверки массива на наличие ненулевых элементов, если все элементы не равны 0, то возвращает 1, в противном случае возвращает 0.

Матричные функции:

- `eig` – собственные значения матрицы;
- `inv` – обратная матрица;
- `poly` – характеристический полином;
- `det` – определитель матрицы;
- `size` – размерность матрицы;
- `norm` – норма вектора или матрицы;
- `cond` – число обусловленности;
- `rank` – ранг матрицы;
- `expm` – матричная \exp ;
- `sqrtm` – корень из матрицы.

									Лист
									24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

Выполняя команды интерактивно, можно ускорить выполнение задач, что позволяет выбрать лучшее решение, достаточно быстро рассмотрев различные варианты. MatLab хорош для рутинных расчетов, так как их можно автоматизировать, объединив их в скрипт или функцию.

Имеется возможность интегрировать MatLab в Excel, что позволит пользователю Excel пользоваться многочисленными функциями MatLab.

MatLab может применяться в таких областях как обработка сигналов и связи, обработка изображений и видеоданных, системы управления и многих других, однако отсутствие интерактивности делает его неудобным при выполнении поисковых, исследовательских расчетов для новых, неисследованных массивов данных. Ещё он включает в себя свойства традиционных языков программирования, таких как Java, C++, Matlab Extantions (это компилятор, библиотека функций традиционных языков программирования).

Также MatLab содержит графическую среду SIMULINK, это система для имитационного моделирования проектов, представленных в виде композиции функциональных блоков, источников сигналов, приёмников и измерительных средств для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем.

MatLab это очень популярный инструмент для анализа данных, однако очень дорогой.

1.4 Описание используемых приборов

1.4.1 Преобразователь давления

Тензодатчик – такой вид датчика, который преобразует давление на входе в удобный для передачи сигнал на выходе, например напряжение. Конструкция исследуемого в работе преобразователя давления представлена на рисунке 8.

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

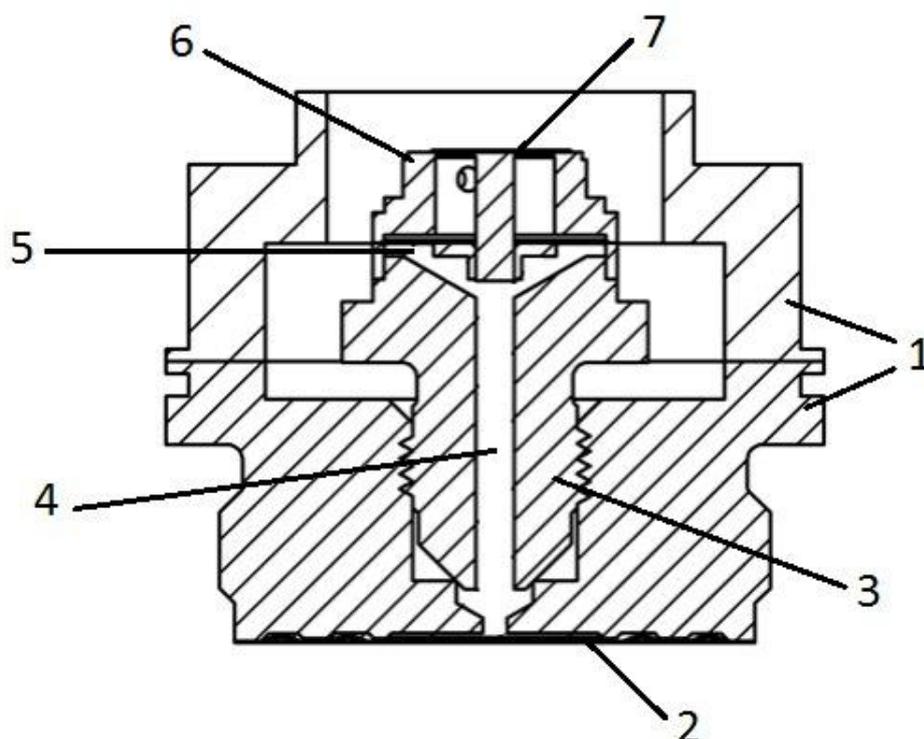


Рисунок 8 – Конструкция преобразователя давления:

1 – Защитный корпус; 2 – Разделительная мембрана; 3 – Корпус самого преобразователя; 4 – Канал для кремнийорганической жидкости; 5 – Внутренняя мембрана; 6 – Измерительная мембрана; 7 – Тонкая пластина, имеющая структуру «кремний на сапфире»

Датчик давления состоит из защитного корпуса (1), внутрь которого помещён корпус преобразователя (3), разделительная мембрана (2) крепится к защитному корпусу, также имеется канал заполненный кремнийорганической жидкостью для передачи давления на внутреннюю мембрану (5), жёстко закреплённую с помощью штока с измерительной мембраной (6). На поверхности мембраны имеется чувствительный элемент, имеющий структуру кремний на сапфире (7).

На рисунке 9 представлена схема тензомоста преобразователя с указанием проводов подключения входного и выходного напряжения.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист 26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

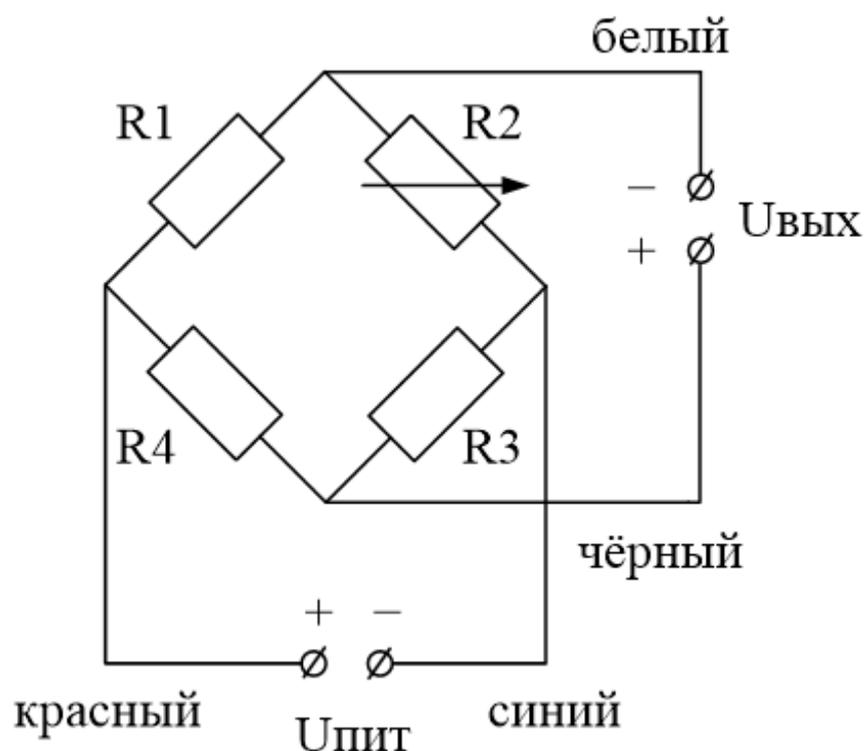


Рисунок 9 – Электрическая схема включения тензопреобразователя

Питание в 5 В на тензопреобразователь подаётся через красный и синий провода. Выходной сигнал выводится через чёрный и белый провода. В ходе воздействия давления деформируется упругий элемент вместе с резистором что приводит к изменению его сопротивления и нарушению баланса моста, в результате этого на выходе формируется электрический сигнал.

В данной работе мы использовали двухмембранный тензопреобразователь давления с узким каналом, изготовленный ЗАО “НПК ВИП” (г.Екатеринбург) по ВЮМА40130 309.001.ТУ.

Таблица 1 – Технические характеристики тензопреобразователя давления

Характеристика	Значение
Предел измерений	0 – 100 кПа
Начальное значение выходного сигнала при нулевом значении преобразуемого параметра	5.1 мВ

Продолжение таблицы 1

Характеристика	Значение
Диапазон изменений выходного сигнала, соответствующий номинальному значению преобразуемого параметра в нормальных условиях	318 мВ
Нелинейность выходного сигнала по абсолютной величине	0.03 %
Величина сопротивления моста в нормальных условиях	4.51 кОм

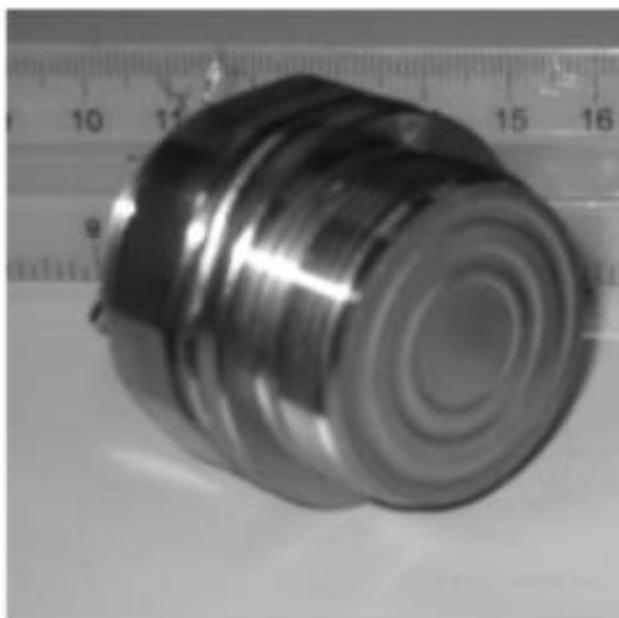


Рисунок 10 – Двухмембранный тензопреобразователь давления с узким каналом

1.4.2 Вибростенд LDS V650

Благодаря сочетанию высокого развиваемого усилия, высокого ускорения и широкой полосе рабочих частот, вибростенд LDS V650 является надежной, универсальной и экономичной альтернативой для самых различных типов

испытаний на устойчивость к вибрации, включая проверку изделия на соответствие техническим условиям, контроль и обеспечение качества, диагностику оборудования и калибровку измерительных приборов.

Вибростенд LDS V650 подходит для испытаний на удар и вибрацию с использованием синусоидальных и случайных возбуждений. Он способен обеспечить пиковое развиваемое усилие при синусоидальных колебаниях в 2,2 кН и создавать вибрацию в диапазоне частот от 5 до 4000 Гц. Вибростенд оснащен встроенной пневматической системой поддержки, которая может проводить испытания полезной нагрузки массой до 50 кг с полным относительным перемещением.

Достижение улучшенных характеристик ускорения и скорости воспроизводимых колебаний обеспечивается тем, что рама (вибростол) для установки испытуемого изделия оснащена уникальным механизмом подвески, который обеспечивает высокую поперечную жесткость и предотвращает ее боковую и вращательную подвижность.

В стандартном варианте вибростенд LDS V650 монтируется на цельнолитой чугунной цапфе и может быть зафиксирован в вертикальном или горизонтальном положении для работы по любой из осей. Сама цапфа поддерживается четырьмя воздушно-изоляционными креплениями для изоляции от пола, на котором она установлена, от передачи на него генерируемых вибростендом колебаний, что особенно полезно при проведении испытаний на устойчивость тестируемого оборудования к синусоидальным колебаниям с очень низкими частотами.

Кроме того, имеется ряд дополнительных и настраиваемых под конкретного потребителя функций, позволяющих адаптировать вибростенд LDS V650 к вашим конкретным потребностям.

