

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____/ А.Л. Шестаков /

« ____ » _____ 2019 г.

_____ **Определение динамических характеристик преобразователя давления с помощью ударного молотка** _____

(наименование темы работы (проекта))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ-12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

Руководитель, доцент

_____/ О.Ю. Бушуев /

« ____ » _____ 2019 г.

Автор

студент группы КЭ – 463

_____/ В.А. Дуношкина /

« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Дунюшкина В. А. Определение динамических характеристик преобразователя давления с помощью ударного молотка. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-463, 2019, 69 с, 27 ил., библиографический список – 56 наименований.

В данной работе проводится снятие динамических характеристик преобразователя давления на основе уже известных методик, также получение динамических характеристик и анализ полученных результатов. Конечной целью является анализ снятых 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. 015 ПЗ ВКР		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>	<i>Дунюшкина</i>				ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УДАРНОГО МОЛОТКА		
<i>Проз.</i>	<i>Бушуев</i>						
<i>Н.контр.</i>	<i>Волосников</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Утв.</i>						3	
					ЮУрГУ Кафедра ИНИТ		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ СВЯЗАННОЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	8
1.1 Динамические характеристики	8
1.2 Существующие исследования с определением динамических характеристик	11
1.3 Описание приборов	26
1.4 Описание конструкции ударного молотка	29
1.5 Описание конструкции преобразователя давления	33
1.6 Интерактивная среда MATLAB.....	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ	43
2.1 Преобразование Фурье	43
2.2 Быстрое преобразование Фурье.....	46
2.3 Реализация БПФ в MATLAB	50
3 СНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ УДАРНОГО МОЛОТКА	52
3.1 Описание экспериментальной установки	52
3.2 Методика определения динамических характеристик с помощью ударного молотка	53
3.3 Анализ полученных данных.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
БИблиОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А	65

ВВЕДЕНИЕ

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. 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.

Динамические измерения относятся к одной из наиболее сложных измерительных задач. Непрерывное развитие техники и исследований требует расширения частотного диапазона и увеличения точности и быстродействия средств измерения. Динамические погрешности результатов измерений в значительной степени определяются динамическими характеристиками средств измерения. В полной мере это относится к датчикам давления.

Экспериментальное определение динамических характеристик датчиков давления всегда представляло собой достаточно сложную инженерную задачу. Проблемы оценки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) датчиков возникают в связи с необходимостью задания гармонически изменяющегося давления с переменной в рабочем диапазоне датчика частотой. Частотный диапазон измеряемых давлений может достигать сотен килогерц, особенно в случае резких ударов и других внешних воздействий.

Потребность в измерительных устройствах с наименьшими искажениями выходного сигнала порождает повышенный интерес к оценке динамических характеристик датчиков, поскольку и заказчики, и разработчики заинтересованы в средствах измерения с такими ДХ, при которых при известном характере входного сигнала динамические погрешности не превосходили бы допустимых

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

значений. Именно поэтому необходимы новые и усовершенствованные методы их оценки.

Выделяют следующие методы определения ДХ датчиков:

- экспериментальный;
- аналитический;
- экспериментально-аналитический.

Экспериментальные методы реализуются с помощью прямых методов определения ДХ средств измерений (СИ) и требуют использования системы или установки для проведения соответствующего эксперимента.

Аналитические методы предусматривают построение или разработку математической модели процессов, происходящих в СИ во время измерения. Как правило, это система дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от степени детализации описания процессов, происходящих в СИ. Недостатками аналитических методов являются невысокая точность и достоверность определения ДХ СИ, вызванная невозможностью полного математического описания всех физических процессов, происходящих в исследуемом СИ в процессе его эксплуатации, поэтому аналитические методы применяются в основном для прогнозирования ДХ средства измерения на этапе его разработки и проектирования и (или) исследования поведения ДХ в зависимости от вносимых конструктивных изменений.

Наибольшее распространение получили экспериментально-аналитические методы определения ДХ СИ, которые используют соответствующее испытательное оборудование (систему или установку для экспериментального определения ДХ СИ) и методы обработки экспериментальных ДХ.

Учитывая, что датчик эксплуатируется в условиях воздействия различных сред (жидких, газообразных), возникает проблема оценки ДХ датчиков. В работе предложен один из экспериментально-аналитических методов определения ДХ датчиков с помощью ударного молотка.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Решается задача определения динамических характеристик преобразователя давления с помощью ударного молотка. Целью работы является определение динамических характеристик преобразователя давления, путем регистрации реакции преобразователя на удары молотком АУ02, используемым при проведении динамических испытаний.

Задачи данной работы:

- 1) изучить информацию касающуюся динамических характеристик и их снятия;
- 2) разработать методику определения динамических характеристик с помощью ударного молотка;
- 3) провести опыты по снятию динамических характеристик с помощью данной методики;
- 4) оценить достоверность полученных данных.

						<i>Лист</i>
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

1 АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ СВЯЗАННОЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Динамические характеристики

Динамическая характеристика — один из важнейших параметров системы, определяющий ее реакцию на изменение внешних воздействий. Если под системой подразумевается измерительное устройство (датчик), то его динамическая характеристика определяет так называемую динамическую составляющую погрешности, которая при определенных условиях может в несколько раз превышать нормируемую статическую компоненту. В настоящее время в связи с расширением области применения измерительных устройств наблюдается повышенный интерес к оценке их динамических характеристик как со стороны производителей, так и со стороны заказчиков.

Основной характеристикой датчика являлась его статическая функция преобразования, т.е. зависимость сигнала на выходе датчика (обычно тока или напряжения) от фактического значения измеряемого параметра. При этом предполагается, что значение измеряемого параметра остается постоянным за период измерения. Задача контроля фактического значения измеряемого параметра в таком случае решается с использованием прибора более высокого класса точности, чем испытуемый. Поведение датчика в случае быстро меняющихся входных воздействий остается неопределенным.

Информация о динамической характеристике датчика дает возможность учитывать реакцию датчика на изменение внешних условий и, например, в случае необходимости компенсировать динамическую составляющую погрешности [13].

При экспериментальной оценке динамической характеристики датчика основной трудностью является необходимость генерации динамического воздействия с контролируруемыми параметрами в диапазоне частот, характерном для изучаемого устройства. Имеются работы [24], в которых в качестве внешних воздействий для датчика давления используются удары стальными стержнями по

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

мембране датчика. В таком случае отдельную проблему представляет определение формы и длительности входного импульса, а также учет взаимодействия мембраны и стержня, что затрудняет определение искомой характеристики. Это определяет актуальность вопроса поиска внешних воздействий, подходящих для решения поставленной задачи.

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

Полные

Дифференциальное уравнение – выражение описывающие работу системы в динамике.

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

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

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

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 [20]. 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[28].

Непараметрические методы, в них используется только информация содержащаяся в отсчётах анализируемого сигнала. К ним относятся: быстрое преобразование Фурье (БПФ), периодограмма, метод Уэлча [28].

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
									10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

1.2 Существующие исследования с определением 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.

Как указывается в [52], впервые возможность использования информации в частотной области для разработки алгоритмов обнаружения неисправностей была высказана Р. Паттоном и его коллегами в 1986 году [49]. Р. Айзерман в своей монографии «Системы диагностики неисправностей» [45] приводит подробное описание того, как может осуществляться обнаружение неисправностей на основе модели сигнала, и возможные модели детерминированных и случайных сигналов. Применяя специальные математические модели для описания сигналов, вычисляют подходящие параметры, например, амплитуды, фазы, частотный спектр или автокорреляционные функции для определенной полосы частот сигнала. Сравнение наблюдаемых параметров с их опорными значениями позволяет выявить их нежелательное изменение и подать сигнал об ошибке.

Модели сигнала можно разделить на непараметрические, такие как частотные спектры или автокорреляционные функции, и параметрические, такие как амплитуды на отдельных частотах или модели типа авторегрессии. Также в [45] приведен краткий обзор методов диагностики неисправностей, основанных на анализе модели сигнала. Для периодических сигналов, которые могут быть

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

представлены в виде суперпозиции гармонических составляющих, традиционными средствами анализа являются полосовая фильтрация, преобразование Фурье, корреляционные функции, спектральное оценивание методом максимума энтропии. В случае нестационарных сигналов используют вейвлет-преобразование.

Для анализа случайных сигналов применяют корреляционный анализ и оценку параметров сигнала с использованием авторегрессионной модели со скользящим средним [45]. Одним из основных параметров, характеризующих любой измерительный преобразователь, является его динамическая характеристика [28]. Рассматриваемые в данном исследовании измерительные преобразователи давления являются электромеханической конструкцией, и их выходной электрический сигнал содержит информацию о динамических характеристиках преобразователя. Предположив, что техническое состояние преобразователя влияет на его частотные характеристики, которые могут быть определены путем анализа выходного сигнала, можно создать методику обнаружения неисправностей сенсора на основе анализа сигнала и оценки его частотной характеристики. Исследования, направленные на оценку динамических характеристик средств измерения с целью их идентификации или диагностики их технического состояния проводились группами отечественных и зарубежных ученых: К.А. Алексеевым, В.П. Иосифовым (Россия, г. Пенза); Дж. АмадиИченду, Х. Зу, Е. Хайемом (Великобритания, г. Сассекс); О.Л. Ибряевой, А.С. Семеновым, А.Л. Шестаковым (Россия, г. Челябинск); Р. Зангом, Р. Кингом, Л. Олсоном (США); С. Биби, Н. Гребхемом, П. Уайтом (Великобритания).

В работах [35-36] исследована возможность диагностики технического состояния расходомеров, преобразователей давления различной конструкции и приборов на их основе путем анализа выходного сигнала измерительного преобразователя и идентификации его передаточной характеристики. В работе [10] показано использование динамического отклика для диагностики состояния мостов. В работе [38] исследовано использование резонансной частоты для

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

диагностики пьезокерамического акселерометра, в том числе обсуждаются вопросы аппаратной реализации возбуждения и регистрации основной резонансной частоты. Также вопросам диагностики в частотной области и оценки частотных параметров посвящены работы [50, 53].

Экспериментальному определению частот собственных колебаний различных структурных элементов датчика давления с тензорезисторным мостом посвящены работы [3, 5-6, 27-28]. В [27] говорится о резонансном методе определения собственных частот, при этом приводятся их характерные значения (от 10 до 70 кГц). В работе [28] предлагается создавать сильные внешние воздействия на датчик (удары стальными стержнями, гидроудары от взрыва проволоки) с целью получения отклика, при анализе которого можно оценить значения собственных частот датчика. В [3] подробнее излагаются способы воздействия на систему, проводится их сравнительный анализ. При этом, однако, собственные частоты не рассматриваются как средство диагностики неисправностей датчика, но используются для нужд его идентификации. Кроме того, в работах [27-28] самый чувствительный элемент датчика – мембрана – не рассматривается, в первую очередь из-за сравнительно высоких значений гармоник ее собственных колебаний. О частотном спектре упругих волн в металлических конструкциях, так называемом ударном спектре, говорится в работе [33].

Интересно отметить, что оценка ударного спектра конструкций для нужд неразрушающего контроля была предложена еще в 80-х годах. Но, к сожалению, в реальном технологическом процессе, использующем датчик давления, нет возможности создавать дополнительные ударные или гидравлические волны только для того, чтобы определить исправно ли средство измерения.

До настоящего времени основной характеристикой датчика являлась его статическая функция преобразования, т.е. зависимость сигнала на выходе датчика (обычно тока или напряжения) от фактического значения измеряемого параметра.

При этом предполагается, что значение измеряемого параметра остается постоянным за период измерения. Задача контроля фактического значения

									<i>Лист</i>
									13
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>					

измеряемого параметра в таком случае решается с использованием прибора более высокого класса точности, чем испытуемый. Поведение датчика в случае быстро меняющихся входных воздействий остается неопределенным. Информация о динамической характеристике датчика дает возможность учитывать реакцию датчика на изменение внешних условий и, например, в случае необходимости компенсировать динамическую составляющую погрешности.

