

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ  
ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ГАЗА**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Мартыновой Тамары Игоревны  
студентки 4 курса, 4022 группы,  
направления подготовки 03.03.02 Физика  
Института физики

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. профессор

В.В.Петров

Заведующий кафедрой  
компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала Института радиотехники  
и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Проблема измерения расхода различных жидкостей и газа с высокой точностью имеет большое значение при организации коммерческого учета. Отличительными особенностями ультразвуковых расходомеров являются, во-первых, отсутствие у них движущихся частей, а во-вторых, устранение риска утечки, поскольку при их использовании не нарушается целостность трубопроводов. В основе конструкции подобных расходомеров лежит ультразвуковой пьезопреобразователь.

**Цель работы** – измерение основных параметров и характеристик ультразвуковых пьезопреобразователей, а также изучение возможности диагностики скрытых дефектов по значениям этих параметров и характеристикам пьезопреобразователей.

**Задачами** работы являются:

1. Измерение диаграммы направленности
2. Измерение зависимости электрического импеданса от частоты
3. Определение температурных коэффициентов
4. Измерение коэффициента преобразования

**Методы исследования.** В работе использованы измерительные методы – измерения диаграмм направленности, зависимости электрического импеданса от частоты, коэффициента преобразования посредством специальных установок и приборов.

**Предмет исследования** – экспериментальное исследование датчиков для ультразвуковых расходомеров газа.

К числу **новых (защищаемых) результатов** относятся: выявленная возможность диагностики скрытых дефектов у ультразвуковых пьезопреобразователей с помощью измеренной зависимости электрического импеданса от частоты.

**Достоверность результатов** подтверждается сравнением полученных результатов проверки датчика с ТЗ, использованием современных алгоритмов и аппаратуры.

**Практическая значимость** работы обусловлена возможностью выявления скрытых дефектов у ультразвуковых пьезопреобразователей (в частности, плохую склейку согласующего слоя с корпусом) и применения при решении задач контроля качества при производстве пьезопреобразователей.

**Структура ВКР.** Выпускная квалификационная работа (ВКР) содержит введение, 3 главы, заключение, список использованных источников (11 наименований).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой,** обзорной по характеру главе ВКР, приводятся принципы измерения расхода жидкостей и газов. Так как определить время с помощью секундомеров невозможно для данного метода, потому что временная разность находится в пределах нано или пикосекунд, используются следующие принципы интерпретации сигнала: фазовый, частотный, времяимпульсный. В данной главе также рассмотрены характеристики ультразвуковых расходомеров и их классификация.

**Ультразвуковые расходомеры с коррекцией на скорость звука и плотность измеряемого вещества.** Для измерения массового расхода необходимый дополнительный пьезоэлемент, возбуждаемый на резонансной частоте, который посылает акустические колебания в измеряемое вещество. Напряжение, снимаемое с него, пропорционально удельному акустическому сопротивлению вещества, если последнее много меньше сопротивления генератора. Умножая электрический сигнал, создаваемый этим пьезоэлементом, на сигнал, пропорциональный объемному расходу, получим на выходе сигнал, пропорциональный массовому расходу.

**Ультразвуковые расходомеры с колебаниями, перпендикулярными движению.** Эти ультразвуковые расходомеры существенно отличаются от выше рассмотренных тем, что здесь отсутствуют акустические колебания, направляемые по потоку и против него. Вместо этого ультразвуковой луч направляется перпендикулярно к движению потока и измеряется степень отклонения луча от перпендикулярного направления, зависящая от скорости и измеряемого вещества. Излучает акустические колебания лишь один пьезоэлемент. В качестве приемника этих колебаний служат один или два пьезоэлемента (рис. 1).

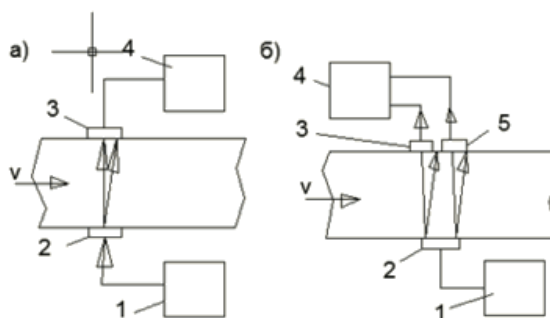


Рис. 1. Схема расходомера с излучением, перпендикулярным к оси трубы: а) с одним приемным пьезоэлементом, б) с двумя приемными пьезоэлементами (1- генератор; 2 – излучающий пьезоэлемент; 3, 5 – приемные пьезоэлементы; 4 – усилитель)

**Доплеровские ультразвуковые расходомеры.** Доплеровские расходомеры основаны на измерении, зависящей от расхода доплеровской разности частот, возникающей при отражении акустических колебаний неоднородностями потока. Разность частот зависит от скорости частицы, отражающей акустические колебания и скорости распространения этих колебаний.