Характеристики:

- рабочий диапазон частот 5 Гц – 4000 Гц;
- легкая, высокопроизводительная конструкция арматуры обеспечивает превосходные показатели ускорения и скорости;

						ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист 29
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.			

- дополнительное программное обеспечение позволяет дистанционно контролировать системные тесты с помощью ПК;
- простота использования и функции энергосбережения на усилителях LDS снижают операционные затраты;
- возможность проводить как вертикальные, так и горизонтальные операции.



Рисунок 11 – Электродинамический вибростенд LDS V650

1.4.3 Система управления вибростендом Bruel and Kjaer VC-LAN 7542

Предназначена для проведения вибропрочностных, ударных и усталостных испытаний материалов и элементов конструкций на вибростендах. Необходима для формирования сигнала и контроля уровня виброускорений на вибростенде LDS V650. Позволяет реализовывать режимы управления с обратной связью при случайном, синусоидальном и ударном нагружении.

Технические характеристики:

- управление вибростендом с компьютера посредством Ethernet и Wi-Fi соединения;
- управление вибростендом без использования ПК;

									Лист
									30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

- внутренняя энергонезависимая память объёмом 32 Мб;
- поддержка флеш-карты памяти; наличие на корпусе контроллера информационного ЖК-дисплея размерами 100x25 мм;
- связь с другими модулями при многоканальной конфигурации; работа от сети с переменным напряжением 100-240 В, 50 Гц;
- работа от сети с постоянным напряжением 12-15 В;
- внутренняя перезаряжаемая батарея, обеспечивающая 15 минут автономной работы;
- работа при температуре окружающей среды от -10 °С до +55 °С.
- Характеристики входных каналов(входы):
- число каналов: 4 шт.;
- прямое подключение датчиков:
 - 1) с постоянным напряжением;
 - 2) с переменным напряжением;
 - 3) с выходом по заряду;
 - 4) содержащих технологию TEDS;
 - 5) содержащих технологию ICP;
 - 6) входы с полным сопротивлением 500 кОм.
- частота анализа —102 кГц;
- максимальное значение входного сигнала ± 36 В без повреждения; динамический диапазон –130 дБ;
- погрешность частоты: 0,01%. Характеристики выходных каналов (Выходы управляющие): число каналов возбуждения –1 шт.;
- 24-битный аналого-цифровой преобразователь с аналоговым фильтром и цифровым фильтром защиты от наложения спектров;
- цифровой фильтр с затуханием 160 дБ/октава и аналоговый фильтр для защиты от наложения спектров и появления фазовых искажений;
- частота анализа: 102 кГц;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

- диапазон напряжений ± 10 В, с программируемым затуханием;
- разрешение: 24 бит;
- динамический диапазон: 100 дБ.



Рисунок 12 – Система управления вибростендом Bruel and Kjaer VC-LAN 7542

1.4.4 Система сбора и анализа данных LMS Scadas Recorder

Система сбора и анализа данных используется при тензоизмерениях, термометрированиях, проведении ходовых испытаний транспортных средств.

Предназначена для экспериментальной регистрации деформаций, виброускорений, звуковых давлений. Система сбора обеспечивает возможность подключения источников переменного и постоянного напряжения, а также датчиков ICP, таких как акселерометры и микрофоны. Система позволяет подключать тензометры (до 40 каналов). Имеет автономный режим работы, предназначена для применения при ходовых испытаниях транспортных средств. Позволяет выполнять сбор данных в полевых условиях. □

Основные технические характеристики:

- Максимальное число каналов: 40;
- Максимальная частота дискретизации: 204,8 кГц;
- Динамический диапазон: 150 дБ;
- Входной разъем для подключения датчиков: BNC;
- Количество каналов для измерения звуковых давлений и ускорений: 40;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

- Количество каналов для измерения температур: 16.



Рисунок 13 – Система сбора и анализа данных LMS Scadas Recorder

1.4.5 Акселерометр 333В32

Акселерометр - датчик перегрузок или ускорений, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Как правило, акселерометр представляет собой чувствительную массу, закреплённую в упругом подвесе. Отклонение массы от её первоначального положения при наличии кажущегося ускорения несёт информацию о величине этого ускорения [4].

Все акселерометры имеют пьезокерамические чувствительные элементы, обеспечивающие высокий уровень выходного сигнала при малых вибрационных воздействиях на входе. Применение для корпусов датчиков ультралегких материалов исключает влияние их массы на объект исследования. Датчики обладают минимальным рассеянием фазы, что является важным фактором для анализа форм колебаний. При помощи связующего датчики кубической формы удобно устанавливать на любые поверхности.

Был выбран потому, что его частотный диапазон покрывает интересующий нас и из-за его малой массы, так как один акселерометр крепился на мембрану датчика.

Таблица 2 – Технические характеристики акселерометра 333В32

Характеристики	Значения
Чувствительность ($\pm 15\%$)	100 мВ/г
Динамический диапазон	± 50 г
Частотный диапазон ($\pm 5\%$)	0,5 – 3000 Гц
Резонансная частота	≥ 40 кГц
Фазовый отклик ($\pm 5\%$)	2 - 3000 Гц
Разрешение	0,0015 м/с ² (СКЗ)
Нелинейность	≤ 1 %
Поперечная чувствительность	≤ 5 %
Внешние параметры	
Предел нагрузки (ударной)	± 5000 г (пик)
Температурный диапазон	-18до +66 °С
Чувствительность к деформации крепления	0,1 (м/с ²)/ $\mu\epsilon$
Аппаратные	
Чувствительный элемент	Керамика
Изоляция	Герметичный
Материал корпуса	Титан
Размер	10,2 x 16,0 x 10,2 мм
Масса	4,0 грамма
Разъем	10-32 Coaxial Jack
Расположение разъема	Боковой



Рисунок 14 – Акселерометр 333В32

Вывод по разделу один

Проведённый обзор позволяет сделать следующие выводы:

1. Проанализировав исследования, касающиеся определения частотных характеристик, выяснили необходимую теоретическую основу необходимую для составления методики снятия динамических характеристик.

2. Подобрали оборудование необходимое для сборки стенда, используемого для определения динамических характеристик датчика.

3. Интерактивная среда MATLAB, благодаря имеющимся библиотекам работы с измерительным оборудованием и своим возможностям, удобна для реализации необходимых нам функций, в частности функции быстрого преобразования Фурье.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Преобразование Фурье

Преобразование Фурье используется как средство при решении уравнений, описывающих динамические процессы, возникающие под действием электрической, тепловой или световой энергии, при интерпретации наблюдений в астрономии, медицине, химии. Впервые Фурье применил свой метод для объяснения механизма теплопроводности на примере распространения тепла по яркому кольцу, показав, что распределение тепла приобретает форму синусоиды [8].

После доказательства сходимости рядов Фурье стало возможным появление теории обобщённых функций, благодаря которой преобразование Фурье стало применимым к решению уравнений, содержащих понятия точечная масса, точечный разряд, сосредоточенная нагрузка на балке.

В биологии форма двойной спирали ДНК была открыта в 1962 г. с использованием дифракции рентгеновских лучей и с применением анализа Фурье. С помощью анализа Фурье специалисты по аэронавтике и исследованию космического пространства повышают чёткость изображений фотоснимков небесных тел. Информацию искусственных спутников компьютеры обрабатывают с помощью методов Фурье.

Преобразование Фурье используется в физике плазмы, полупроводниковых материалов, сейсмологии, радиолокации, океанографии, микроволновой акустике, медицине и других областях [8].

Преобразование Фурье является одним из распространённых традиционных методов спектрального анализа [1]. К сожалению, данное преобразование является непараметрическим методом, который предназначен для оценки всего спектра, следовательно, для точечной оценки значений частот его использовать проблематично. Также длительность анализируемого сигнала влияет на

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

ограничение разрешения по частоте. Это обстоятельство существенно ограничивает применение быстрого преобразования Фурье для оценки спектра коротких сигналов.

Периодические сигналы могут быть разложены в ряд Фурье, при этом они являются суммой комплексных экспонент или гармонических функций с частотами, образующими арифметическую прогрессию. Для разложения необходимо выполнение условий Дирихле:

- число экстремумов должно быть конечным;
- число разрывов первого рода должно быть конечным;
- не должно быть уходящих в бесконечность ветвей функции.

Формула непосредственного расчёта коэффициентов \dot{C}_k , ряда Фурье в комплексной форме:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \exp(-k\omega_1 t) dt. \quad (8)$$

Преобразование Фурье – может применяться для спектрального анализа непериодических сигналов, путём превращения функции в периодическую с повторяющимся интервалом.

Представив последовательность импульсов в произвольном виде, для неё формируется ряд Фурье и не изменяя форму одиночных импульсов увеличивается период их повторения, промежутки заполняются нулевым значением, и далее опять рассчитываются коэффициенты.

Из формулы (8) видно, что нам приходится высчитывать тот же самый интеграл, но для более близко расположенных частот $\omega_k = k\omega_t$. Меняя пределы интегрирования существенно ничего не меняется, так как на добавившемся между импульсами пространстве сигнал имеет нулевое значение [17]. Уменьшение

									Лист
									37
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

общего уровня гармоник при делении результата интегрирования на увеличивающийся период T – это единственное дополнительное изменение.

Ввиду этого, при увеличении периода следования импульсов общий уровень спектральных составляющих уменьшается, а гармоники будут располагаться ближе друг к другу по частоте, это не вносит изменений в вид вычисляемого интеграла (8).

Если же период направить в бесконечность, вся частотная ось будет занята гармониками спектра, а их амплитуды станут бесконечно малыми, однако это не повлияет на взаимное соотношение между уровнями гармоник, оно останется неизменным, и будет определяться тем же интегралом (8).

Таким образом, при осуществлении спектрального анализа непериодических сигналов выполняется модификация формулы для расчета коэффициентов комплексного ряда Фурье:

- функция частоты $S(\omega)$ является результатом вычислений вместо нумерованных коэффициентов ряда C_k – спектральная функция сигнала $s(t)$;
- частота становится непрерывным параметром преобразования и перестает дискретно изменяться (то есть $k\omega_1$ в формуле (8) заменяется на ω);
- убирается множитель $1/T$.

После внесения корректировок в интеграл (8), он приобретает форму прямого преобразования Фурье:

$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (9)$$

Для осуществления преобразования Фурье необходимо, чтобы сигнал удовлетворял следующим требованиям:

- выполнение условий Дирихле;
- Интеграл от модуля сигнала должен быть конечной величиной:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)| dt < \infty.$$

									Лист
									38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

Таким образом, преобразование Фурье (9) ставит в соответствие спектральную функцию заданному во времени сигналу. Выполняется переход в частотную область из временной. Преобразование Фурье является взаимно-однозначным, а значит представление сигнала в частотной области (спектральная функция) будет содержать ровно столько же информации, как и в исходном сигнале, который задан во временной области [17].

Таблица 3 – Характеристики преобразования Фурье

	Достоинства	Недостатки
Преобразование Фурье	Прост в использовании	Имеет принципиальное ограничение на разрешение по частоте
	Является обратимым	Невозможность отслеживания изменения спектральной плотности сигнала во времени
	Преобразует сложную операцию в элементарное умножение	

2.2 Быстрое преобразование Фурье

Суть быстрого преобразования Фурье заключается в переходе от прямого способа вычисления дискретного преобразования Фурье к двумерному преобразованию в случае, если длина самого преобразования является составным числом. Самым распространенным способом подобного перехода является алгоритм Кули-Таки, упрощённая структура которого изображена на рисунке 13.