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

В работе Пирогова А.В. и Стучебникова В.М.,[24] в качестве внешних воздействий для датчика давления используются удары стальными стержнями по мембране датчика.

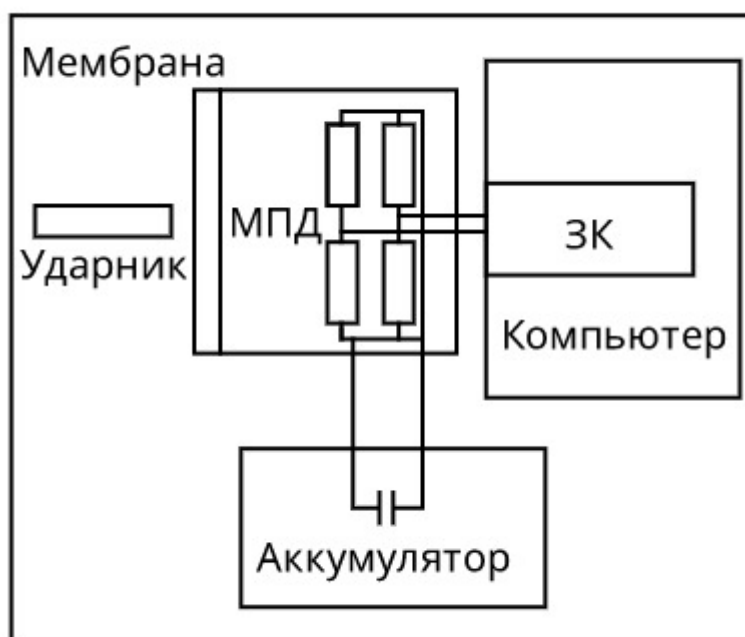


Рисунок 1–Лабораторный стенд

Механические колебания мембраны МПД возбуждались ударником. В качестве ударников использовались стальные стержни двух разных длин 50мм и

140мм и диаметром 2,5 мм. Колебания мембраны порождённые ударом, преобразовывались в электрический сигнал тензочувствительной схемой мпд. С целью снижения влияния электрических наводок для питания моста использовался аккумулятор на 12в. Сигнал с тензомоста подавался на звуковую карту (Sound-max integrated digital audio (gigabyte)), где он дискретизировался с частотой 96 кГц и записывался в файл для последующей обработки. Фурье преобразование выполнялось по алгоритму бпф с разложением на простые множители, что в отличие от классического алгоритма кули тыюки снимает ограничение на кратность степени числа отчётов. Для определения искажений вносимых электрическим трактом преобразования аналогового сигнала в цифровой, была проверена амплитудно-частотная характеристика зк.

При проверке записывались сигналы создаваемые генератором частоты ГЗ-113. В результате 15- 20000 Гц составляла не более 0,1 дБ выше 20 кГц начинался спад частотной характеристики. Чувствительность по входу определялась при подаче на вход зк синусоидального сигнала 0.3 в амплитуда 0.42 В 1кГц зафиксированное максимальное значение в дискретаз составило 16000 т е чувствительность по входу зк составляла мкв/дискрету.

В таком случае отдельную проблему представляет определение формы и длительности входного импульса, а также учет взаимодействия мембраны и стержня, что затрудняет определение искомой характеристики. Это определяет актуальность вопроса поиска внешних воздействий, подходящих для решения поставленной задачи.

В работе О.С. Филатовой [31], 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

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

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 граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывая, на какой частоте происходит 30-процентное уменьшение выходного сигнала. Схема испытательной установки приведена на рис. 1.

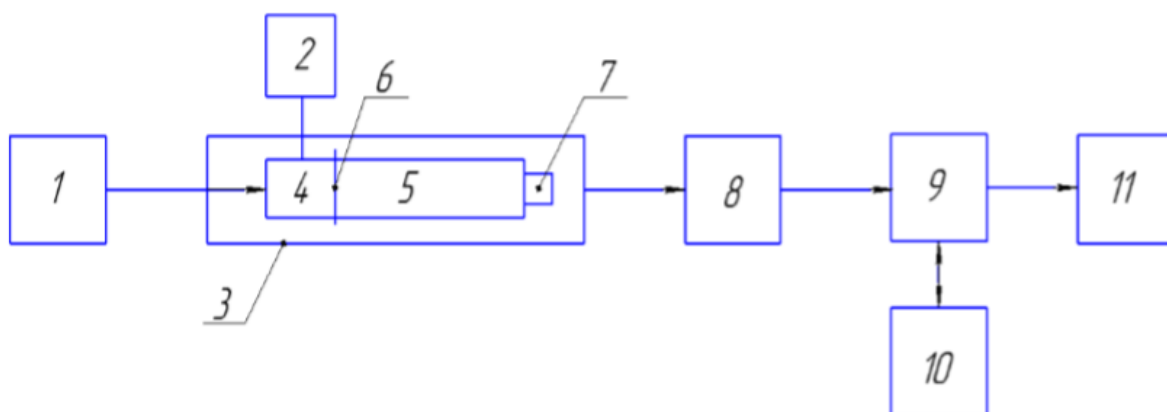


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки:

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 – испытуемый 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:

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

Здесь $h(t)$ – 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 $\delta(t)$ и $h(t)$ – импульсная и переходная характеристика датчика соответственно.

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

Отклик пьезоэлектрических датчиков на ударную волну имеет сложный спектр. Он состоит из ряда низкочастотных и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие чаще всего не проявляются при определении АЧХ на пульсаторах и являются следствием волновых процессов в многослойной конструкции пьезоэлектрического датчика. Поэтому при определении рабочего диапазона частот датчика, предназначенного для измерения переменного пульсирующего давления, их не следует принимать во внимание и использовать только высокочастотные пики[31].

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. Основу программного расчета составляет одно из положений теории линейных систем, согласно которому выходной сигнал системы может быть представлен как свертка входного сигнала и импульсной характеристики системы. В частотной области это соотношение преобразуется в произведение спектральных характеристик:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

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

Здесь $Y(f)$, $H(f)$, $X(f)$ – фурье-образы выходного сигнала $y(t)$, импульсной захарактеристики системы $h(t)$ и выходного сигнала $x(t)$ соответственно.

Для определения значения частотной характеристики из выражения (1) выводится соотношение

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

Где $G_{yy}(f)$ и $G_{xx}(f)$ – спектральные плотности входного и выходного процессов; $H(f)$ - искомая частотная характеристика.

Выражение (2) дает простой алгоритм определения передаточной функции системы. Для этого достаточно взять в качестве входного сигнал с равномерным спектром в частотной области (или дельта-импульс во временной). Тогда частотный спектр выходного сигнала совпадет с частотным спектром исследуемого датчика.

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

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

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

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

сигналы (обозначают одновременно амплитуду и фазу); k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период.

Также исследования в области определения динамических характеристик проводились в лаборатории ЮУрГУ, О.Ю. Бушуевым. Используемый им метод определения динамических характеристик описывается далее. В этой работе предлагается метод оценки динамических характеристик тензометрических преобразователей давления с использованием импульса давления, генерируемого ультразвуковым излучателем.

Экспериментальные исследования частотных характеристик преобразователя проводились на стенде, схема которого приведена на рисунке 3.

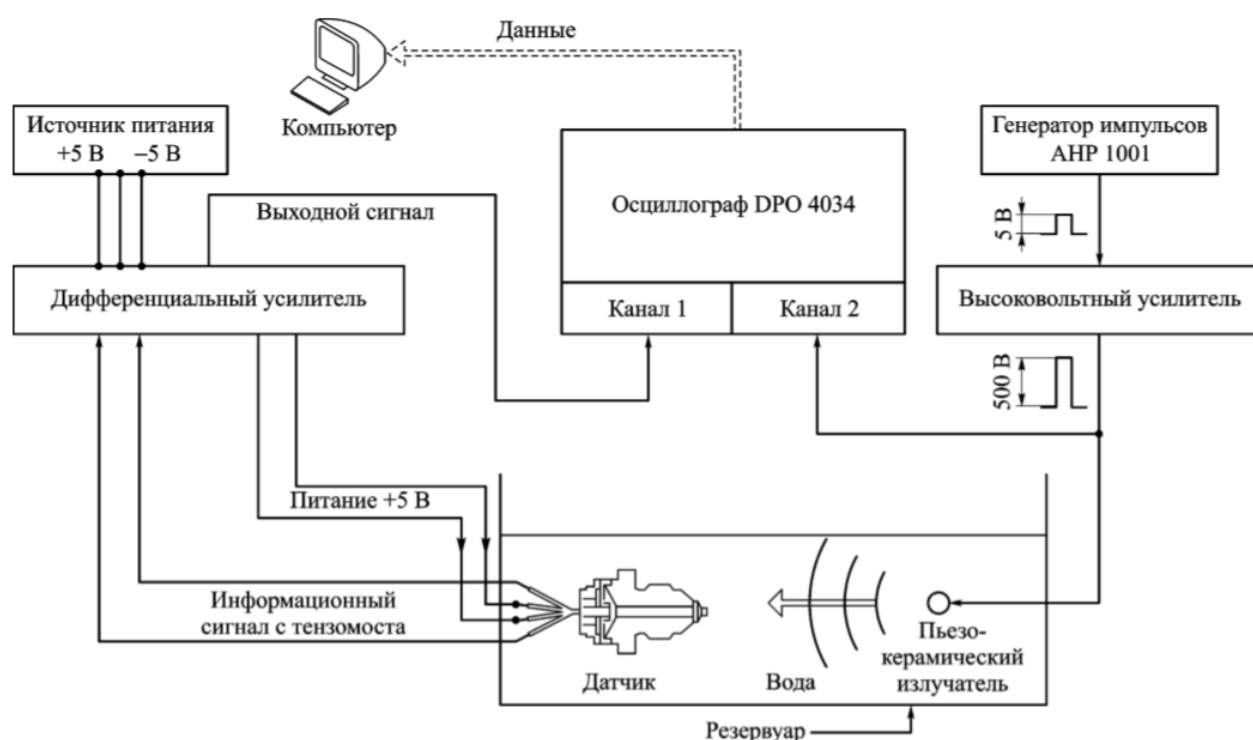


Рисунок 3 – Схема стенда для измерения входного и выходного сигналов

Основа стенда — резервуар с водой, куда могут помещаться исследуемые преобразователи давления и пьезокерамические излучатели. В качестве источника

импульсов использовался генератор АНР 1001, обеспечивающий необходимую длительность импульса (около 10 мкс), амплитуду (около 5 В) и периодичность.

Задающий импульс подается на высоковольтный усилитель, формирующий прямоугольные импульсы амплитудой — 500 В (достаточной для генерации импульса давления, возбуждающего преобразователь) длительностью и периодом, равными длительности и периоду задающего импульса. В пьезокерамическом излучателе высоковольтный импульс преобразуется в импульс давления, подаваемый на исследуемый преобразователь давления. Одновременно высоковольтный импульс поступает на один из каналов (канал 2) осциллографа DPO4034, где записывается с заданной тактовой частотой. Сигнал с одной из диагоналей тензорезистивного моста преобразователя подается на дифференциальный усилитель, обеспечивающий согласование разностного сигнала моста с входом канала 1 осциллографа DPO4034. Полосу пропускания усилителя рассчитывали так, чтобы не вносить искажений в исследуемый интервал частот (от 0 до 80 кГц).

Дополнительной функцией дифференциального усилителя является формирование питания для преобразователя, которое подается на другую диагональ тензорезистивного моста. Временные реализации полезного сигнала и высоковольтного импульса, а также дополнительная служебная информация записываются в осциллографе синхронно в формате Excel, а затем с помощью флэш-памяти переносятся на компьютер для хранения и дальнейшей обработки. Преобразования и обработка сигналов, в том числе преобразование Фурье, проводились на компьютере с помощью средств пакета Matlab.