При симметричном расположении излучающего и приемного пьезоэлементов (рис. 26) относительно скорости углы наклона осей труб равны между собой.

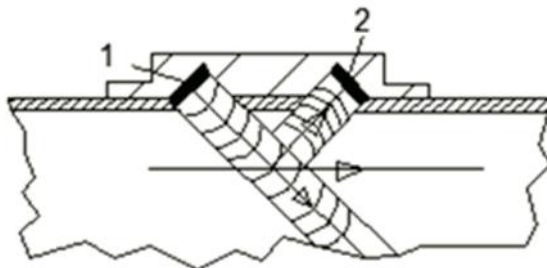


Рис.2. Схема доплеровского преобразователя расхода  
(1, 2 – излучающий и приемный пьезоэлемент)

В основном пьезоэлементы у доплеровских расходомеров помещают снаружи трубы. Это особенно важно в случае измерения загрязненных и абразивных веществ, но при этом приходится считаться с дополнительными погрешностями, возникающими вследствие преломления луча в стенке трубы.

По сравнению с другими ультразвуковыми расходомерами доплеровские имеют наименьшую точность, так как выходной сигнал представляет целый спектр частот, возникающих вследствие сдвига исходной частоты не одной частицей – отражателем, а рядом частиц, имеющих различные скорости. Поэтому относительная погрешность измерения расхода обычно не менее 2-3 %.

**Акустические длинноволновые расходомеры (низкой частоты).** В отличие от всех ранее рассмотренных ультразвуковых расходомеров длинноволновые акустические расходомеры работают на низкой частоте (звук). На рис. 3 показана схема датчика расхода испытательного образца этого расходомера.

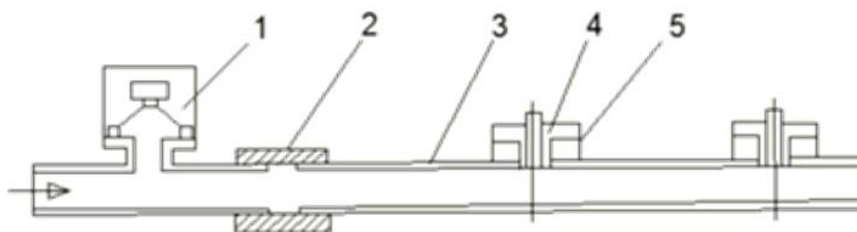


Рис.3. Низкочастотный акустический расходомер

В обзорной главе приведены области применения ультразвуковых расходомеров. В настоящее время главным потребителем расходомеров является

ся нефтегазовая отрасль. В нефтегазовой отрасли расходомеры применяются для учета добычи, транспортирования, движения продукции на территории перерабатывающих заводов и за их пределами и т.п.

Помимо нефтегазовой отрасли ключевыми отраслями-потребителями расходомеров являются: химическая отрасль, тепловые, электрические и комбинированные станции; водоподготовка, водоснабжение и водоотведение; пищевая промышленность; фармацевтическая промышленность; микроэлектронная промышленность; целлюлозно-бумажная промышленность; металлургия; машиностроение; сельское хозяйство.

Максимальное использование нашли расходомеры, основанные на передвижении акустических колебаний. Расходомеры, на основе измерения разности времен прохождения акустических колебаний, используются крайне не редко, так как гораздо меньше чувствительны предыдущих. Ультразвуковые расходомеры на основе эффекта Доплера используется чаще для измерений локальных скоростей потока. Ультразвуковые расходомеры с длинными волнами были созданы не так давно, и пока нет широкого диапазона применения.