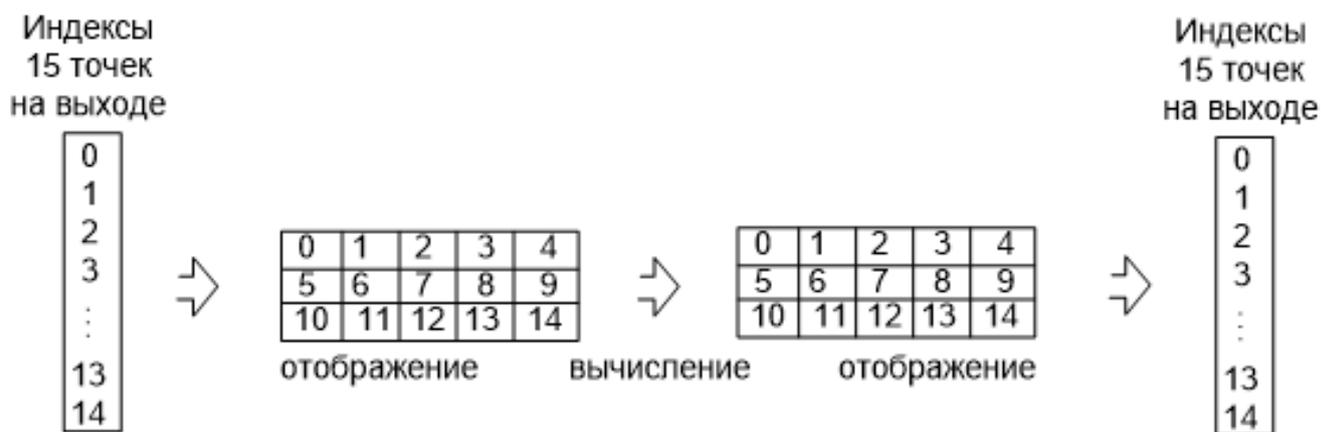


Рисунок 15 – Пример переиндексации по методу Кули-Таки

В настоящее время самой эффективной и скоростной реализацией алгоритма БПФ является аппаратная реализация. Алгоритм непрерывного конвейерного БПФ изображен на рисунке 16.

Входные отсчеты поступают на нулевую ступень (Stage 0) конвейера. Основание БПФ напрямую зависит от длины самого преобразования N . Если алгоритм БПФ имеет основание два, это значит, что N равно 2^n . Чаще всего в современных системах используются алгоритмы Кули-Таки по основанию два с прореживанием по времени. Нулевая ступень представляет собой «бабочку» по основанию 2 и память, размер которой зависит от количества точек БПФ N . Размер памяти первой ступени равен $N/2$. На первом этапе в память Stage 0 запоминаются все $N/2$ отсчетов, после чего согласно правилу битовой инверсии для БПФ с прореживанием по частоте, происходят операции сложения и умножения для первой ступени. Точно так же для операции умножения и сложения с накоплением происходят и для всех остальных этапов БПФ [8].

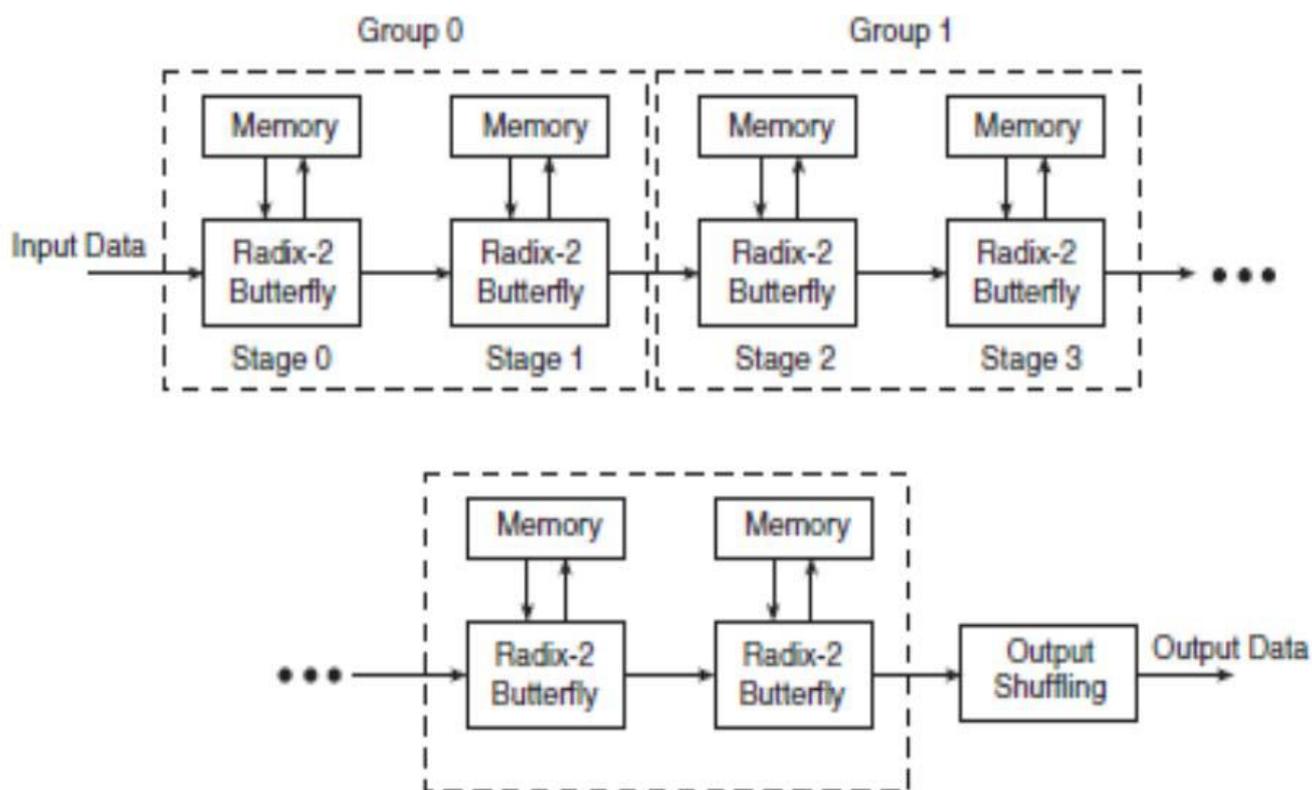


Рисунок 16 – Поточковый конвейерный алгоритм БПФ

Таким образом, конвейерный алгоритм БПФ позволяет непрерывно подавать отсчеты данных и получать результат ДПФ на выходе устройства. Можно однозначно сказать, что максимальную производительность для длины преобразования $2n$ обеспечивает конвейерный алгоритм.

Пакетная реализация на основе «бабочки» по основанию 2 изображена на рисунке 14. Данный алгоритм вычисления ДПФ встречается наиболее часто в системах цифровой обработки сигналов. Назначение его, как и всех алгоритмов БПФ, состоит в уменьшении вычислительной сложности осуществляемого ДПФ.

Для начала вычислений схеме необходимо накопить достаточное количество отсчетов текущего окна и до тех пор, пока текущее окно не будет посчитано, отсчеты следующего окна не могут быть поданы на вход цифровой схемы.

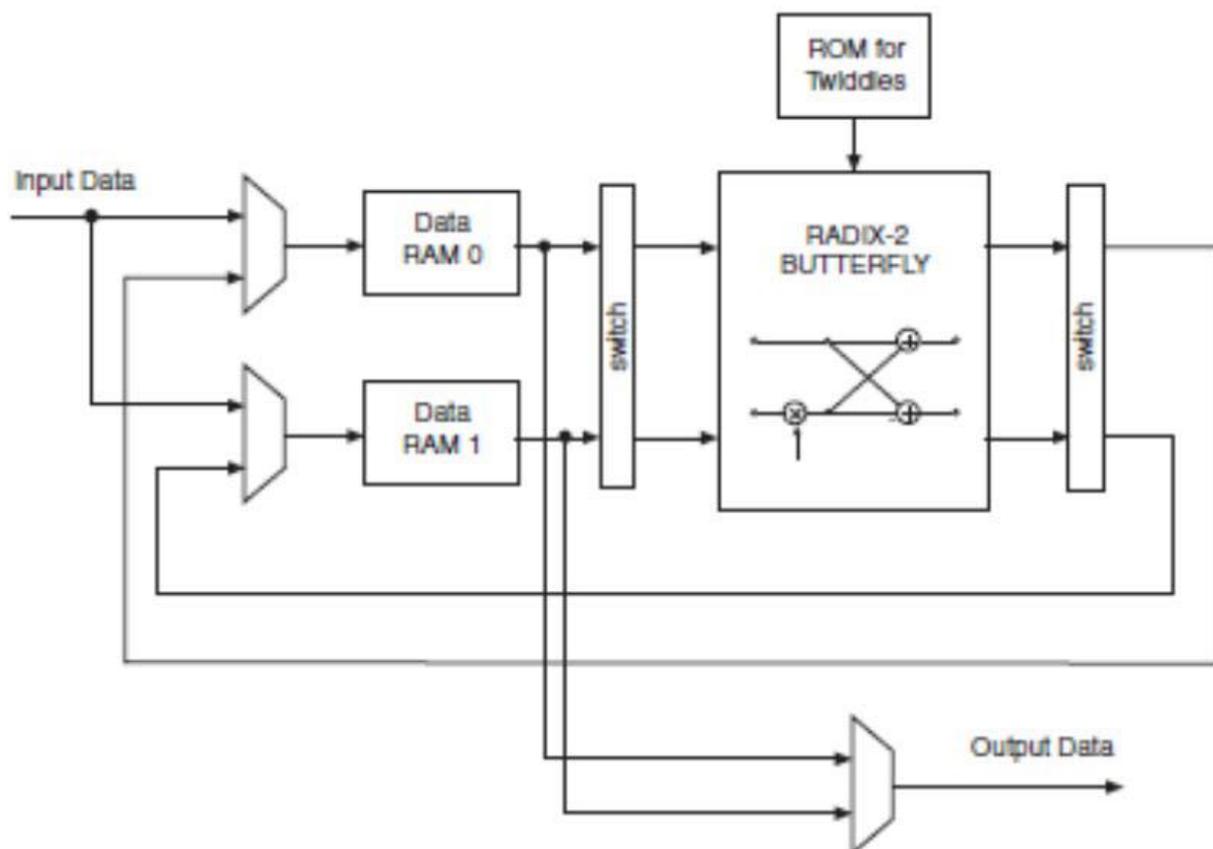


Рисунок 17 – Пакетный алгоритм БПФ «бабочкой» основанию 2

К сожалению, данный алгоритм может работать только в пакетном режиме. Чтобы обработать окно входных данных ему необходимо накопить достаточное количество данных, а затем начать вычисления. До того, как вычисления закончатся, новое окно (пакет) данных не может быть подан. Эта реализация может работать в реальном масштабе времени, но скорость потока входных данных должна быть существенно меньше скорости, с которой работает цифровая схема алгоритма [8].

2.3 Реализация БПФ в MATLAB

В MATLAB есть встроенная функция для быстрого преобразования Фурье, синтаксис которой выглядит следующим образом:

$$Y = \text{fft}(X, n), \quad (10)$$

где X – массив данных;

n – его длина.

Функция (10) вычисляет n -точечное дискретное преобразование Фурье. Если длина массива $\text{length}(X) < n$, то недостающие строки массива X заполняются нулями; если длина массива $\text{length}(X) > n$, то лишние строки удаляются.