В качестве экспериментальных образцов датчиков были использованы тензометрические преобразователи давления типа “кремний-насапфире” (КНС) [4] двух типов. Первый (далее — тип А) — двухмембранный тензопреобразователь давления с узким каналом, изготовленный ЗАО “НПК ВИП” (г. Екатеринбург) по ВЮМА40130 309.001.ТУ. Предел измерений — от 0 до

									Лист
									20
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

100кПа. Общий вид преобразователя типа А и его устройство приведены на рисунке 4,а,б.

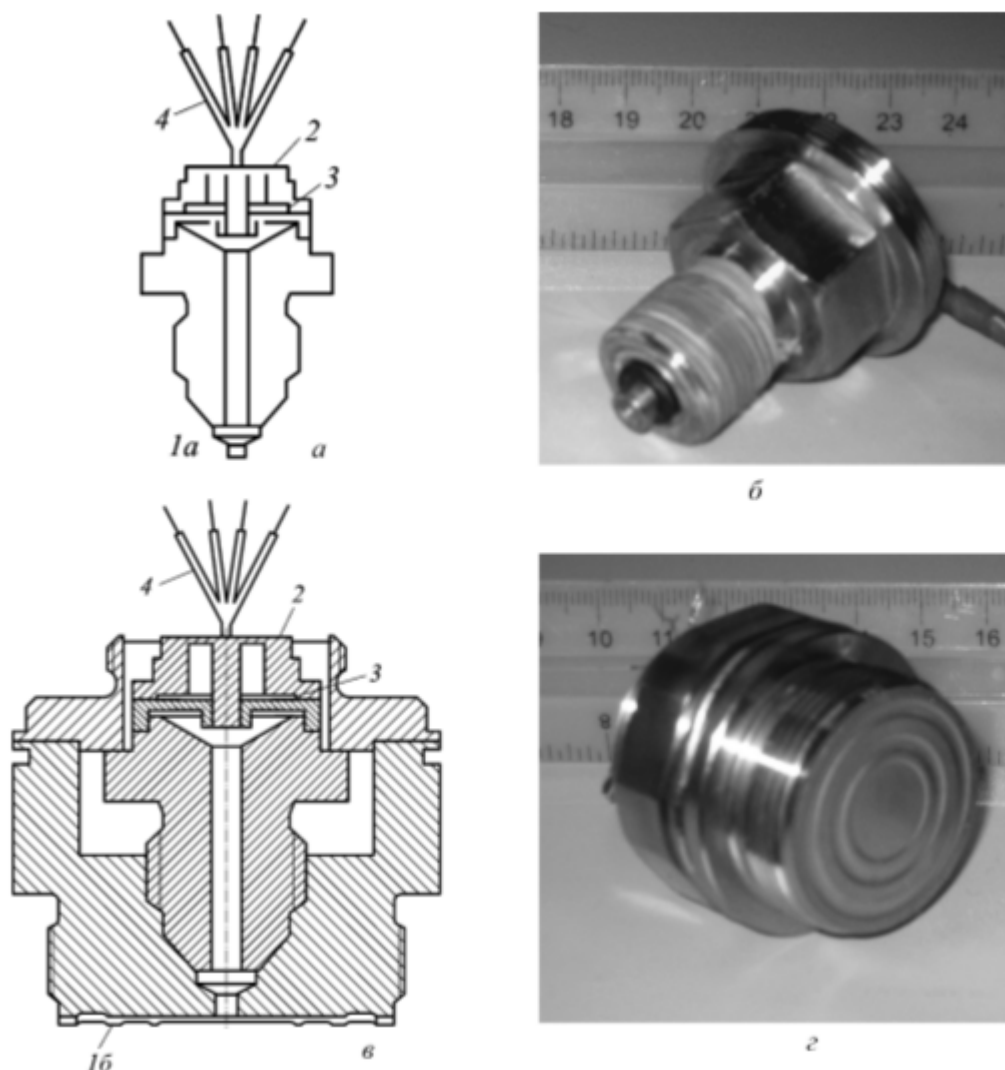


Рисунок 4 – Общий вид (б, г) преобразователей давления типов А (а) и В (в):
1а — узкий канал, 1б — разделительная мембрана, 2, 3 — чувствительные мембраны, 4 — выходы тензометрического моста

Второй (далее — тип В) — двухмембранный тензопреобразователь с разделительной мембраной 2130М2ДИ, изготовленный ООО “ИТеК ББМВ” (г.Челябинск). Предел измерений — от 0 до 100кПа. Общий вид преобразователя и его устройство приведены на рис.2,в, г. В качестве излучателей использовались

пьезокерамические преобразователи двух типов, изготовленные по заказу на основе пьезокерамики ЦТС-19.

Вид излучателей имеет шарообразную форму и большую интенсивность (далее — излучатель Ш). Другой имеет плоскую форму и меньшую интенсивность (далее — излучатель П). Каждый эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе для каждого типа датчиков были получены по два массива данных: $\{X_{iu}[t_n], Y_{iu}[t_n]\}$ и $\{X_n[t_n], Y_n[t_n]\}$, где $X_{iu}[t_n], Y_{iu}[t_n]$ и $X_n[t_n], Y_n[t_n]$ — значения входных и выходных сигналов, полученные при использовании излучателей Ш и П, $n = 1, \dots, 1000000$, n — номер отсчета. Дискретизация проводилась с частотой 500кГц (для предотвращения эффекта “заворота частот”), что при данном объеме выборки определяет длительность записываемого сигнала равной 2с. За это время генерировалось 15 импульсов давления.

На втором этапе были получены две реализации сигналов, одна из которых — при использовании излучателя типа П в качестве излучателя, а типа Ш в качестве приемника. Назовем такое каскадное соединение ПШ. При записи второй реализации излучатель и приемник менялись местами. Такое соединение назовем соединением ШПх[12].

Массивы данных, полученные с осциллографа на этом этапе эксперимента, обозначим как $\{X_{nu}[t_n], Y_{nu}[t_n]\}$ и $\{X_{un}[t_n], Y_{un}[t_n]\}$.

Хотя теоретически в случае линейных систем передаточные функции каскадных систем ПШ и ШП должны совпадать, для компенсации случайных искажений при дальнейших расчетах использовался усредненный спектр этих двух реализаций.

Типичные отклики преобразователя и излучателя приведены на рисунке 5.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	22
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

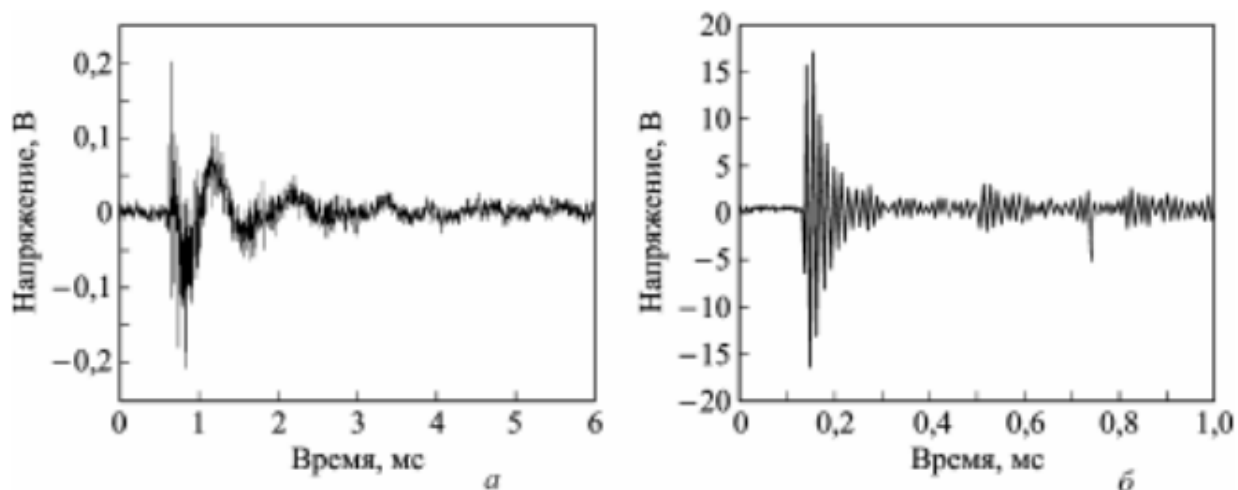


Рисунок 5 – Типичные отклики тензопреобразователя давления (типа В) на возбуждение излучателем Ш (а) и излучателя, используемого в качестве приемника сигнала, на возбуждение другим излучателем (б)

Поскольку преобразование Фурье случайного сигнала является статистически неустойчивой операцией [15], то в качестве спектральных характеристик сигналов использовался усредненный спектр независимых сегментов реализации. Для этого из каждой временной последовательности выделялся набор статистически независимых участков. Предполагая, что временные последовательности, полученные от различных возбуждающих импульсов, статистически независимы, из каждой временной последовательности выделялось по 15 участков (по числу возбуждающих импульсов на отдельной реализации), т.е. исходные массивы данных были преобразованы к виду $\{X_{uu}[t_{k+i}], Y_{uu}[t_{k+i}]\}$, $\{X_n[t_{k+i}], Y_n[t_{k+i}]\}$, $\{X_{nu}[t_{k+i}], Y_{nu}[t_{k+i}]\}$, $\{X_{un}[t_{k+i}], Y_{un}[t_{k+i}]\}$, где tk — момент начала k -го возбуждающего импульса; $k = 1, \dots, 15$; $i = 0, \dots, I - 1$; I — число отсчетов в сегменте. Число импульсов в сегменте выбирали, исходя из необходимого частотного разрешения 200 Гц, что во временном диапазоне составляет 5 мс или при данной дискретизации 1000 отсчетов, т.е. $I = 1000$. После перехода в частотную область для каждой реализации будем иметь $\{X_{uk}[f_m], Y_{uk}[f_m]\}$, $\{X_{nk}[f_m], Y_{nk}[f_m]\}$,

$\{X_{nuk}[f_m], Y_{nuk}[f_m]\}$, $\{X_{uuk}[f_m], Y_{uuk}[f_m]\}$, где $m = 0, \dots, 500$, $f_m = m\Delta f$, $\Delta f = 200$ Гц. После проведения операции усреднения

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

где $U = \{X_{uu}, Y_{uu}, X_n, Y_n, X_{un}, Y_{un}, X_{nu}, Y_{nu}\}$, и дополнительно определяя среднее сигналов ШП и ПШ, получаем усредненные спектры (рис.5 и 6): $\{X_{uu}[f_m], Y_{uu}[f_m]\}$, $\{X_n[f_m], Y_n[f_m]\}$, $\{X_{\Sigma}[f_m], Y_{\Sigma}[f_m]\}$, где индекс Σ обозначает усредненные спектры для систем ШП и ПШ. Подставив полученные усредненные спектры входных и выходных сигналов в соотношение (6), получаем искомую оценку частотного спектра преобразователей:

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

Результаты расчетов по формуле (верх) для датчиков типа А и В приведены на рисунке 6 и 7. Спектры имеют четко выраженные максимумы, положение которых может быть численно определено. При этом для разных конструкций преобразователя получается свой спектр, что хорошо согласуется с теоретическими предположениями.

Для оценки устойчивости решений были рассчитаны коэффициенты корреляции между независимыми оценками частотного спектра одного и того же датчика, полученными в разное время, и между спектральными характеристиками датчиков разного типа. Коэффициент корреляции между оценками частот для одного и того же датчика изменялся в пределах от 0,92 до 0,99, а между оценками для разных датчиков — в пределах от 0,14 до 0,2.

Высокий коэффициент корреляции для датчиков одного типа свидетельствует о достаточной надежности предложенной методики оценки частотного спектра тензометрических датчиков давления и компенсации влияния параметров излучателей.