**Во второй главе ВКР** решается задача выбора электроакустических преобразователей. Электроакустические преобразователи (ЭАП) – это устройства, преобразующие электрическую энергию в акустическую (энергию упругих колебаний среды) и наоборот (рис. 4). В зависимости от направления преобразования различают собственно ЭАП (излучатели) и приемники звука (датчики, сенсоры)

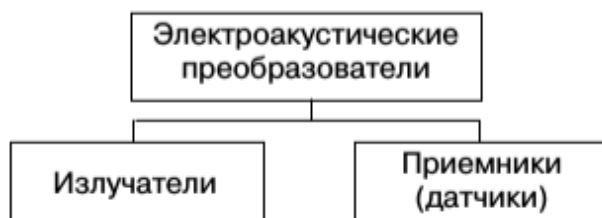


Рис. 4. Классификация преобразователей по выполняемой функции

Из всех преобразователей наиболее актуальным оказался ультразвуковой пьезопреобразователь. Принцип работы пьезоэлектрических датчиков основан на применении прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов. Суть прямого пьезоэлектрического эффекта состоит в электрической поляризации определенного вида диэлектриков, называемых пьезоэлектриками (сегнетоэлектриками, ферроэлектриками), при механическом напряжении в их материале. Обратный пьезоэлектрический эффект основан на том, что электрическая поляризация порождает механическое напряжение в пьезоматериале или изменение геометрических размеров пьезоэлементов. Иными словами, прямой пьезоэлектрический эффект заключается в том, что образуются электрические заряды в пьезоэлектрическом материале, при приложении к нему механической силы, а обратный пьезоэффект заключается в возникновении колебаний при подключении пьезоэлемента к источнику электрического напряжения.

Во второй главе рассмотрены основные требования к преобразователям. Их можно сформулировать следующим образом:

- преобразователи должны быть обратимыми;
- коэффициент преобразования должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить уверенный прием акустической волны на заданном расстоянии (иногда до 1 м и более);
- рабочая частота от 50 до 200 кГц;
- минимальная передача акустической волны в стенки трубопровода;
- диапазон рабочих температур от минус 50 до 50 °С;
- диаграмма направленности должна быть достаточно широкой, чтобы обеспечить работу при больших скоростях газового потока (при движении газа происходит отклонение акустического пучка от первоначального направления);
- импульс с приемного преобразователя должен быть достаточно коротким и иметь крутой фронт.

Форма электрического сигнала, приведенная на рисунке 5, может считаться удовлетворительной, так как вслед за основным (первичным) сигналом – цугом, который содержит около 5 колебаний, принимаются еще несколько «биений» снижающейся амплитуды. В данном случае амплитуда 2-го биения составляет примерно 43% от амплитуды основного сигнала, а амплитуды последующих биений примерно 10%.

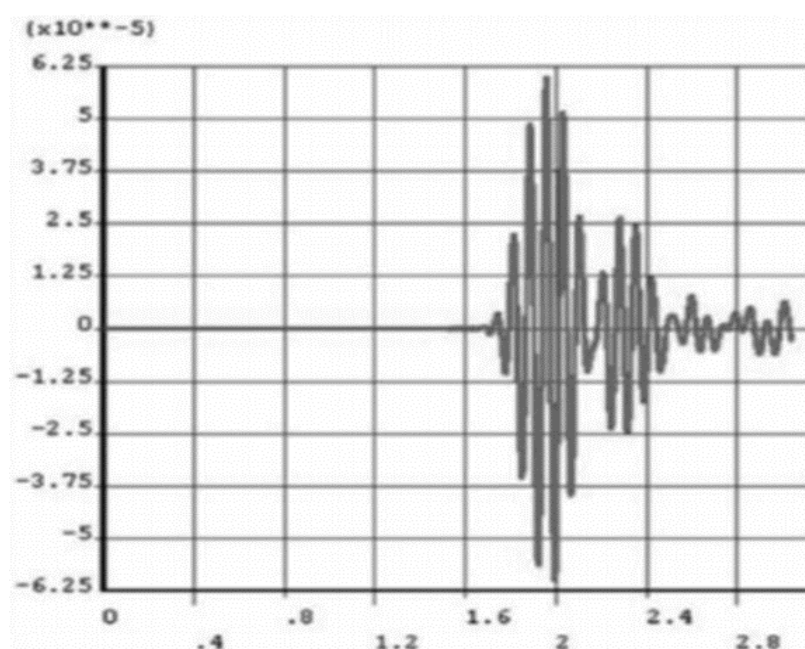


Рис. 5. Форма электрического сигнала на приемнике

**В третьей главе ВКР** рассмотрены вопросы построения диаграммы направленности преобразователей, измерения электрического импеданса от частоты, определения температурных коэффициентов, определение коэффициента преобразования.