Фрагмент написанного для работы кода:

```
y=fft(qwe,Nfft); % qwe записанный с осциллографа сигнал, Nfft длина
Pyy = y.* conj(y)/Nfft; % комплексное сопряжение
ff = (fs*(0:(Nfft-1))/Nfft)'; % частоты по оси x
Plot (ff, Pyy(1:Nfft/2)); % графическое отображение
```

Время быстрого преобразования Фурье в существенной мере зависит от длины последовательности, то есть вычисление занимает гораздо меньше времени если значение длины точно разлагается на простые множители, в противном случае, если не все множители являются простыми, время вычисления значительно возрастёт, даже если их будет меньше.

Из недостатков программного пакета MATLAB можно отметить нестабильную работу с большими объёмами данных, из-за чего в некоторых случаях приходилось прореживать записанные массивы данных, что вызывало лишь неудобства при работе и не отразилось на итоговых результатах.

									Лист
									43
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

Также был написан код для чтения и записи сигналов с осциллографа, но из-за того, что возникали некоторые проблемы при записи сигналов большого объёма, вместо осциллографа была выбрана система сбора и анализа данных LMS Scadas Recorder.

Вывод по разделу два

1. Преобразование Фурье является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал с его представлением в частотной области.

2. Преобразование Фурье является параметрическим методом, который предназначен для оценки всего спектра, следовательно, для точечной оценки значений частот его использовать проблематично.

3. В настоящее время самой эффективной и скоростной реализацией алгоритма БПФ является аппаратная реализация.

4. Быстрое преобразование Фурье машинный метод и его легко реализовать программно, так как в MATLAB есть специальные функции для этого.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	44
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

3 РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СНЯТИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Описание конструкции стенда для снятия динамических характеристик

Для проведения опытов использовался стенд, собранный в лаборатории экспериментальной механики ЮУрГУ, схема которого представлена на рисунке 18.

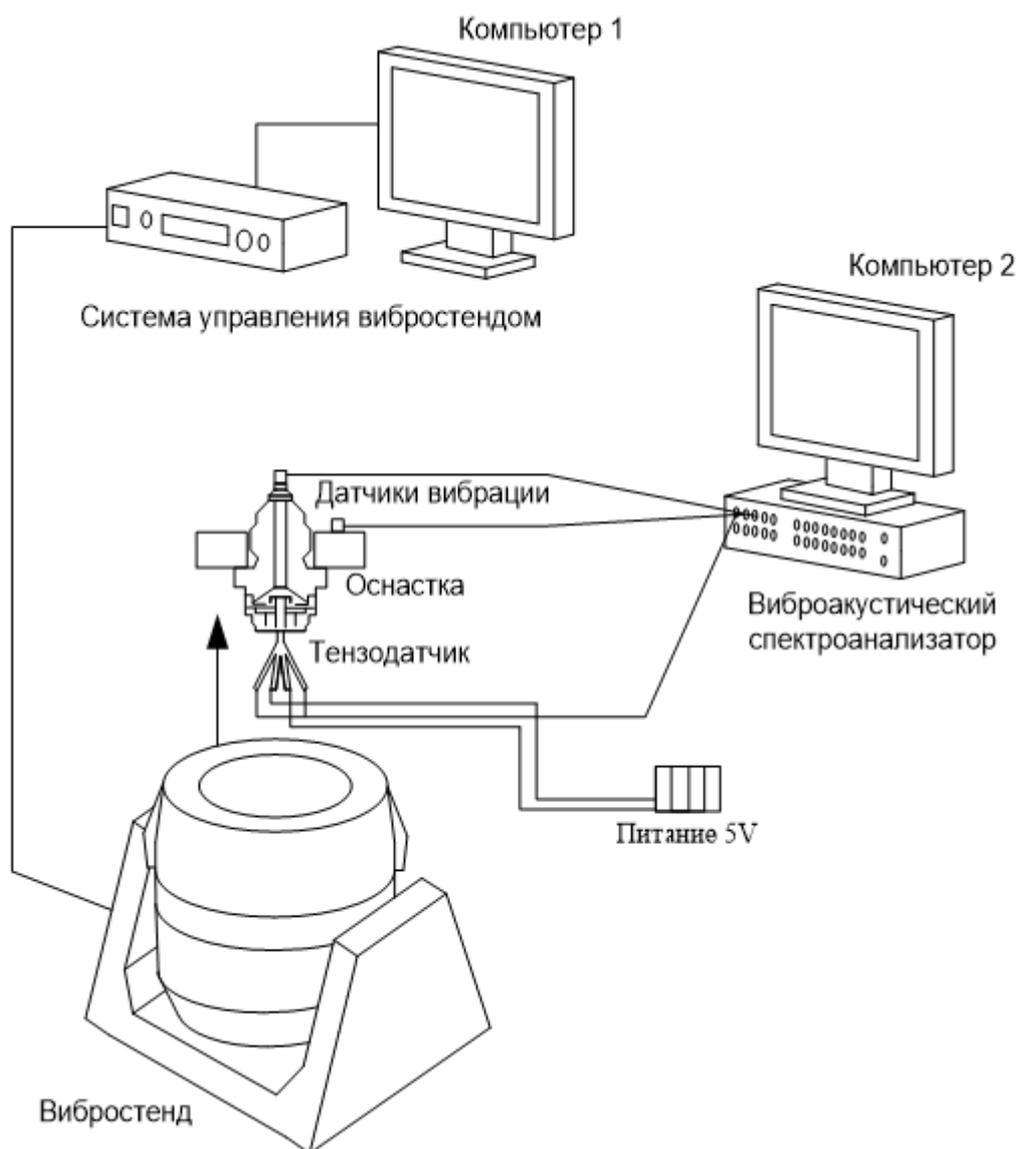


Рисунок 18 – Схема стенда

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

Преобразователь давления крепится к оснастке вибростенда, питается напряжением 5В, сигнал с датчика поступает на виброакустический спектроанализатор LMS Scadas Recorder. Также на оснастку вибростенда LDS V650 и на тензопреобразователь давления 2130М2ДИ крепятся датчики вибрации (рисунок 19).

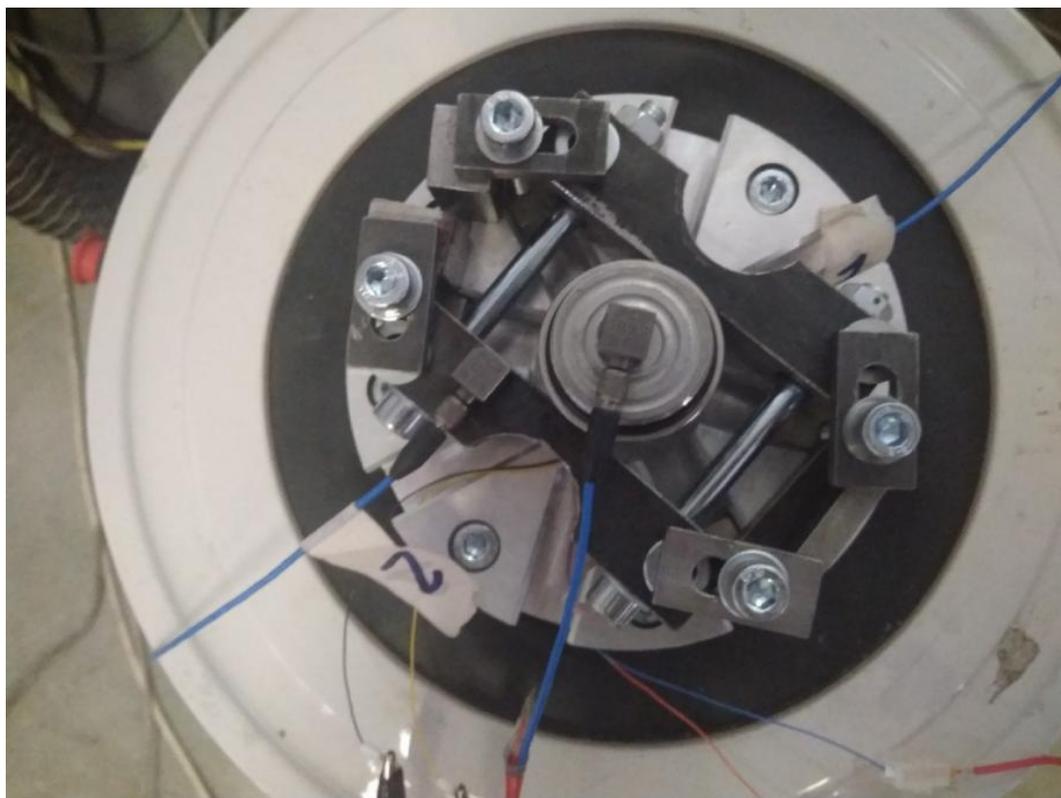


Рисунок 19 – Крепление датчика к оснастке

Сигнал с акселерометров поступает на виброакустический спектроанализатор LMS Scadas Recorder (Рисунок 20).

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	46
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

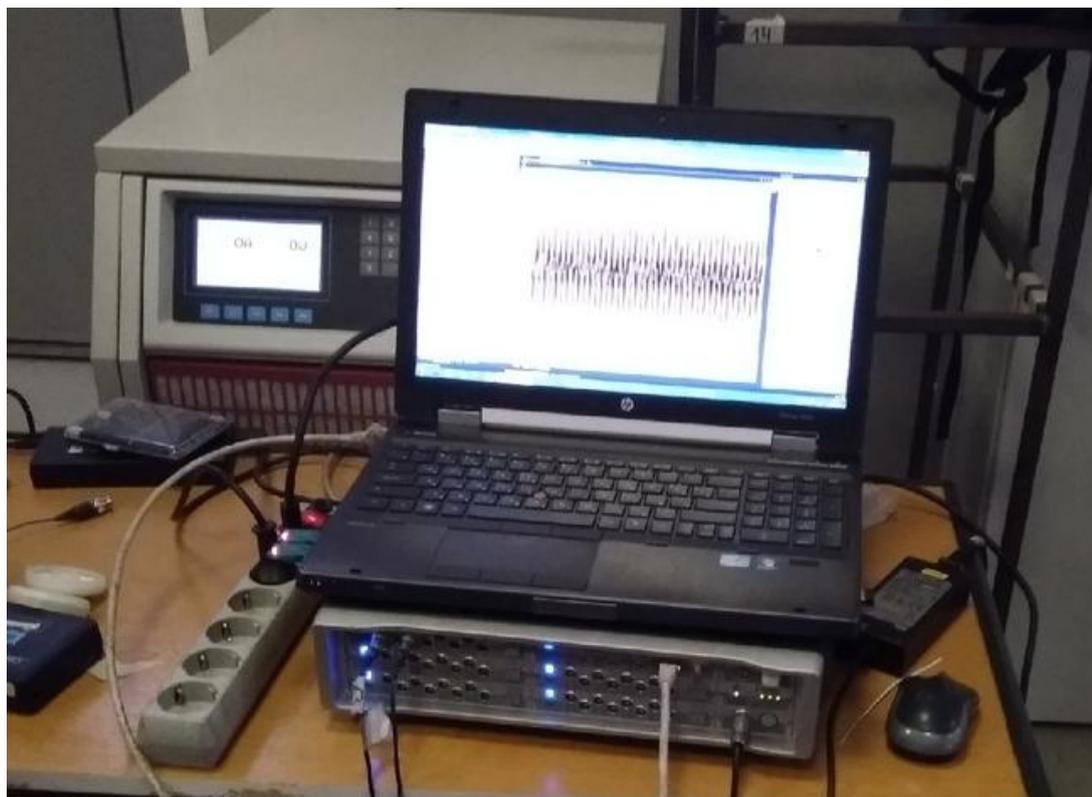


Рисунок 20 – виброакустический спектроанализатор LMS Scadas Recorder

Механические колебания тензопреобразователя давления возбуждаются вибрацией вибростенда. Диапазон частот, продолжительность воздействия и скорость увеличения частоты задаётся с помощью программы Vibration Controller. Задав нужные нам значения в программе, система управления вибростендом Bruel and Kjer VC-LAN 7542 передаёт команду на вибростенд LDS V650 (рисунок 21).