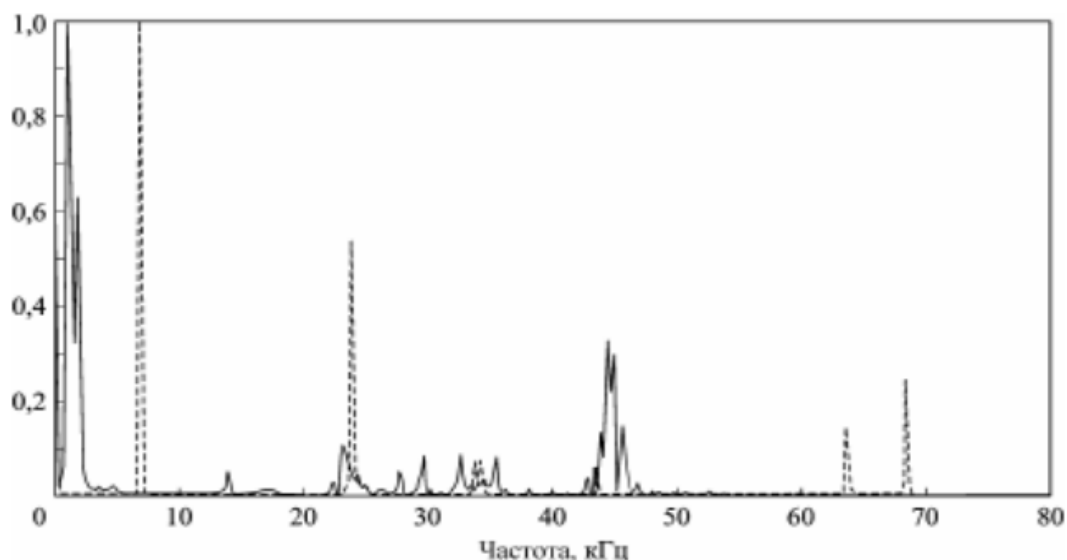


Рисунок 6 – Спектры откликов преобразователей типов В (сплошные кривые) и А (штриховые)

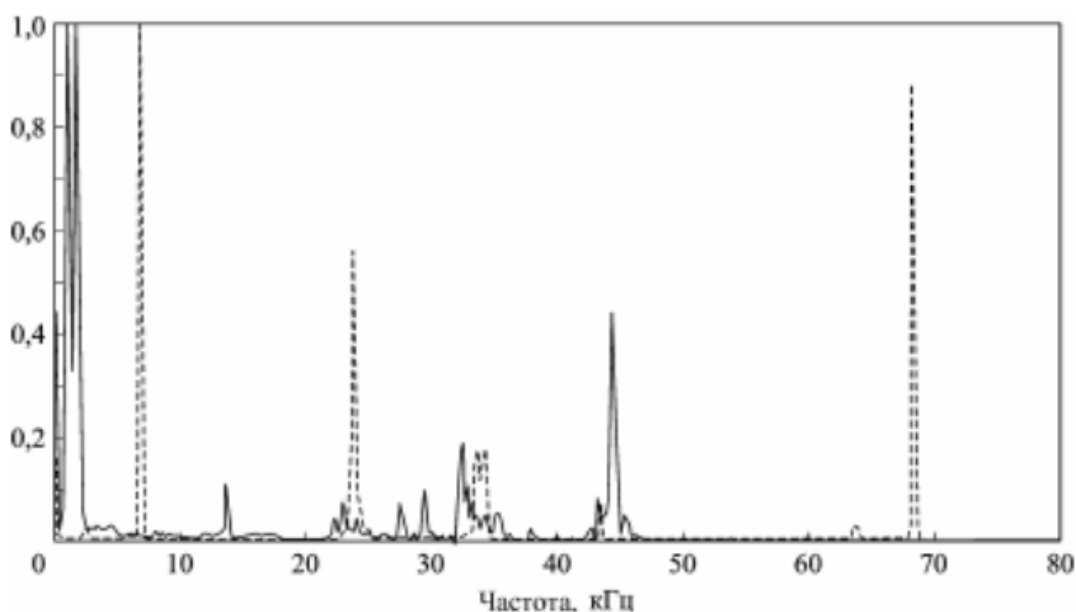


Рисунок 7 – Частотные характеристики датчиков типов В (сплошные кривые) и А (штриховые)

Кроме того, низкие значения коэффициентов корреляции между датчиками разного типа позволяют говорить о частотном спектре датчика как о характеристике, идентифицирующей конкретный прибор.

Таким образом, предложенная методика позволяет построить динамическую характеристику тензопреобразователя. Дальнейшая обработка полученных данных должна определяться целью ее проведения. Например, если необходимо оценить возможность работы датчика в условиях синусоидально изменяющегося давления, то достаточно определить отсутствие собственных частот динамической характеристики в области частоты изменения давления. Если же требуется использовать динамическую характеристику для компенсации динамических погрешностей, то нужно перейти к параметрическому представлению ДХ и оценить точность определения параметров, что представляет отдельную достаточно сложную задачу.

Помимо этого факт индивидуальности характеристики для каждого датчика, возможно, позволит при разработке соответствующих методик оценить состояние внутренних элементов конструкции датчика без его разборки.

В настоящей работе предлагается метод оценки динамических характеристик тензометрических преобразователей давления с использованием вибростенда.

1.3 Описание приборов

Многие разработчики видеотехники до сих пор остаются верны аналоговым осциллографам, считая, что только градации интенсивности свечения аналогового экрана позволяют разглядеть некоторые детали осциллограмм видеосигналов.

Осциллограф DPO 4034

Высокое быстродействие осциллографов серии DPO4000 при сборе данных и возможность просмотра сигнала с различной яркостью вместе позволяют получить такое же насыщенное информацией изображение, как и аналоговый осциллограф, но значительно более детализированное. Вместе с тем приборы обладают всеми преимуществами цифровых осциллографов. Такие стандартные средства, как масштабные сетки IRE и «МВ», выдержка по полям, полярность видеосигнала и автоустановка, способная обнаруживать видеосигналы, делают

									Лист
									26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

осциллографы семейства DPO4000 самыми простыми в использовании среди имеющихся на рынке осциллографов для видеоприложений. Благодаря полосе пропускания до 1 ГГц и четырем аналоговым каналам осциллографы семейства DPO4000 обладают вполне достаточными характеристиками для применения в аналоговой и цифровой видеотехнике. Наконец, у осциллографов семейства DPO4000 еще больше расширились возможности анализа видеосигналов благодаря дополнительному модулю DPO4VID, предназначенному для работы с видеоприложениями. Этот модуль предоставляет самые широкие в отрасли возможности по работе с HDTV и пользовательской (нестандартной) видеосинхронизации.

- модели с полосой пропускания 1 ГГц, 500 ГГц, 350 МГц;
- 2-канальные и 4-канальные модели;
- частота выборки на каждом канале до 5 Гвыб./с (для DPO-4104), остальные модели имеют частоту дискретизации до 2,5 Гвыб./с;
- длина памяти на каждом канале 10 млн. выборок;
- элементы управления Wave Inspector повышают эффективность анализа осциллограмм;
- запуск на последовательные шины и их анализ;
- цветной экран XGA 10,4 дюйма (264 мм);
- малая занимаемая площадь на рабочем столе: всего 140 мм в глубину и масса 5 кг;
- гнезда USB и CompactFlash на передней панели для быстрого подключения устройств хранения данных;
- встроенный порт Ethernet;
- подключение к ПК «Plug'n'Play»;
- программные средства анализа;
- порт USB 2.0 для непосредственного управления осциллографом с компьютера с использованием USBTMC;
- пакет расширенной синхронизации;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

- дистанционный просмотр и полное управление прибором с помощью средств e*Scope®;
- возможность совместной работы с логическими анализаторами Tektronix;
- интерфейс пробников TekVPI™ с поддержкой автоматической установки масштаба и единиц для активных, дифференциальных и токовых пробников.



Рисунок 8 – Осциллограф DPO 4034

Усилитель ADA400A

Дифференциальный усилитель Tektronix ADA400A с высоким коэффициентом усиления (100X, 10X, 1X, 0,1X) позволяет проводить прямые измерения осциллографом очень малых напряжений и сигналов. Высокое сопротивление обоих входов устраняет необходимость добавления дополнительных точек заземления, тем самым избегая блуждающих токов, которые нарушают измерения или цепь.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	28
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Таблица 1 – Диапазон сигнала усилителя ADA400A

Коэффициент усиления	Обычный режим	Диапазон дифференциального сигнала	Макс. Смещение
100x	$\pm 10\text{В}$	0.1В	$\pm 1.0\text{В}$
10x	$\pm 10\text{В}$	1В	$\pm 1.0\text{В}$
1x	$\pm 40\text{В}$	10В	$\pm 40\text{В}$
0.1x	$\pm 40\text{В}$	80В	$\pm 40\text{В}$



Рисунок 9 – Дифференциальный усилитель Tektronix ADA400A

1.4 Описание конструкции ударного молотка

Ударные молотки AU02 используются при проведении динамических испытаний механических систем и конструкций с целью определения их частотных характеристик, измерения подвижности и механических импедансов.

Они применимы как при диагностике динамических характеристик, так и при их моделировании. Ударный молоток представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Ударный молоток AUO2

ОПИСАНИЕ:

- диагностика и моделирование динамических характеристик;
- определение частотных характеристик систем и конструкций;
- измерение подвижности и механических импедансов.

Для измерения сообщаемой объекту силы используется датчик силы AC21.



Рисунок 11 – Датчик силы AC21

Датчик силы AC21 предназначен для измерений динамических усилий.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Могут быть использованы как самостоятельно, так и в сочетании с виброиспытательными системами и вибропреобразователями при динамических испытаниях различных конструкций и машинного оборудования.

Особенности:

- Прочная конструкция и герметичный корпус.
- Сочетание высоких значений осевой чувствительности, собственной частоты и ударной стойкости.
- Стабильность характеристик и надёжность в процессе эксплуатации.
- Широкий температурный диапазон.
- Низкая чувствительность к изменению температуры.
- Для крепления датчиков АС20 и АС21 должно быть выполнено резьбовое отверстие М5-7Н глубиной не менее 6 мм, момент затяжки - 1,9 ... 2,1 Н·м.

Электрическая схема ударного молотка АУ02 представлена на рисунке 11.

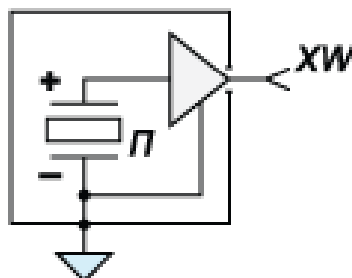


Рисунок 12 – Электрическая схема АУ02

Особенности:

- Широкий диапазон рабочих температур;
- Отсутствие соединительного кабеля с датчиком силы;
- Широкий диапазон динамической силы и длительности.

Таблица 2 – Технические характеристики ударного молотка АУО2

Параметр	Ед. измерения	Значение
Чувствительность по напряжению	мВ/Н	1,5
Динамический диапазон (с бойком из стали)		500 – 5000
Динамический диапазон (с бойком из пластмассы)		300 – 1000
Динамический диапазон (с бойком из резины)	Н	100-700
Температурный диапазон	°С	-40...+125
Напряжение питания	В	15...30
Уровень шума	Н	< 0,03
Ток питания	мА	2...20
Масса бойка (из резины)	г	9
Масса бойка (из пластмассы)	г	7
Масса бойка (из стали)	г	10
Масса молотка в сборе с датчиком без дополнительной массы и бойка	г	330
Дополнительная масса	г	105

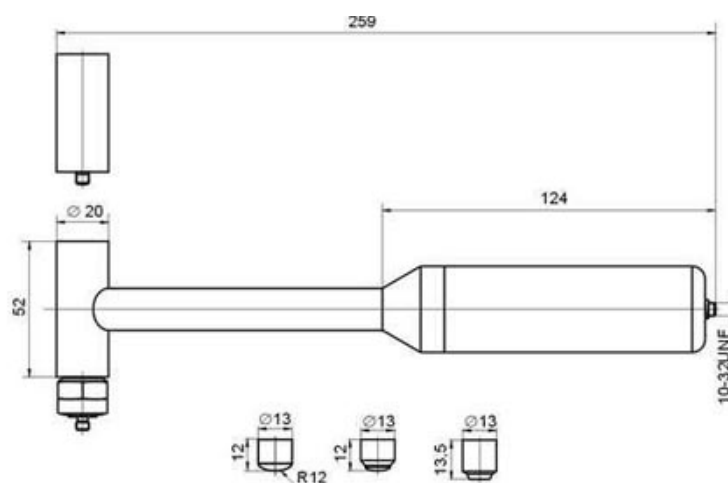


Рисунок 13 – Габариты ударного молотка АУО2

1.5 Описание конструкции преобразователя давления

Измерительный преобразователь – устройство, используемое при измерении, которое обеспечивает на выходе величину, находящуюся в определенном соотношении с входной величиной[3].