**Метод построения диаграммы направленности.** Диаграмма направленности преобразователей определялась с помощью установки, схема которой представлена на рисунке 6.

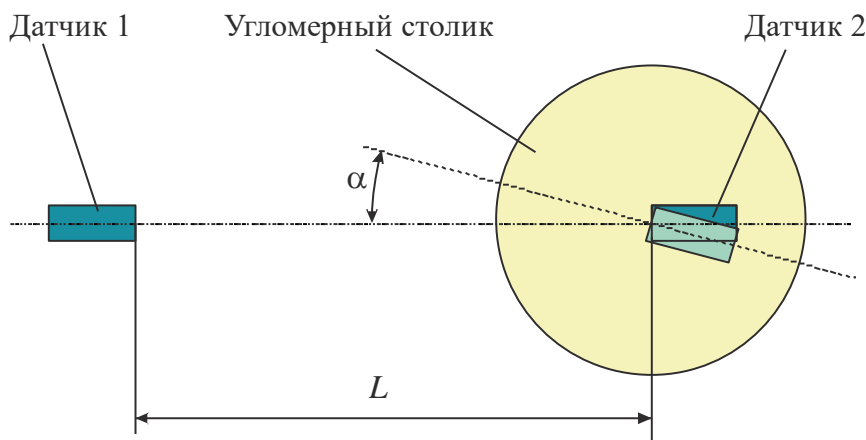


Рис. 6. Схема установки для измерения диаграммы направленности

В эксперименте снимались зависимости уровня сигнала от углового положения исследуемого датчика. После проведения серии измерений результаты обрабатывались и нормировались к максимальному значению. По полученным данным была построена диаграмма направленности, приведенная на рисунке 7. Видно, что измеренная расходимость по уровню  $-3$  дБ составляет примерно 13 градусов, а по уровню  $-6$  дБ – около 22 градусов.

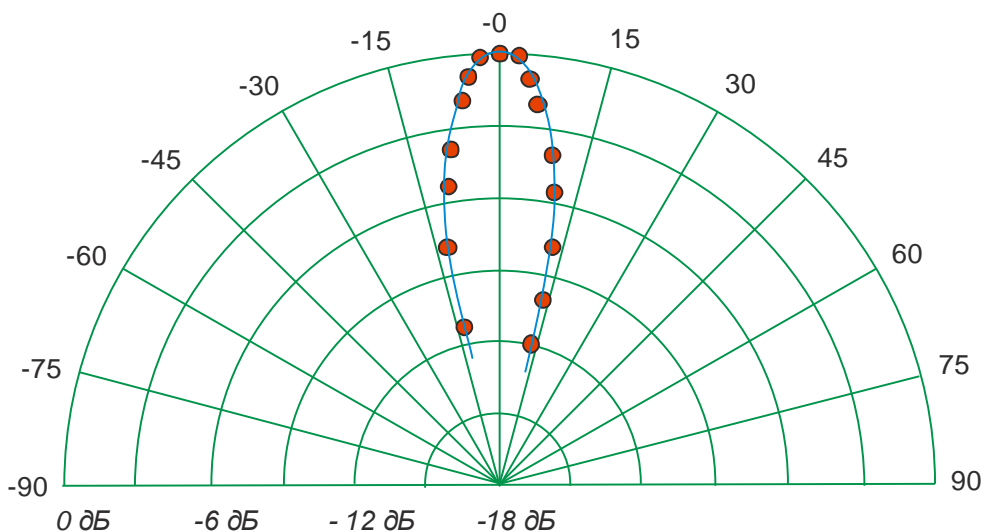


Рис. 7. Диаграмма направленности преобразователя

**Измерение зависимости электрического импеданса от частоты.** Для измерения частотных зависимостей импеданса была использована измерительная схема на базе специализированного чипа AD5933. Блок-схема устройства представлена на рисунке 8.