Получаемые сигналы отображаются в программе LMS Test Express, где для удобства можно настроить масштаб и частоту дискретизации, также можно записать сигналы с необходимой нам продолжительностью.

Для обработки записанных сигналов использовалась программа Matlab, для этого был специально написан код, представленный в приложении А.

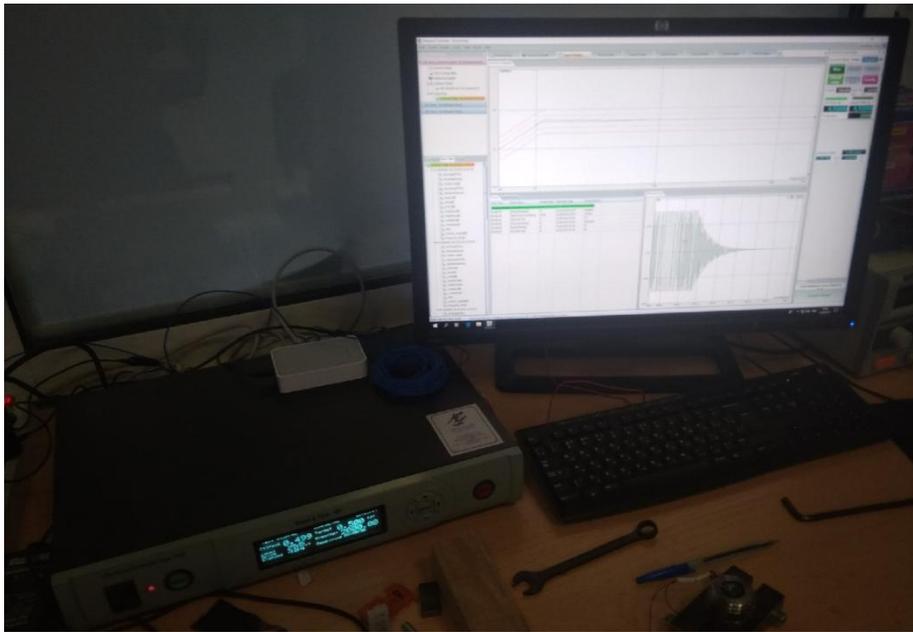


Рисунок 21 – система управления вибростендом Bruel and Kjer VC-LAN 7542

3.2 Снятие динамических характеристик

С помощью программы Vibration Controller задавали диапазон частот, продолжительность воздействия и скорость увеличения частоты (рисунок 22).

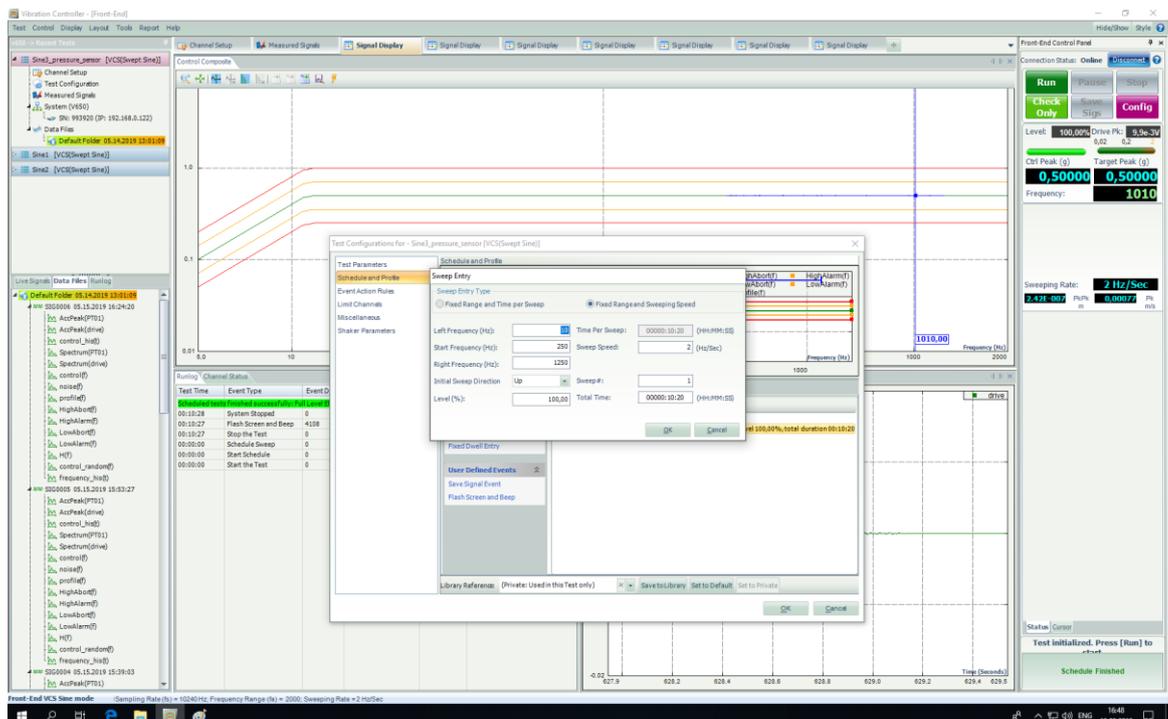


Рисунок 22 – Окно программы управления вибростендом

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист 48
------	------	----------	-------	------	-----------------------------------	------------

Для первого тестового опыта, чтобы приблизительно увидеть резонансные частоты, задавали следующие параметры:

- Диапазон частот от 10 до 2000 Гц;
- Линейное изменение частоты;
- Скорость увеличения частоты 5 Гц в секунду;
- Продолжительность ≈ 7 минут.

Полученные сигналы представлены на рисунках 23 и 24.

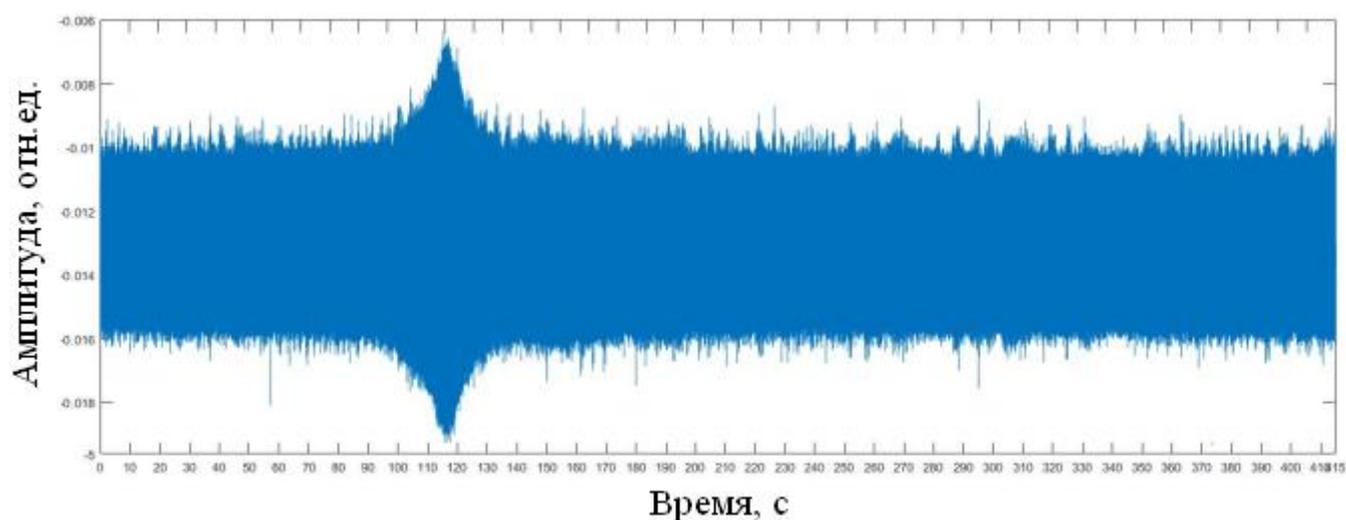


Рисунок 23 – Выходной сигнал преобразователя давления

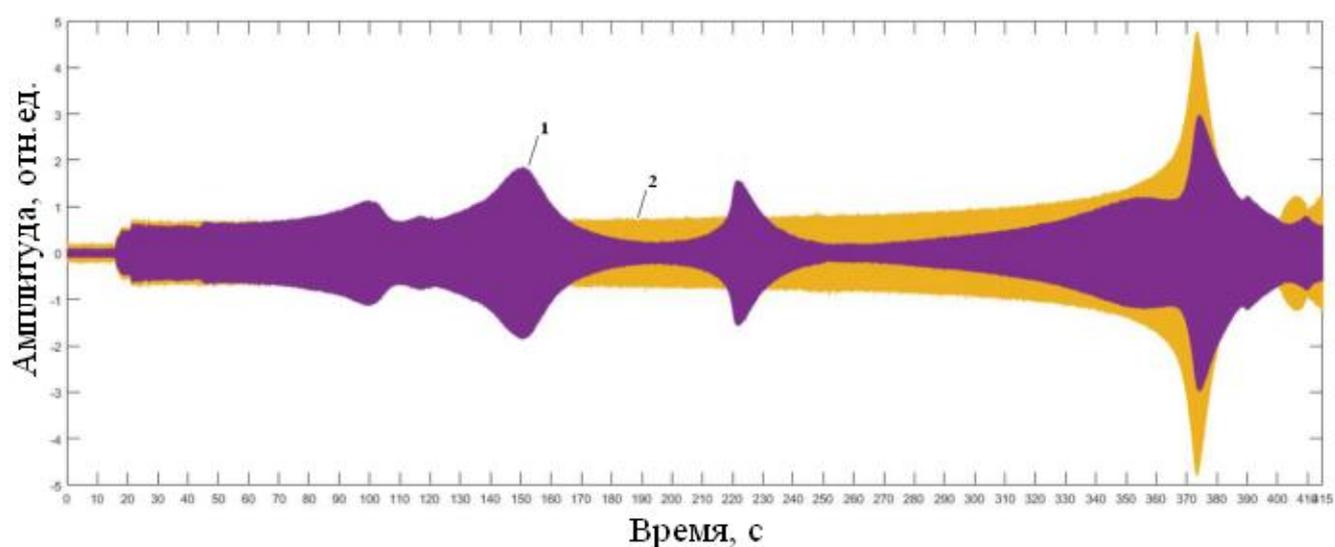


Рисунок 24 – Выходной сигнал акселерометров на датчике (1) и оснастке (2)

Определив резонансные частоты провели контрольный опыт, задав следующие параметры:

- Диапазон частот от 250 до 1250 Гц
- Линейное изменение частоты;
- Скорость увеличения частоты 2 Гц в секунду
- Продолжительность \approx 9 минут.