Преобразователи типа «Сапфир» были разработаны в конце 1970-х – начале 1980-х годов в московском институте «НИИТеплоприбор». Их конструкция состояла из измерительного блока и электронного преобразователя.

Измерительный мембранный блок, как правило, имеет простую конструкцию. Измеряемая среда либо непосредственно подводится к металлической титановой мембране тензопреобразователя, соединенной с пластиной из монокристаллического сапфира, либо действует на технологическую разделительную мембрану, которая передает давление кремнийорганической жидкости, заполняющей пространство между ней и измерительными мембранами. Конструкция тензопреобразователя и измерительного блока мембранно-рычажного типа включает в себя мембрану (измерительную или измерительно-разделительную), ленточную тягу, рычаг и мембрану тензопреобразователя с припаянным к нему полупроводниковым чувствительным элементом.[29]

Схема преобразования давления в электрический сигнал в мембранно-рычажной конструкции работает следующим образом [22]. Измеряемое давление действует на мембрану, на ленточной тяге возникает усилие, пропорциональное давлению и эффективной площади мембраны. Усилие вызывает перемещение рычага, что приводит к деформации измерительной мембраны тензопреобразователя с припаянным к нему чувствительным элементом. Деформация моста Уинстона, выполненного на чувствительном элементе, приводит к изменению сопротивления его плеч пропорционально измеряемому давлению. Измеряемое давление подается либо непосредственно на измерительную мембрану с чувствительным элементом, либо на воспринимающую мембрану, соединенную с измерительной мембраной жестким

									Лист
									33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

штоком. Электронная схема датчика обеспечивает питание тензочувствительной мостовой схемы ТП и преобразование сигнала разбаланса тензомоста в унифицированный выходной сигнал датчика (0-5, 4-20 мА или 0-5 В).

Характерным для тензопреобразователей является использование мостовой схемы преобразования сигнала. Деформация моста Уинстона, выполненного на чувствительном элементе, приводит к изменению сопротивления его плеч пропорционально измеряемому давлению. Возможны различные варианты расположения тензорезисторов и формулы расчета выходного напряжения.

В данном исследовании рассматриваются основные типы тензопреобразователей давления: тензопреобразователь с разделительной мембраной 2130М2 ДИ, изготовленный ООО «ИтеК БМВ» (г. Челябинск) на основе первичного измерительного преобразователя ЗАО «НПК ВИП» (г. Екатеринбург). Данное измерительное устройство представляет собой измерительный преобразователь, помещённый в титановый защитный корпус. Соединение корпуса и внутренней части производится посредством резьбового соединения. Преобразователь имеет измерительную систему, состоящую из трех частей. Чертеж основной части в осевом разрезе с нанесенными размерами представлен на рисунке 14.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	34
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

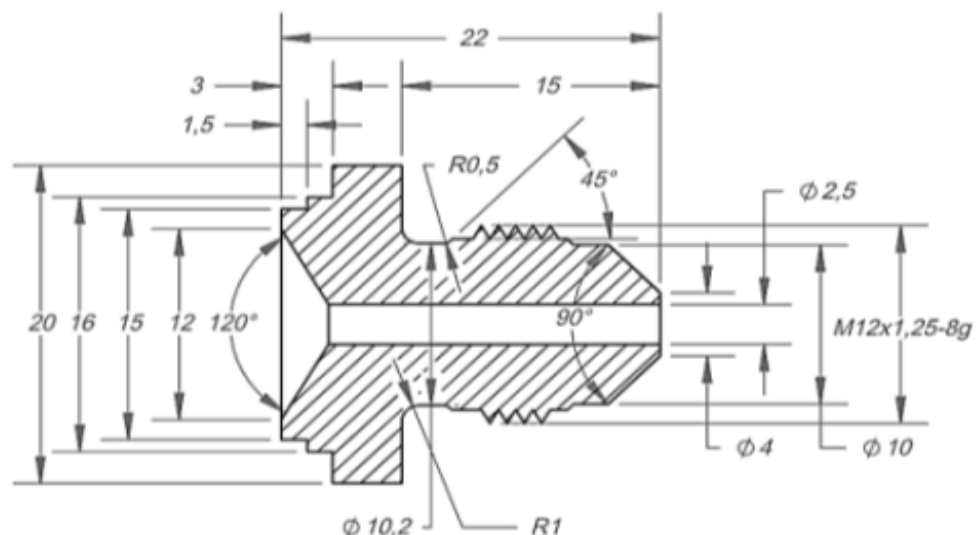


Рисунок 14 – Основная часть измерительного преобразователя

Представленная часть является основанием для крепления мембран, также она содержит канал для кремнийорганической жидкости (в тензопреобразователе первого типа). Данная жидкость необходима для передачи измеряемого давления на измерительную мембрану. Помимо этого, на основную часть нанесена резьба M12x1,25-8g для крепления измерительного преобразователя внутри титанового корпуса.

На верхней части основания крепится элемент, который является внутренней мембраной измерительного преобразователя. Деталь имеет тонкую поверхность, деформирующуюся давлением кремнийорганической жидкости. В середине этой поверхности расположено отверстие для крепления штока верхней части.

Шток верхней части жестко закрепляется сварным швом с осевым отверстием внутренней мембраны. Это соединение используется для передачи давления кремнийорганической жидкости на тонкую поверхность верхней части, являющуюся мембраной с расположенным на ней чувствительным элементом типа кремний на сапфире. Три части измерительной системы соединяются сварными швами. Эскизный вид датчика давления с разделительной мембраной представлен на рисунке 15.

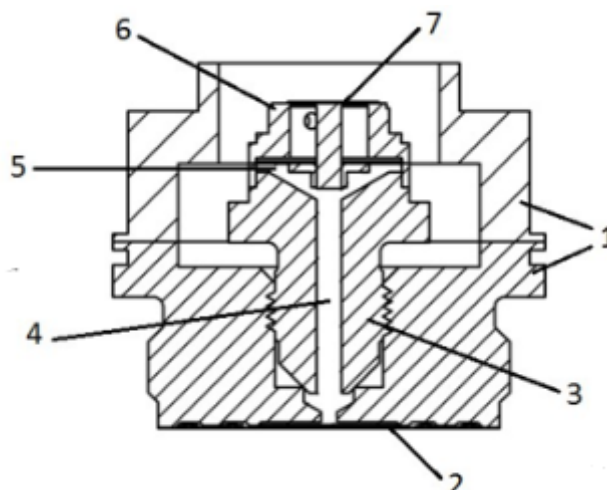


Рисунок 15 – Преобразователь давления с разделительной мембраной

Защитный корпус (1) является основанием для крепления разделительной мембраны (2). Корпус самого преобразователя (3) имеет резьбовое соединение для крепления внутри защитного корпуса (все остальные части измерительной системы соединяются сварными швами).

Также эта часть конструкции содержит канал для кремнийорганической жидкости (4). Данная жидкость необходима для передачи измеряемого давления на внутреннюю мембрану (5), которая в свою очередь жестко закреплена посредством штока с измерительной мембраной (6). На поверхности измерительной мембраны располагается чувствительный элемент – тонкая пластина, имеющая структуру «кремний-на-сапфире» (7).



Рисунок 16 – Общий вид преобразователя давления

Достоинства:

- высокая точность измерения;
- подходят для измерения статических и динамических напряжений, при этом, не искажают полученные данные. Это очень удобно при использовании устройств в транспортных средствах или экстремальных условиях работы;
- небольшие размеры позволяют использовать такие датчики практически в любых измерительных устройствах.

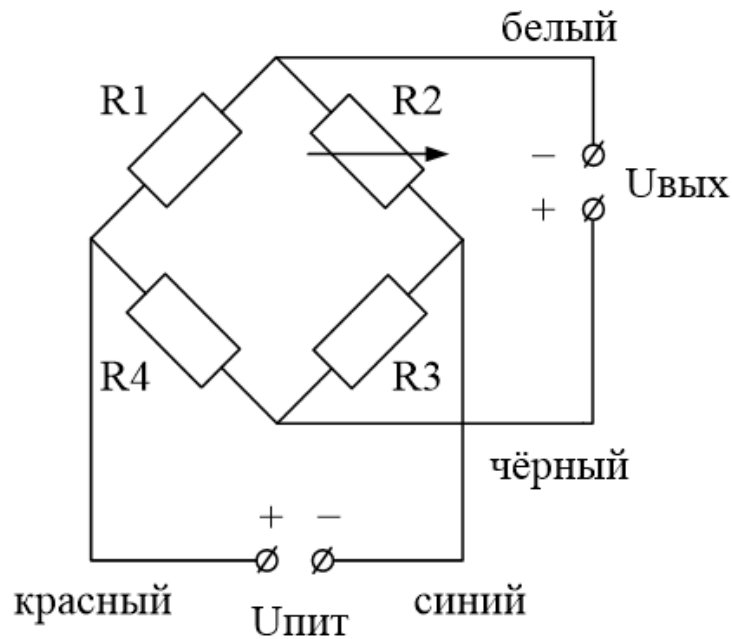


Рисунок 17 – Электрическая схема включения преобразователя давления

Питание в 5 В на преобразователь подаётся через красный и синий провода. Выходной сигнал выводится через чёрный и белый провода.

В данной работе мы использовали двухмембранный преобразователь давления с узким каналом, изготовленный ЗАО “НПК ВИП” (г.Екатеринбург) по ВЮМА40130 309.001.ТУ. Предел измерений — от 0 до 100кПа.

Таблица 3 – Технические характеристики преобразователя давления

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

1.6 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.

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.

						Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	

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.

Векторные функции:

									Лист
									39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

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
									40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 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.

С поддержкой языка MATLAB возможно написать программы и алгоритмы быстрее, чем на классических языках программирования, вследствие того, что нет надобности таких низкоуровневых организационных операций как объявление переменных, определение типов и выделение памяти. Во множества случаев переход на векторные и матричные операции освобождает от необходимости использования циклов for. В итоге одна строка MATLAB кода нередко может заменить некоторое количество строк C/C++ кода.

MATLAB владеет свойствами классических языков программирования, охватывая управление потоками данных, обработку ошибок и объектно-

									Лист
									41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

ориентированное программирование (ООП). Возможность применения основных типов данных, сложных структур данных или же определение пользовательских типов.

Возможность получать итоги незамедлительно, выполняя команды интерактивно по одной за раз. Такой подход разрешает незамедлительно исследовать различные варианты для получения наилучшего решения. Объединив эти интерактивные команды в скрипт или же функцию возможно автоматизировать их выполнение.

Расширения MATLAB имеют интегрированные методы для обработки сигналов и связи, обработки изображений и видеоданных, систем управления и множества иных областей. Сочетая эти методы с вашими возможно воплотить сложные программы и приложения.