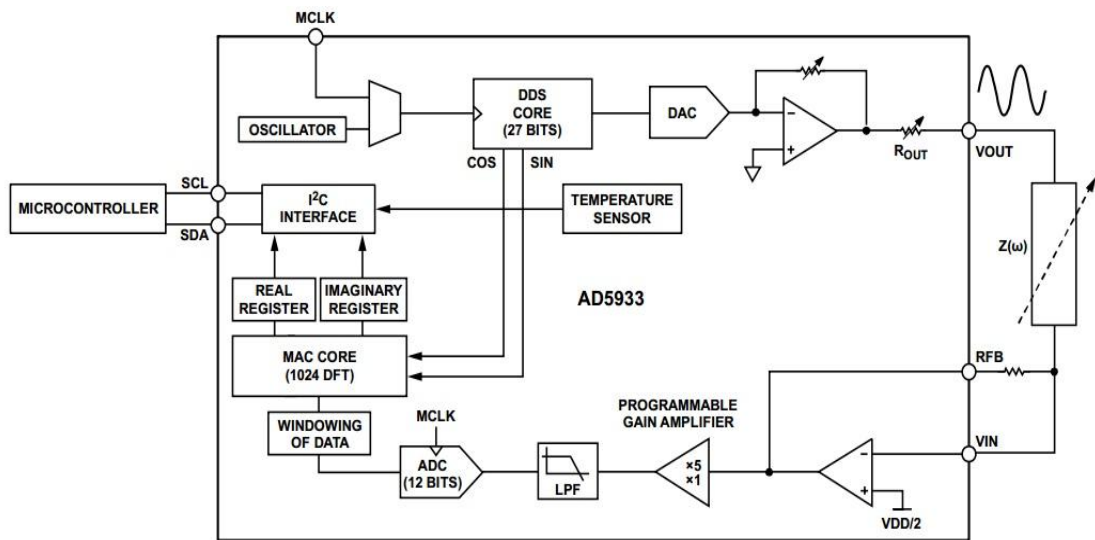


Рис. 8. Блок-схема измерителя импеданса на базе микросхемы AD5933

Схема подключается к ПК. На рисунке 9 представлено рабочее окно управляющей программы с построенной частотной характеристикой одного из пьезопреобразователей.