Полученные сигналы представлены на рисунке 25.

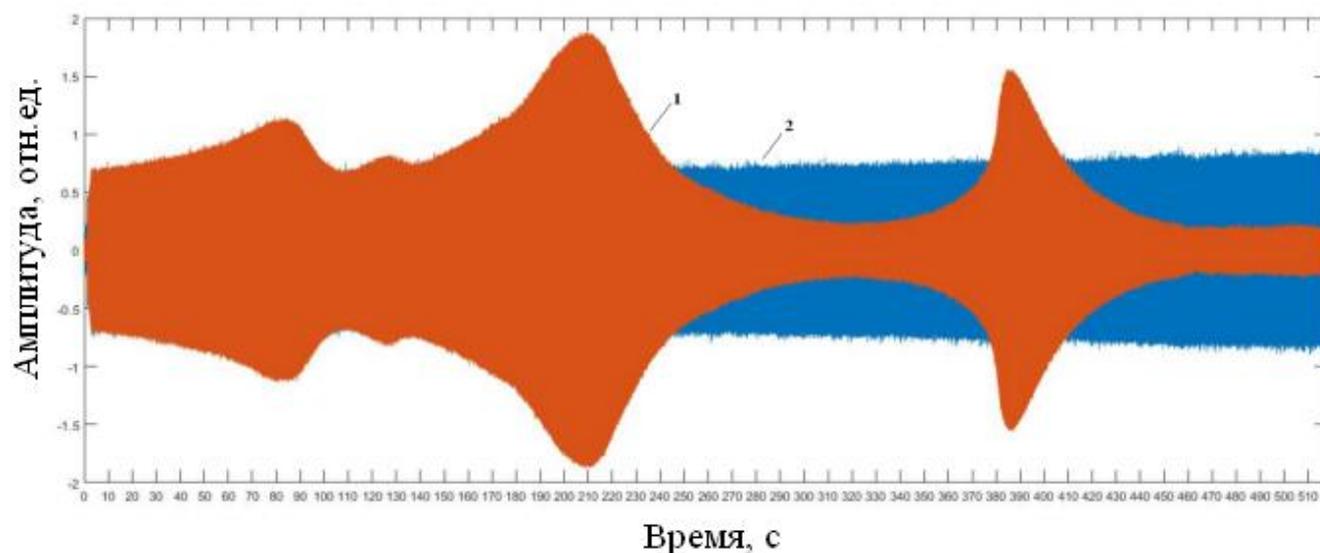


Рисунок 25 – Выходной сигнал акселерометров на преобразователе давления (1) и оснастке (2)

С помощью пакета программ MATLAB и реализованного в нём кода нашёл АЧХ датчика.

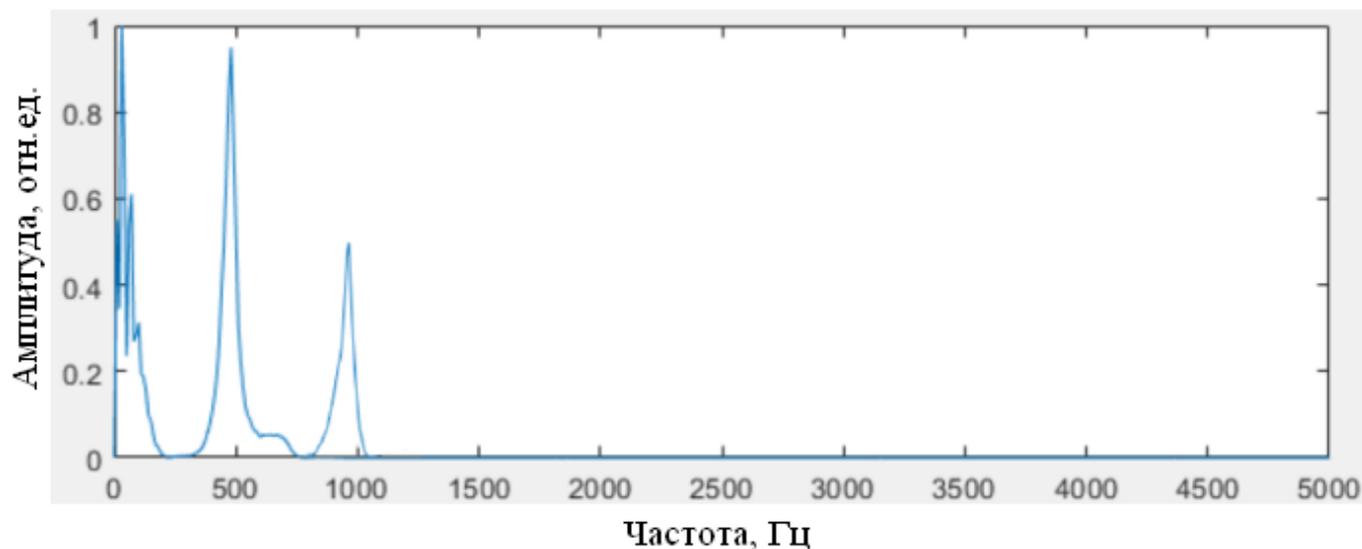


Рисунок 26 – АЧХ преобразователя давления

На рисунке 23 видно, что на частоте около 600 Гц есть резонанс влияющий на выходной сигнал. Чтобы проверить влияние данного резонанса на отклонение выходного сигнала, провели ряд опытов, прикладывая такое давление, чтобы на выходе получить 50, 100, 150, 200, 250 и 300 мВ. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Разница выходных напряжений

В нормальных условиях, мВ	При воздействии вибрации, мВ
50	63
100	124
150	177
200	229
250	280
300	318

По полученным данным построил график для наглядности.

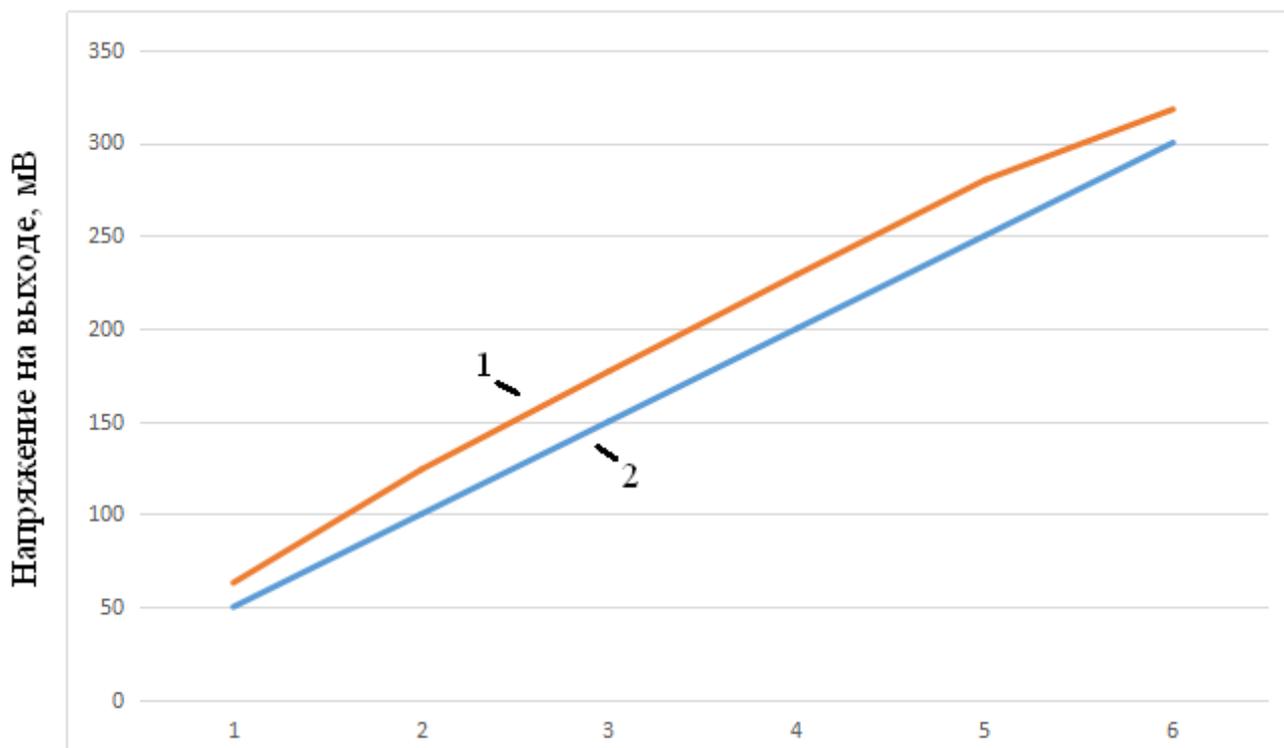


Рисунок 27 – Разница выходных напряжений преобразователя давления, в нормальных условиях (2) и при воздействии вибрацией (1)

Также аналогичные опыты были проведены для другого преобразователя давления схожей конструкции, со следующими параметрами:

- Диапазон частот от 250 до 1250 Гц;
- Линейное изменение частоты;
- Скорость увеличения частоты 2 Гц в секунду;
- Продолжительность \approx 9 минут.

Полученные сигналы представлены на рисунках 28 и 29.