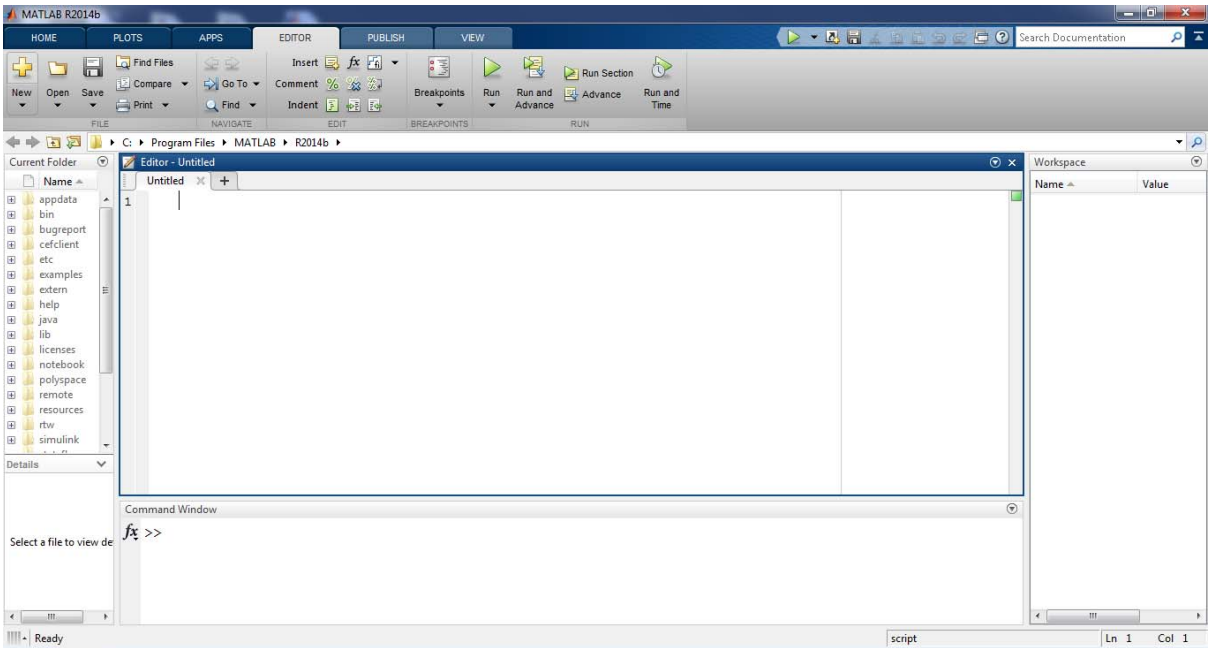


Рисунок 18 – Рабочее окно MATLAB

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

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 [28].

После доказательства сходимости рядов Фурье стало возможным появление теории обобщенных функций, благодаря которой преобразование Фурье стало применимым к решению уравнений, содержащих понятия точечная масса, точечный заряд, 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 четкость изображений фотоснимков небесных тел. Информацию искусственных спутников компьютеры обрабатывают с помощью методов Фурье.

Преобразование Фурье используется в физике плазмы, полупроводниковых материалов, микроволновой акустике, сейсмологии, океанографии, радиолокации, медицине и другое [15].

Разложению в ряд Фурье могут подвергаться различные периодические сигналы [28]. При этом они представляют собой сумму гармонических функций или комплексных экспонент с частотами, которые образуют арифметическую прогрессию. Чтобы такое разложение могло существовать необходимо, чтобы

									Лист
									43
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

фрагмент сигнала, длительность которого один период, удовлетворял условиям Дирихле:

- не должно существовать разрывов второго рода (с уходящими в бесконечность ветвями функции);
- необходимо, чтобы число разрывов первого рода (скачков) было конечным;
- число экстремумов должно быть конечным (примером такой функции, имеющей на конечном интервале бесконечное число экстремумов, является $\sin(1/x)$ в окрестности нуля).

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 – является инструментом спектрального анализа непериодических сигналов.

В качестве иллюстрации перехода от ряда Фурье к преобразованию Фурье очень часто применяется не строгий математически, но зато весьма обоснованный подход.

Периодическая последовательность импульсов представляется произвольного вида. Далее формируется ряд Фурье для нее и затем, не изменяя формы одиночных импульсов, увеличивается период их повторения (промежутки заполняются нулевым значением) и снова рассчитываются коэффициенты ряда Фурье. Из формулы (2) для расчета коэффициентов ряда 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 [28]. Уменьшение общего уровня гармоник при

									Лист
									44
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

делении результата интегрирования на увеличивающийся период T – это единственное дополнительное изменение.

Таким образом, с увеличением периода следования импульсов гармоники будут располагаться ближе друг к другу по частоте, но общий уровень спектральных составляющих уменьшается. При этом вид вычисляемого интеграла (2) не изменяется.

Наконец, если период устремить в бесконечность (периодическая последовательность превращается в одиночный импульс), гармоники спектра плотно займут всю частотную ось, а их амплитуды окажутся на уровне нуля (станут бесконечно малыми). Но взаимное соотношение между уровнями гармоник будет оставаться неизменным, и будет определяться все тем же интегралом (2). Таким образом, при осуществлении спектрального анализа непериодических сигналов выполняется модификация формулы для расчета коэффициентов комплексного ряда Фурье:

- частота становится непрерывным параметром преобразования и перестает дискретно изменяться (то есть $k\omega_1$ в формуле (2) заменяется на ω);
- убирается множитель $1/T$;
- функция частоты $S(\omega)$ является результатом вычислений вместо нумерованных коэффициентов ряда C_k – спектральная функция сигнала $s(t)$. Также она называется спектральной плотностью.

После модифицирования формула (2) преобразуется в формулу прямого преобразования Фурье:

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

Чтобы осуществить преобразование Фурье необходимо, чтобы сигнал удовлетворял следующим требованиям:

- выполнение условий Дирихле;

									Лист
									45
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

- сигнал должен быть абсолютно интегрируемым. Значит, интеграл от его модуля должен быть конечной величиной: $\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)| dt < \infty$

Таким образом, преобразование Фурье (3) 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 [28].

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 19.

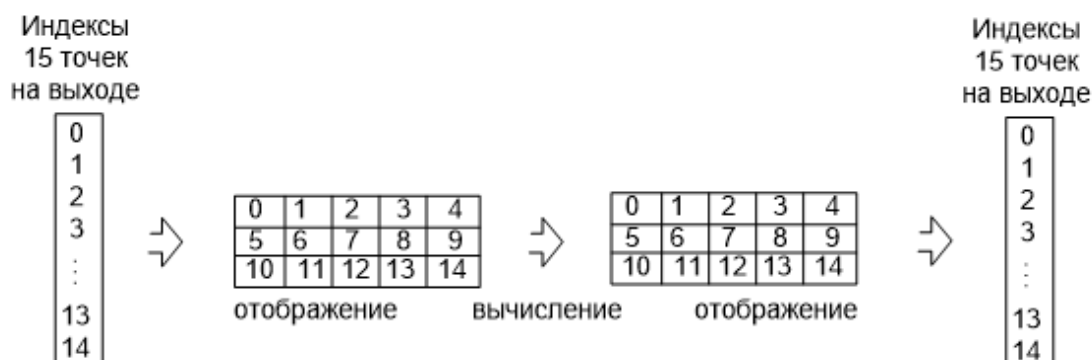


Рисунок 19 – Пример переиндексации по методу Кули-Таки

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 [15].

Преобразование Фурье используется в физике плазмы, полупроводниковых материалов, микроволновой акустике, сейсмологии, океанографии, радиолокации, медицине и другое [15].

Преобразование Фурье является одним из распространенных традиционных методов спектрального анализа [9]. К сожалению, данное преобразование является непараметрическим методом, который предназначен для оценки всего спектра, следовательно, для точечной оценки значений частот его использовать проблематично. Также оно имеет принципиальное ограничение на разрешение по частоте, заданное длительностью анализируемого сигнала. Это обстоятельство существенно ограничивает применение быстрого преобразования Фурье для оценки спектра коротких сигналов.

В настоящее время самой эффективной и скоростной реализацией алгоритма БПФ является аппаратная реализация. Алгоритм непрерывного конвейерного БПФ изображен на рисунке 13. 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 [115].

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

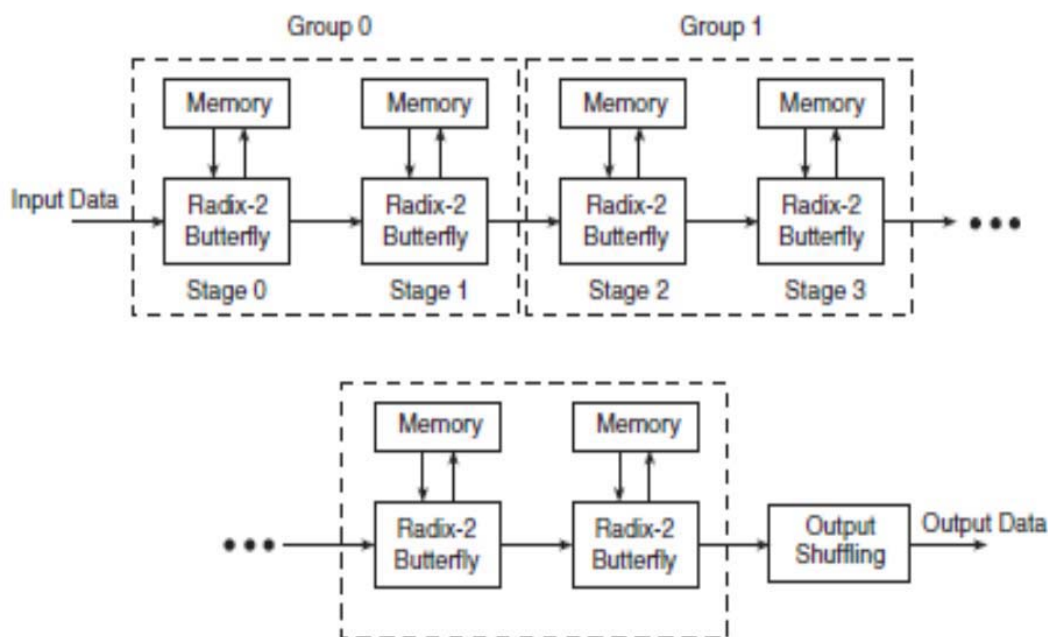


Рисунок 20 – Поточковый конвейерный алгоритм БПФ

Таким образом, конвейерный алгоритм БПФ позволяет непрерывно подавать отсчеты данных и получать результат ДПФ на выходе устройства.

Пакетная реализация на основе «бабочки» по основанию 2 изображена на рисунке 21. 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.

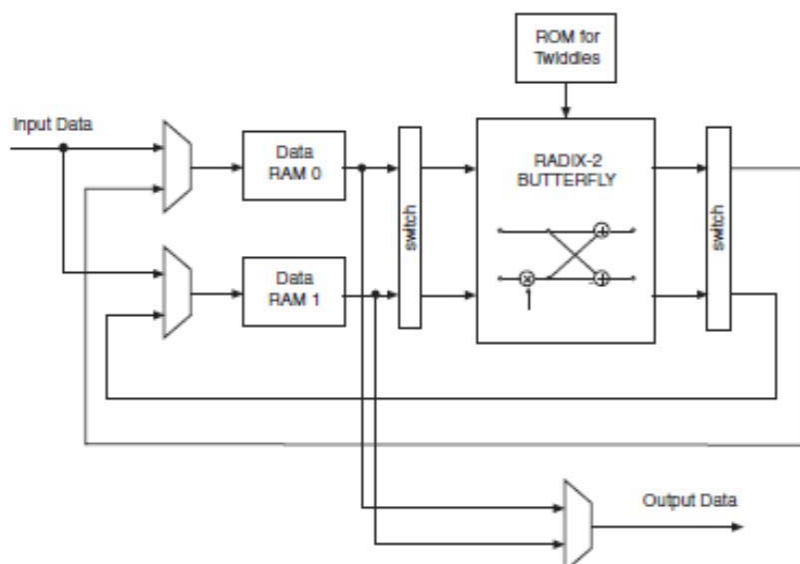


Рисунок 21 – Пакетный алгоритм БПФ «бабочкой» основанию 2

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 [115].

Таблица 4 – 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	

2.3 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
Пуу = y.* conj(y)/Nfft; % комплексное сопряжение
ff = (fs*(0:(Nfft-1))/Nfft)'; % частоты по оси x
Plot (ff, Пуу(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
									50
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 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 объема, 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.

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. 015 ПЗ ВКР	51
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

3 СНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ УДАРНОГО МОЛОТКА

3.1 Описание экспериментальной установки

Определение динамических характеристик преобразователя давления проводилось экспериментально с использованием специального стенда, который позволяет обработать выходной сигнал преобразователя и получить оценки его амплитудно-частотной характеристики. Схема данного стенда приведена на рисунке ниже.

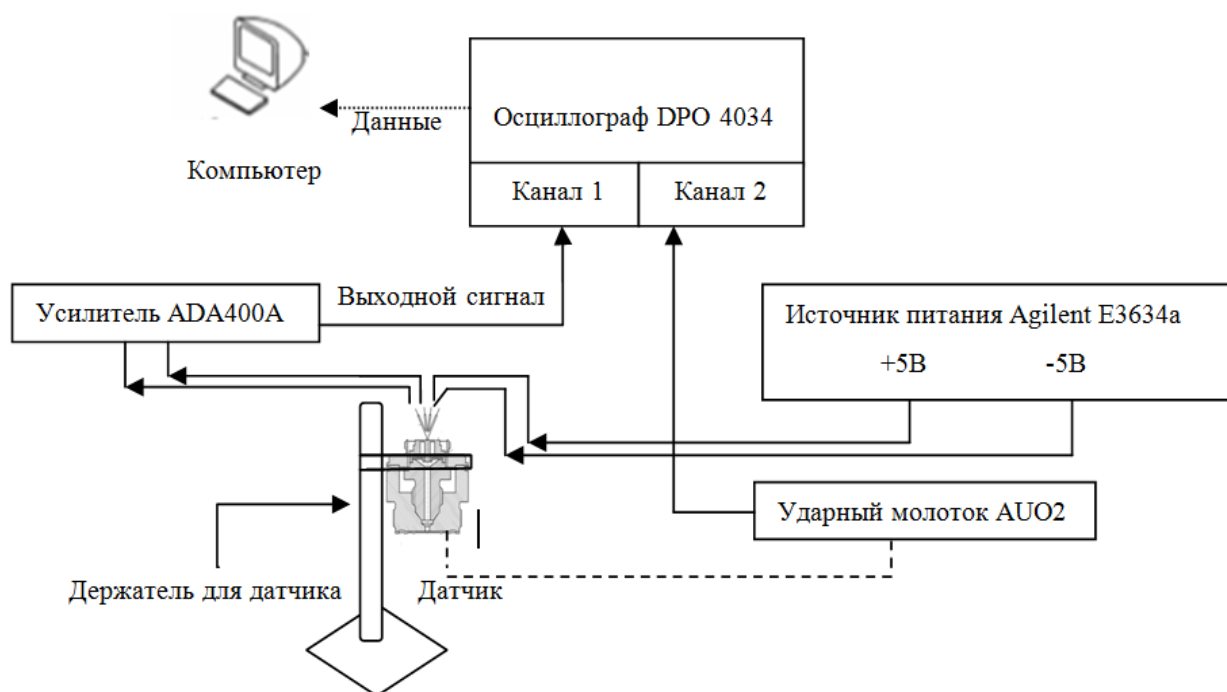


Рисунок 22 – Схема стенда для проведения исследований

Преобразователь давления крепится на штатив, так чтобы при ударе молотком преобразователь не смещался, на него подается питание 5В. Ударный молоток и дифференциальный усилитель подключаются к осциллографу. Ударным молотком ударяют по разделительной мембране датчика, ударное входное воздействие, информационный сигнал с тензомоста поступает на дифференциальный усилитель.

Полученные информационные сигналы отображаются на осциллографе, где для удобства можно настроить масштаб и частоту дискретизации.

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

3.2 Методика определения динамических характеристик с помощью ударного молотка

Решение данной проблемы – определение динамических характеристик при ударном воздействии. В этом случае экспериментально находится переходная функция датчика. Однако переходная функция не позволяет достаточно просто оценить рабочий диапазон измеряемых частот. Гораздо удобнее пользоваться частотными характеристиками, поэтому требуется рассчитать по экспериментально найденной переходной функции АЧХ.

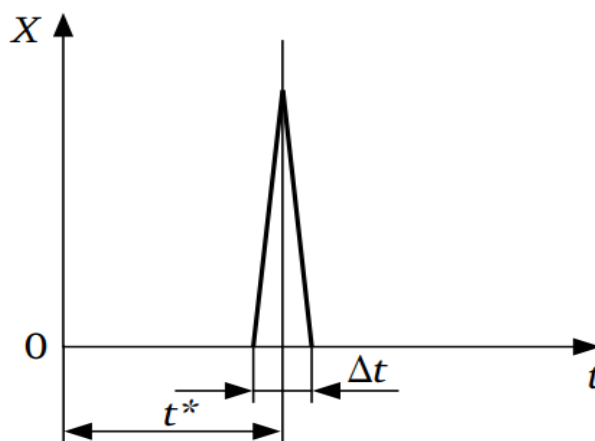


Рисунок 23 – График ударного входного воздействия, прилагаемого к преобразователю давления в момент времени t

Ударное (мгновенное) воздействие является производной функцией от ступенчатого воздействия. В случае, когда измеряемым параметром является какая-то сила, оно действительно может быть интерпретировано как ударная

нагрузка. Ударное воздействие, называемое также 5-функцией, представляет собой «пиковую» нагрузку, которая в пределе имеет стремящуюся к бесконечности ординату при бесконечно малой длительности этой нагрузки ($\Delta t \rightarrow 0$).

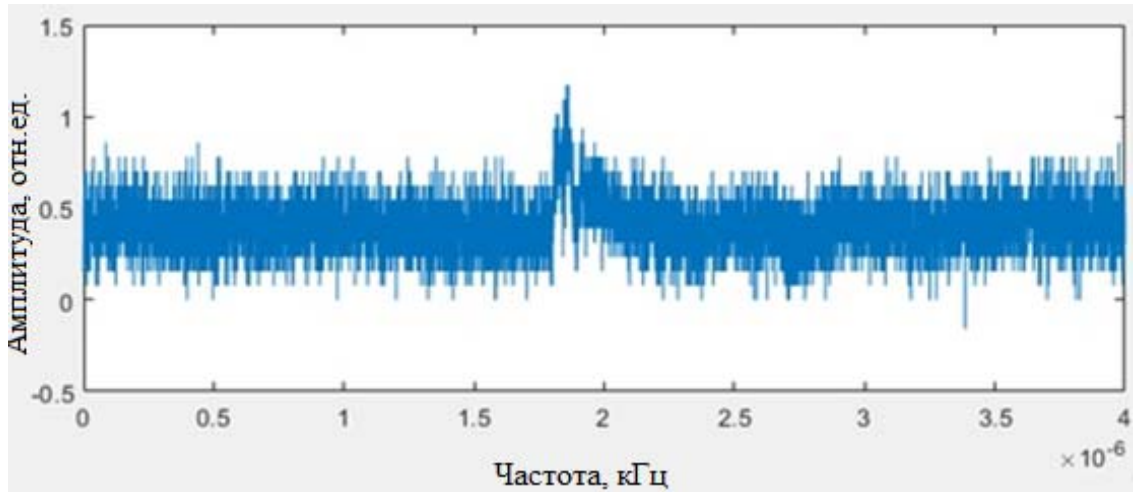


Рисунок 24 – Выходной сигнал ударного молотка AUO2

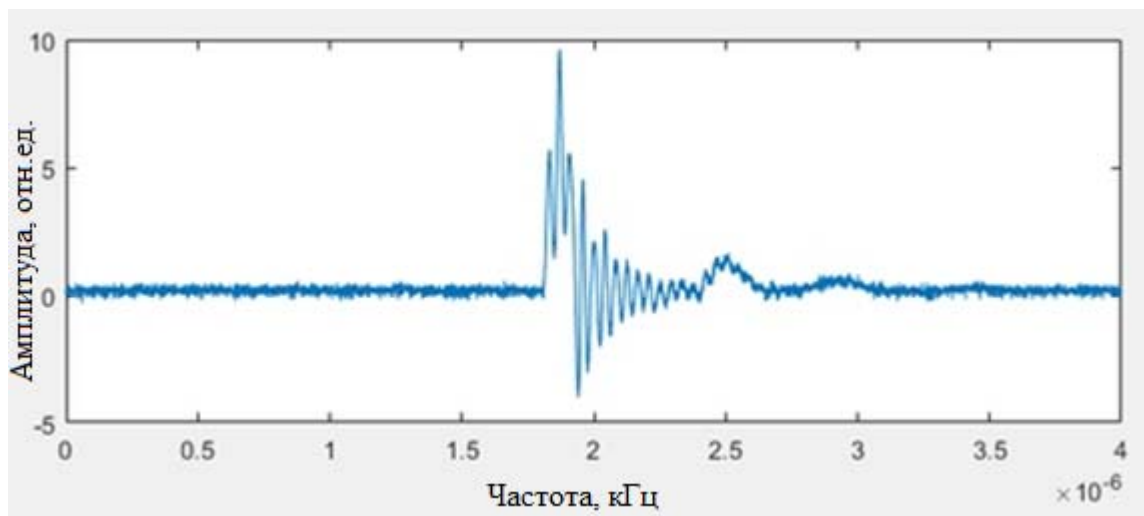


Рисунок 25 – Отклик преобразователя давления на удар молотком AUO2

Для сравнения при равных условиях динамических характеристик преобразователя давления считают, что на их входы поступают воздействия одного и того же вида, а именно: ступенчатые. Данный отклик (рисунок 23) соответствует колебательному характеру переходного процесса, когда выходная

величина постепенно приближается к новому установившемуся значению, совершая за время переходного процесса одно или несколько колебаний, превышая на время новое значение выходной или несколько колебаний, превышая на время новое значение выходной величины, а затем возвращаясь к нему.

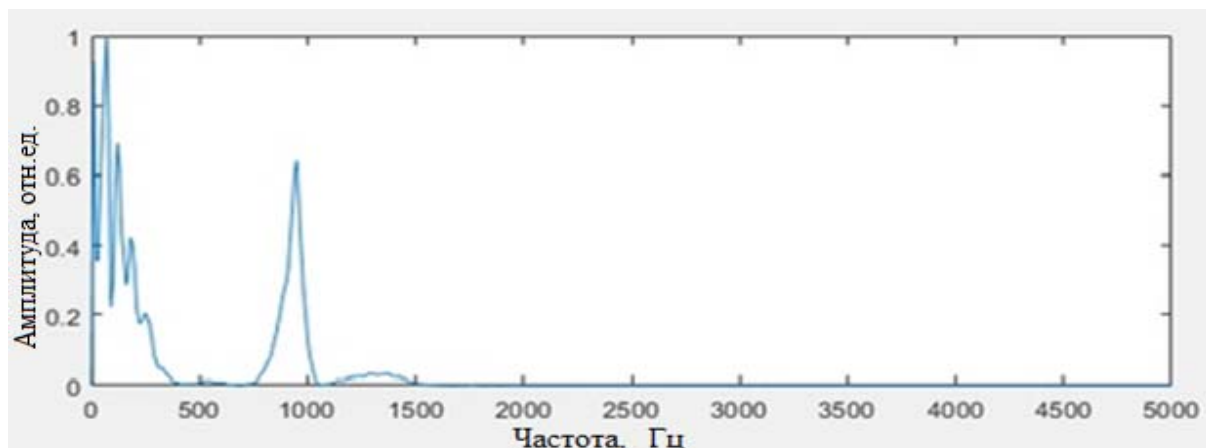


Рисунок 26 – Амплитудно-фазовая характеристика преобразователя давления

Проведем аналогичный эксперимент с преобразователем давления той же конструкции что и выше. На графике получаем частотные характеристики второго преобразователя давления (рисунок 26).