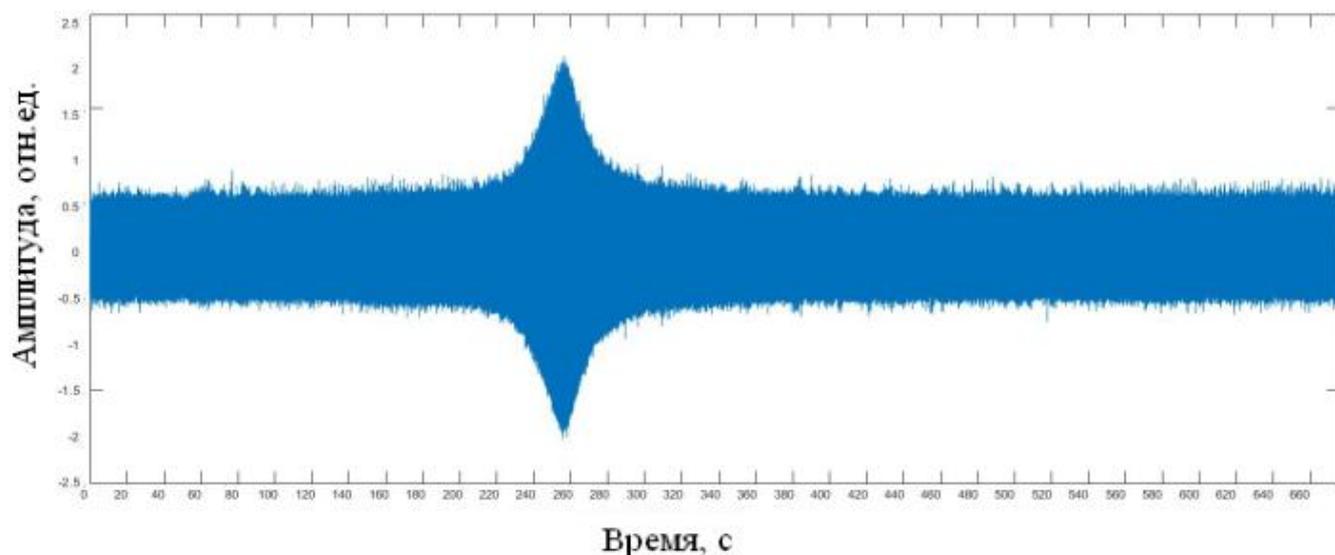


Рисунок 28 – Выходной сигнал второго преобразователя давления

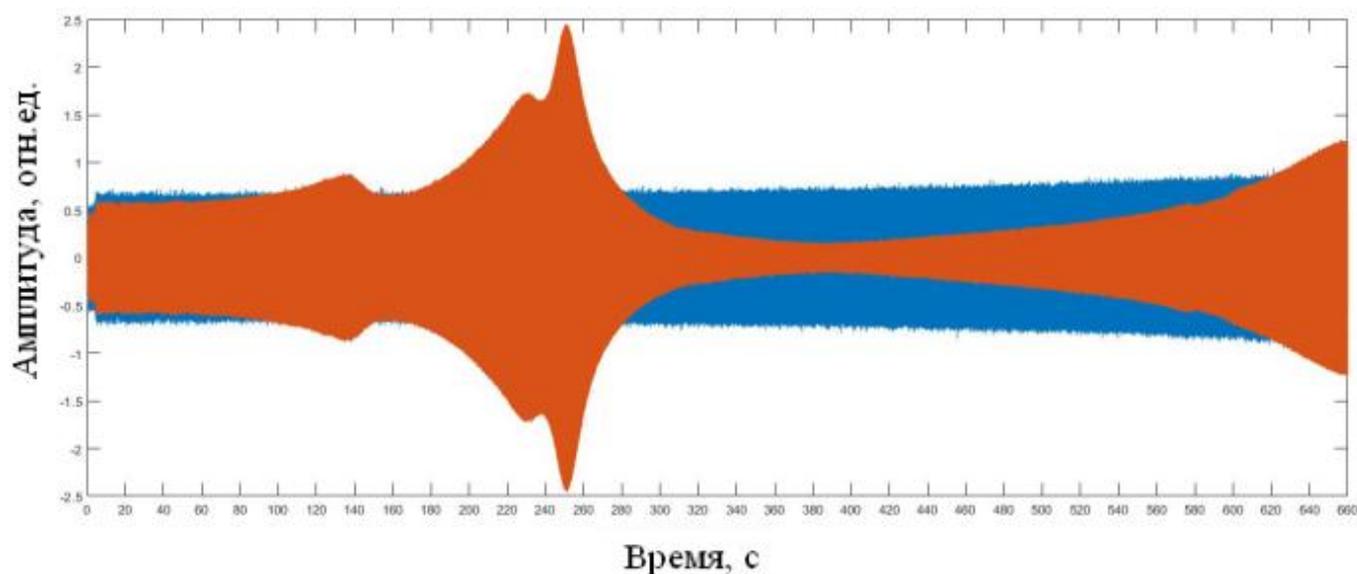


Рисунок 29 – Выходной сигнал акселерометров на втором преобразователе давления (1) и оснастке (2)

Как видно на рисунке 24, резонансная частота 2 преобразователя находится на частоте около 510 Гц, что на 90 Гц меньше чем у первого. Чтобы проверить влияние данного резонанса на отклонение выходного сигнала, мы провели аналогичные опыты, как и для первого преобразователя. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Разница выходных напряжений

В нормальных условиях, мВ	При воздействии вибрации, мВ
50	73
100	144
150	199
200	245
250	288
300	318

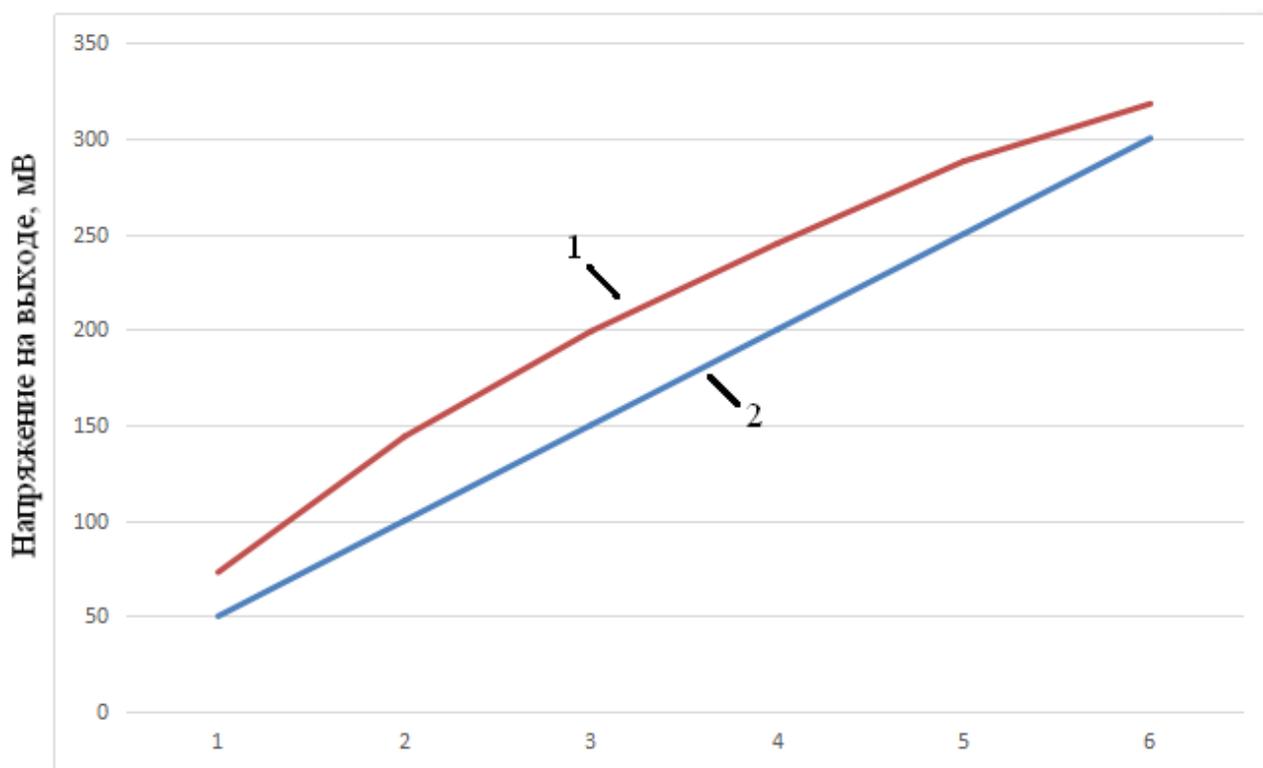


Рисунок 30 – Разница выходных напряжений второго преобразователя давления, в нормальных условиях (2) и при воздействии вибрацией (1)

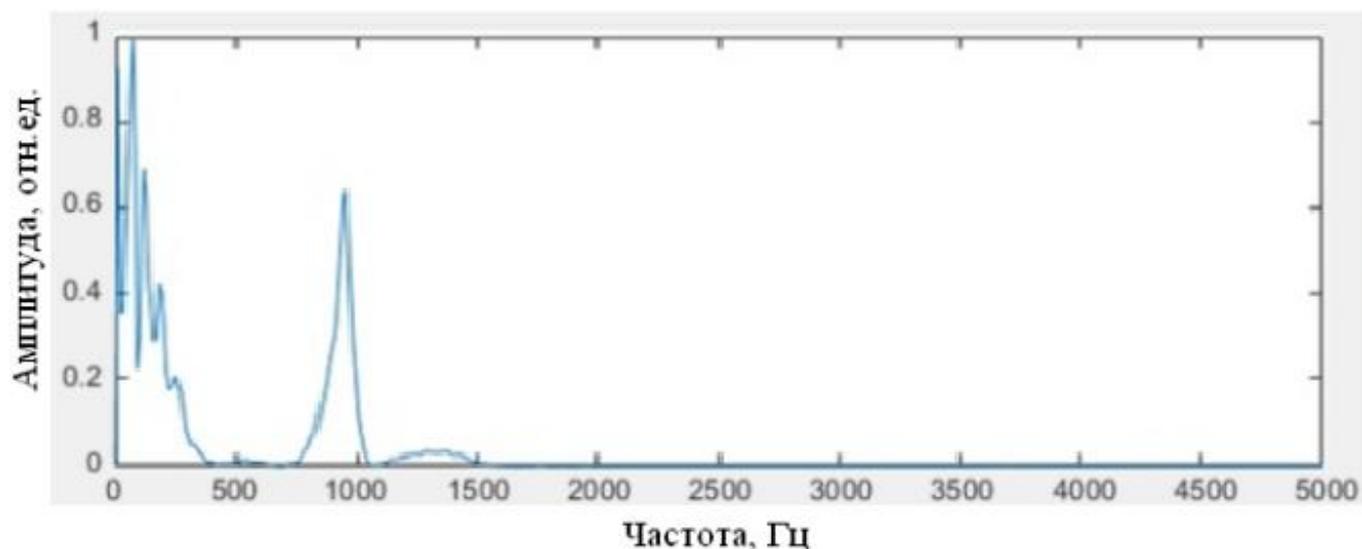


Рисунок 31 – АЧХ второго преобразователя давления

3.3 Анализ полученных данных

На частотах выше 1800 Гц возбуждаются собственные частоты оснастки, из-за этого увидеть резонансные частоты датчика нельзя. Поэтому для контрольного опыта брался диапазон не охватывающий частоты выше 1800 Гц.

Резонанс на частоте 600 Гц для первого преобразователя и 510 Гц для второго, может быть вызван собственными частотами тензопреобразователя, выходной сигнал также имеет увеличение амплитуды на данной частоте. Введу этого имеется отклонение выходного значения от истинного значения измеряемого давления, если датчик подвергается вибрации с данной частотой или измеряется синусоидальное давление данной частоты.

Также у первого преобразователя имеются резонансные частоты на 410, 690 и 1030 Гц, однако на выходном сигнале датчика это не отражается. Для второго преобразователя количество резонансных частот меньше и находятся они на других частотах.

Как видно по полученным графикам, резонансные частоты индивидуальны для каждого преобразователя, что соответствует теоретическим данным. Также видно, что амплитуда резонансной частоты на выходе второго преобразователя

несколько больше, что привело к большим отклонениям измеряемой величины под воздействием резонансной частоты на преобразователь.

На полученной АЧХ тензопреобразователя давления хорошо видны частотные пики. По этим пикам можно определить изменение конструктивных особенностей датчика, и его возможную метрологическую неисправность.

Вывод по разделу три

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Наличие вибраций в области резонансных частот тензопреобразователя, влияет на достоверность выходного сигнала.

2. Динамические характеристики индивидуальны для каждой системы, даже одинаковой конструкции.

3. Так как датчик крепится к оснастке, то в области резонансных частот оснастки невозможно определить резонансные частоты датчика.

4. Резонансные частоты и спектральные характеристики индивидуальны для разных датчиков.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	56
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе литературы и имеющихся в данной области исследований, был выбран метод получения частотных характеристик датчика давления, также на их основе была разработана методика с использованием вибростенда. Было выбрано оборудование необходимое для реализации стенда, использовавшегося для получения частотных характеристик. Собран стенд и проведены опыты, результаты которых представлены графически в данной работе. В программном пакете MATLAB написан код, реализующий быстрое преобразование Фурье, необходимый для получения амплитудно-частотной характеристики датчика давления.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Определение динамических характеристик с помощью вибростенда просто в реализации.

2. Из-за большого объёма записываемого сигнала замедляется его последующая обработка.