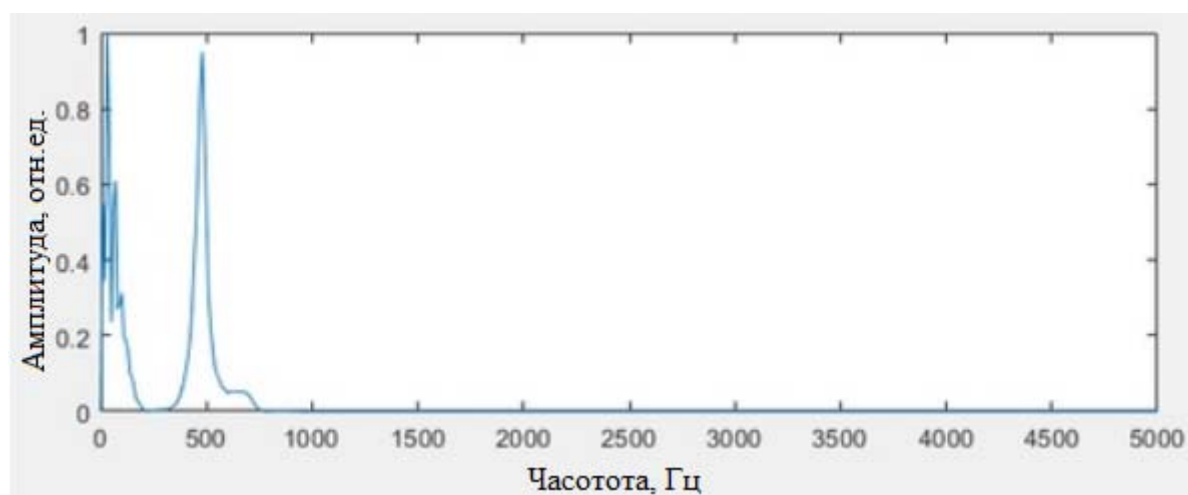


Рисунок 27 – Амплитудно-фазовая характеристика преобразователя давления(2)

3.3 Анализ полученных данных

По спектрам вычисляются АЧХ и ФЧХ сигнала. Все рассчитанные зависимости отображаются в интерфейсе программы в виде графиков.

Результаты спектрального анализа могут использоваться не только для определения характеристик датчика, но и для его диагностирования в процессе производства при наличии статистических данных о влиянии дефектов изготовления и сборки на динамические характеристики и чувствительность.

По графикам следует сказать, что данная методика применима для определения динамической характеристики преобразователя давления.

Как видно по полученным графикам (рисунок 25 и 26), 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 преобразователей давления хорошо видны частотные пики. По этим пикам можно определить изменение конструктивных особенностей датчика, и его возможную метрологическую неисправность.

Таким образом, предложенная методика позволяет построить динамическую характеристику преобразователя давления. Дальнейшая обработка полученных данных должна определяться целью ее проведения. Например, если необходимо оценить возможность работы датчика в условиях синусоидально изменяющегося давления, то достаточно определить отсутствие собственных частот динамической характеристики в области частоты изменения давления. Если же требуется использовать динамическую характеристику для компенсации динамических погрешностей, то нужно перейти к параметрическому представлению ДХ и оценить точность определения параметров, что представляет отдельную достаточно сложную задачу.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	56
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Помимо этого факт индивидуальности характеристики для каждого датчика, возможно, позволит при разработке соответствующих методик оценить состояние внутренних элементов конструкции датчика без его разборки.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Определение динамических характеристик с помощью ударного молотка просто в реализации.

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

3. Резонансные частоты преобразователя влияют на выходной сигнал.

Достигнута цель работы – определения динамических характеристик, собрать стенд и провести опыты, получить АЧХ преобразователя давления.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	57
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе литературы в данной области исследований, были описаны различные методики определения динамических характеристик. Также было выбрано оборудование необходимое для реализации стенда, использовавшегося для получения частотных характеристик. Собран сам 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 преобразователя давления.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

4. Определение динамических характеристик с помощью ударного молотка просто в реализации.

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

6. Резонансные частоты преобразователя влияют на выходной сигнал.

Достигнута цель работы – разработка методики определения динамических характеристик, собрать стенд и провести опыты, получить АЧХ преобразователя давления.

Достигнута цель работы – определения динамических характеристик, собрать стенд и провести опыты, получить АЧХ преобразователя давления.

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

БИблиОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 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.: Стандартинформ, 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.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.

4 Авдеева, О. В. Основы управления техническими системами (Теория линейных систем) : учеб. пособие / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 246 с.

5 Алексеев, К.А. Вейвлет-ряды в задаче оценивания собственных частот датчиков // Датчики и системы. – 2001. – №12

6 Алексеев, К.А. Задача идентификации полных и частных динамических характеристик высокочастотных пьезоэлектрических датчиков переменных давлений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – №7.

7 Бастрыгин, К. И. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.

8 Бендат, Д. Ж. Прикладной анализ случайных данных / Д. Ж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989.

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

									Лист
									59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР				

10 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.

11 Бушуев, О. Ю. Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. Л. Шестаков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 88–97.

12 Бушуев, О. Ю. Исследование динамических характеристик тензометрического преобразователя давления с целью диагностики его состояния / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. О. Чернявский // Датчики и системы. – 2010. – № 4. – С. 53–68.

13 Быкова, Т. В. Повышение точности тензометрических измерительных преобразователей в динамических режимах с использованием аппарата вейвлет-преобразования / Т. В. Быкова, Г. А. Черепашук //Украинский метрологический журнал. – 2009. – № 4.

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

15 Гуцин, А. В. Современные методы и средства реализации алгоритмов быстрого преобразования Фурье в информационных системах / А.В. Гуцин, 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

16 Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним //

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 1. с. 26–37.

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

18 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

19 Кузнецов, С. А. Выбор методов спектрального оценивания для системы контроля динамических характеристик датчиков давления / С. А. Кузнецов, М. Г. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 45–51.

20 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.

21 Марпл-мл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.

22 Мясникова, Н. В. Система для исследования характеристик датчиков динамического давления / Н. В. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Контроль. Управление. – 2013. – № 4 (6). – С. 32–36.

23 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.

24 Пирогов, А. В. Экспериментальное определение собственных частот двухмембранных тензопреобразователей давления/ А. В. Пирогов, В. М. Стучебников // Датчики и системы. – 2006. – № 4.

										Лист
										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР					

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

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

27 Сапожникова, К.В. Метрологическое обеспечение встраиваемых средств измерений/ К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Измерительная техника. – 1992. – №6. – с. 59-60.

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

29 Стучебников В. М. Структуры “кремний-на-сапфире” как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 6.

30 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.

31 Филатова, О. С. Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков динамических давлений в газообразной среде на ударной трубе высокого давления / О. С. Филатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 43–47.

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

33 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.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

34 Шипунов, А.В. Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков давления: сравнительный анализ методов // Приборы и системы управления. – 1999. – №7.

35 Beeby, S.P. Microprocessor implemented self-validation of thickfilm PZT/silicon accelerometer / S. P. Beeby, N. J. Grabham, N. M. White // Sensors and Actuators A: Physical. – 2001. – Vol. 92.

36 Bernhard, F. Application of self-calibrating thermocouples with miniature fixed-point cells in a temperature range from 500oC to 650oC in steam generators/ D. Boguhn, S. Augustin, H. Mammen, A. Donin // Proceedings of XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia, June 22-27 2003, P. 1604 – 1608.

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

38 Ding, E.L. Model-based diagnosis of sensor faults for ESP systems / E.L. Ding, H. Fennel, S.X. Ding // Control Engineering Practice. – 2004. – Vol. 12.

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

40 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.

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

42 Henry, M. P Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes, Vestnik YuUrGU. Ser. Mat. Model. Progr., 2017, Volume 10, Issue 4, 92-104

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

44 Henry, M. The Prism. Efficient Signal Processing for the Internet of Things / Manus Henry, Felix Leach, Martin Davy, Oleg Bushuev, Michael Tombs, Feibiao Zhou and Salah Karout // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2017. – P. 22-32

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

- 45 Massoumnia, M. Failure detection and identification. IEEE Trans. Automat/ G.C. Verghese, A.S. Willisky. // (1989). Contr., 34:316-321
- 46 Patton, R.J. Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application.// P.M. Frank, R.N. Clarke //Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1989.
- 47 Schmidt, R. O. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – V. 34, № 3. – P. 1276-1280
- 48 Roy, R. Speech and Signal Processing / R. Roy, T. Kailath // IEEE Transactions on Acoustics. – 1989. – V. 37, № 7. – P. 1984-1995
- 49 Steven, X. Model-based fault diagnosis techniques design: schemes, algorithms, and tools. – Berlin: Springer-Verlag, 2008
- 50 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.
- 51 Peter, T. Inverse Problems / T. Peter, G. Plonka. – 2013. – V. 29, № 2 29(2)
- 52 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.
- 53 Taymanov, R Metrological Self-Check and Evolution of Metrology // Measurement. – 2010. – V. 43. – N7. – pp. 869-877.
- 54 Thomas, P. Prony's Method for Multivariate Signals / P. Thomas, P. Gerlind, S. Robert // PAMM. – 2015. – P. 665-666
- 55 Voskresenskii, D.I. Aktivnye fazirovannye antennye reshetki [Active Phased Array Antennas], Moscow, Radiotekhnika, 2004. (in Russian)
- 56 Hua, Y. Speech and Signal Processing / Y. Hua, T. K. Sarkar // IEEE Transactions on Acoustics. – 1990. – V. 38, № 5. – P. 914-924

ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
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; %количество точек с осциллографа  
  
set(obj1, 'InputBufferSize', 8.1*n); %InputBufferSize выделение памяти  
  
fopen(obj1);  
  
fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH1');%%%%сигнал с датчика  
  
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 2');  
  
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');  
  
fprintf(obj1, 'DATA:STAR 0');  
  
fprintf(obj1, 'DATA:STOP 20000');  
  
data6 = query(obj1, 'CURVE?');  
  
kate=str2num(data6)/3277.5;%%%%изменять коэффициент в зависимости от  
масштаба  
  
x=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);  
  
subplot(3, 2, 1),plot(x,kate);  
  
retain1(kate);  
  
pause(2);
```

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	65
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		


```

fprintf(obj1, 'DATA:SOU CH2');%%%%%%%%сигнал с датчика
fprintf(obj1, 'DATA:WIDTH 2');
fprintf(obj1, 'DATA:ENC ASCII');
fprintf(obj1, 'DATA:STAR 0');
fprintf(obj1, 'DATA:STOP 20000');

data7 = query(obj1, 'CURVE?');

kate1=str2num(data7)/3277.5;%%%%%%%% изменить коэффициент в зависимости от
масштаба

x1=0:4*10^(-10):4*10^(-10)*n-4*10^(-10);

function retain1(x)

%x=[1 2 3 10 2 -5 23.6 55];

tt=datetime('now');%%%%%%%%получение времени

ttd=datestr(tt);%%%%%%%%преобразование в строку

d2 = yyyymmdd (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);

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

```

a5=DateVector(5);
b5=num2str(a5);
a6=DateVector(6);
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);
function [sp,ffs] = spfft (fs,signal,fig_mode)
% spfft FFT with required parameters
% spfft (fs,signal,fig_mode)
%
% Inputs:
% fs - sampling frequency (смотрим на осциллографе дополн. выб/с)
% 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:

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

```

% sp - Square of FFT spectrum of a signal (y-axis)
% ffs - Frequencies (x-axis)

qwe=signal;

[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);

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

xlim([0 250]);

end

end

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019. 015 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		69