3. В области резонансных частот осадки нельзя увидеть есть ли резонансные частоты у датчика.

4. Резонансные частоты и спектральные характеристики индивидуальны для каждого преобразователя.

5. Резонансные частоты тензопреобразователя влияют на выходной сигнал.

Достигнута цель работы - разработать методику применимую для получения динамических характеристик, собрать стенд и провести опыты, получить АЧХ преобразователя давления.

									Лист
									57
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартиформ, 1986. – 20 с.

2.ГОСТ Р 8.734-2011 Государственная система обеспечения единства измерений ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М.: Стандартиформ, 2012. – 20 с.

3.ГОСТ Р 8.673-2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2010. – 12 с.

4.ГОСТ 18955-73 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 1973. – 14 с.

5.Бушуев, О. Ю. Компьютерное моделирование преобразователей давления и численные методы для оценки их технического состояния / О. Ю. Бушуев. – Челябинск, 2015. – 177 с.

6.Бушуев, О. Ю. Применение метода прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – № 23. – с. 219-221.

7.Бушуев, О.Ю. Экспериментальное исследование возможности диагностики состояния тензометрического преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – №35(294). – вып. 17. – с. 65-68.

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

8. Гушин, А. В. Современные методы и средства реализации алгоритмов быстрого преобразования Фурье в информационных системах / А.В. Гушин, В.Л. Литвинов // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. – 2013. – С. 564-567

9. Ибряева, О.Л. Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним / О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 1. с. 26–37.

10. Иосифов, В. П. Обработка сигналов с применением метода Прони / В. П. Иосифов // Ессентукский институт управления, бизнеса и права. Вестник Ессентукского института управления, бизнеса и права. – 2016. – №13. – С. 98-102

11. Коломейцева, А.В. Применение вейвлет-преобразования и метода Прони для идентификации биогенных сигналов / А.В. Коломейцева, Г.В. Мишугова, А.П. Мул, Г.Ю. Рябых // Вестник ДГТУ. Физико-математические науки. – 2010. – №4(47). – с. 455-465

12. Львов, А.А. Оценивание параметров квазигармонических сигналов методом максимального правдоподобия / А.А. Львов, В.П. Глазков, В.П. Краснобельмов, Р.С. Коновалов, М.А. Соломин // Вестник СГТУ. Измерительная техника и приборостроение. – 2014. – №4 (77). – С. 147-154

13. Мясникова, М. Г. Измерение параметров электрических сигналов на основе метода Прони : дис. – Диссертация на соискание ученой степени к. т. н., Пенза, 2007.

14. Пат. 145163 Российская Федерация, МПК: G01L9/00. Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля. / Семенов А.С., Сеницын В.В., Бушуев О.Ю. – № 2014102137/28; заявл. 22.01.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. – 2 с.

15. Рабинер, Л Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.

						ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист 59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.			

16. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

17. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко — СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

18. Терехина, А.В. Исследование влияния параметров регистрации и обработки данных на погрешность восстановления сигнала при использовании метода декомпозиции на эмпирические моды / А.В. Терехина // Метрологическое обеспечение измерительных систем: сб. докл. VII науч.-техн. Всерос. конф. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. - с. 5-8.

19. Цыпин, Б.В. Преобразование Прони в задаче измерения параметров гармонических сигналов в шумах / Б.В. Цыпин, П.Г. Михайлов, М.Г. Мясникова // Датчики и системы. – 2007. – №4.

20. Цыпин, Б.В. Применение метода спектрального оценивания Прони для измерения параметров цепей переменного тока. / Б.В. Цыпин // Датчики и системы. – 2003. – №1.

21. Шестаков, А.Л. Оценка несущей частоты случайной последовательности импульсов методом Прони / А.Л. Шестаков, А.С. Семенов, О.Л. Ибряева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2009. – Вып. 3. – № 17 (150). – С. 106–115.

22. Potts, D. Linear Algebra and its Applications / D. Potts, M. Tasche. – 2013. – V. 439, № 4. – P. 1024-1039

23. Candès, E. J. Communications on Pure and Applied Mathematics / E. J. Candès, C. Fernandez-Granda . – 2014. – V. 67, № 6. – P. 906-956

24. Feng, Z. Design and implementation of a self-validating pressure sensor / Z. Feng, Q. Wang, K. Shida // IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 9, NO. 3, MARCH 2009, pp. 207-218.

25. Henry, M. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples / M.P. Henry, D.W. Clarke // Control Engineering Practice, Vol. 1, No. 4, pp. 585-610, 1993.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

26. Henry, M. P. Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes/ M.P. Henry, O. L. Ibryaeva, D. D. Salov, A. S. Semenov// Vestnik YuUrGU. Ser. Mat. Model. Progr., 2017, Volume 10, Issue 4, 92-104

27. Vetterli, M. IEEE Transactions on Signal Processing / M. Vetterli, P. Marziliano, T. Blu // 50(6), pp. 1417–1428 (2002).

28. Henry, M. The Prism. Efficient Signal Processing for the Internet of Things / M. Henry, L. Felix, D. Martin, B. Bushuev, T. Michael, F. Zhou, K. Salah // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2017. – P. 22-32

29. Massoumnia, M. Failure detection and identification / M. Massoumnia, G. Verghese, S. Willsky // IEEE Trans. Automat. Contr., 34:316-321.

30. Bushuev O. The use of Prony's Method To detect changes in the Technical Condition of a Pressure Transducer / Bushuev O. // XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry". – 2015. – 4 p.

31. Patton R.J. Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application / R.J. Patton, P.M. Frank, R.N. Clarke // Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1989.

32. Schmidt, R.O. IEEE Transactions on Antennas and Propagation / R.O. Schmidt // – 1986. – V. 34, № 3. – P. 1276-1280

33. Roy, R. Speech and Signal Processing / R. Roy, T. Kailath // IEEE Transactions on Acoustics. – 1989. – V. 37, № 7. – P. 1984-1995

34. Peter, T. Inverse Problems / T. Peter, G. Plonka // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2013. – V. 29, № 2 29(2)

35. Tapan, K. Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials / Tapan K. Sarkar and Odilon Pereira // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1995. – V. 37, № 1. – P. 48-55

36. Taymanov, R. Problems of Terminology in the Field of Intelligent Sensors and Systems / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – pp. 434-438.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

37. Thomas, P. Prony's Method for Multivariate Signals / P. Thomas, P. Gerlind, R. Schaback // PAMM. – 2015. – P. 665-666
38. Voskresenskii, D.I. Aktivnye fazirovannye antennye reshetki [Active Phased Array Antennas] / D.I. Voskresenskii // Moscow, Radiotekhnika, – 2004.
39. Hua, Y. Speech and Signal Processing / Y. Hua, T. K. Sarkar // IEEE Transactions on Acoustics. – 1990. – V. 38, № 5. – P. 914-924
40. Henry, M. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples / M.P. Henry, D.W. Clarke // Control Engineering Practice, Vol. 1, No. 4, pp. 585-610, 1993.
41. Feng, Z. Design and implementation of a self-validating pressure sensor / Z. Feng, Q. Wang, K. Shida // IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 9, NO. 3, MARCH 2009, pp. 207-218.
42. Taymanov, R. Problems of Terminology in the Field of Intelligent Sensors and Systems / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – pp. 434-438.
43. Steven, X. Model-based fault diagnosis techniques design: schemes, algorithms, and tools / X. Steven // Berlin: Springer-Verlag, – 2008.
44. Massoumnia, M. Failure detection and identification / M. Massoumnia, G. Verghese, A. Willsky // IEEE Trans. Automat. Contr., 34:316-321.
45. Rusinov, L.A. Real time diagnostics of technological processes and field equipment / L.A. Rusinov, I.V. Rudakova, V.V. Kurkina // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2007. – Vol. 88.
46. Taymanov, R. Metrological Self-Check and Evolution of Metrology / R. Taymanov // Measurement. – 2010. – V. 43. – N7. – pp. 869-877.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
% Getting signal from oscillogarph
obj1=instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0699::0x0401::C020444::0::INSTR', 'Tag' '');
if isempty(obj1)
    obj1 = visa('NI', 'USB0::0x0699::0x0401::C020444::0::INSTR');
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end
n=10000; % Dots amount
set(obj1, 'InputBufferSize', 8.1*n); % InputBufferSize memory allocation
fopen(obj1);

fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH1'); % sensor first chanel
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 2');
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(obj1, 'DATA:STAR 0');
fprintf(obj1, 'DATA:STOP 20000');

data6 = query(obj1, 'C?');
Sensor=str2num(data6)/3277.5; % To change depend of scale
x=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);
subplot(3, 2, 1),plot(x,Sensor);
retain1(Sensor);

pause(2);
```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

```

fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH2'); % Impact second chanel
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 2');
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(obj1, 'DATA:STAR 0');
fprintf(obj1, 'DATA:STOP 20000');

data7 = query(obj1, 'C?');
Impact=str2num(data7)/3277.5; % To change depend of scale
x1=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);

% Date record
function retain1(x)
%x=[1 2 3 10 2 -5 23.6 55];
tt=datetime('now'); % Get time
ttd=datestr(tt); % Convert to string
d2 = yyymmdd (tt);
DateVector = datevec (tt);
a=num2str(Datevector)
a1=DateVector(1);
b1=num2str(a1);
a2=DateVector(2);
b2=num2str(a2);
a3=DateVector(3);
b3=num2str(a3);
a4=DateVector(4);
b4=num2str(a4);
a5=DateVector(5);
b5=num2str(a5);
a6=DateVector(6);

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

```

b6=num2str(a6);
bb='.m';

%datestroc=strcat(b1,b2,b3,b4,b5,b6,bb);
datestroc=strcat(b1,'_',b2,'_',b3,'_',b4,'-',b5,'_',b6,bb);
f=fopen(datestroc, 'at+');
fprintf(f, '%f\n', x);
fprintf(f, '\n\n');
fclose(f);

% Fourier transform

function [sp,ffs] = spfft (fs,signal,fig_mode)
% spfft FFT with required parameters
% spfft (fs,signal,fig_mode)
%
% Inputs:
% fs      - sampling frequency
% signal  - signal to analyze, must be a column, if signal is a
%          matrix, then fft will be applied to each coloumn
% fig_mode - variable that tells whether to plot or not to plot
%          if fig_mode=0, then it does not plot a graph, in other case
%          it plots on figure(fig_mode)
%
% Outputs:
% sp      - Square of FFT spectrum of a signal (y-axis)
% ffs     - Frequencies (x-axis)

qwe=signal;

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

```

[a,b]=size(qwe); % a is number of rows, b is number of columns
% each column should be an observation of the signal
% a is number of samples of each observation
meanqwe=mean(qwe);
for k=1:b
    qwe(:,k)=qwe(:,k)-meanqwe(1,k); % delete mean
end
Nfft = a; % must be even
y=fft(qwe,Nfft);
Pyy = y.* conj(y)/Nfft;
ff = (fs*(0:(Nfft-1))/Nfft)';
sp=Pyy(1:Nfft/2,:);
ffs=ff(1:Nfft/2);
if fig_mode~=0
    spnorm=zeros(size(sp));
    spmax=max(sp);
    for k=1:size(sp,2)
        spnorm(:,k)=sp(:,k)/spmax(1,k);
    end
    figure(fig_mode);
    plot(ffs/1000,spnorm);
xlim([0 250]);
end

```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 019 ПЗ ВКР	66
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		