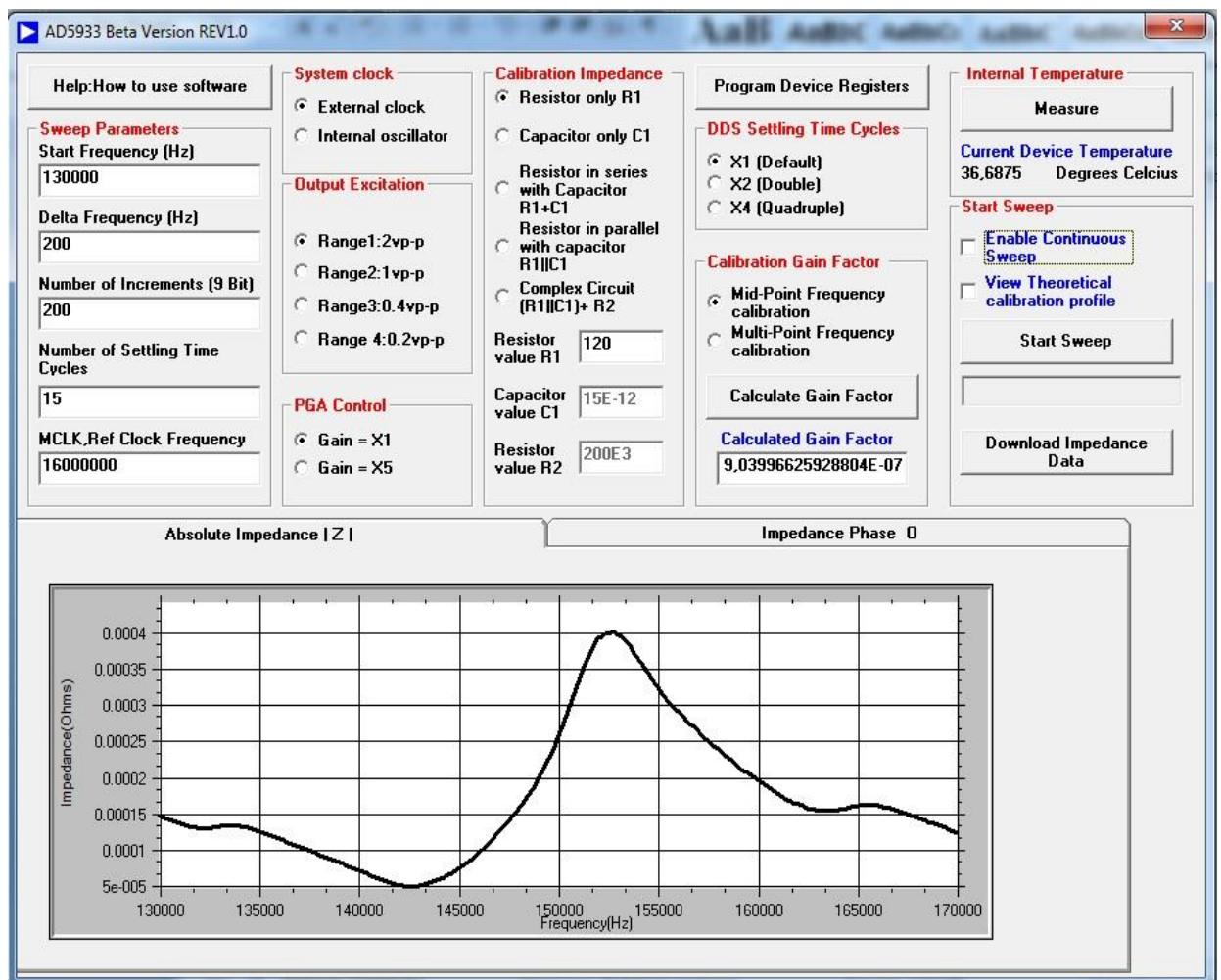


Рис. 9. Рабочее окно программы AD5933 Evaluation Software



С помощью этой зависимости было выявлено, что в случае отсутствия дефектов форма кривой существенно меняется при изменении акустического импеданса нагрузки (например, если погрузить излучающую поверхность в воду или просто прикоснуться к ней пальцем), при этом значительно смещается резонансная частота преобразователя. Если же нарушена склейка между согласующим слоем и корпусом, то резонансная частота слабо зависит от нагрузки.

**Определение температурных коэффициентов.** В ходе выполнения работы была произведена оценка влияния температуры на резонансную частоту преобразователей.

Температурный коэффициент оказался равным

$$K_t = (f_2 - f_1) / (t_2 - t_1) = -0,02 \text{ кГц/град}$$

**Измерение коэффициента преобразования.** В ходе выполнения работы было проведено измерение коэффициента преобразования входного напряжения в выходное (в импульсном режиме) для контрольной пары преобразователей. Схема измерений схематически представлена на рисунке 10.

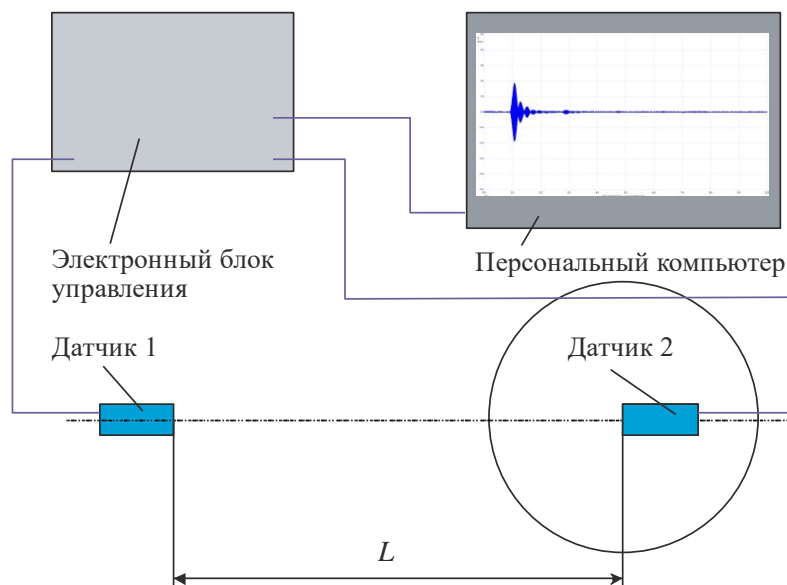


Рис. 10. Установка для измерения коэффициента передачи

При заданных условиях амплитуда импульса оказалась равной  $U_{имп} = 2,8\text{В}$ .

Отсюда, с учетом коэффициента усиления усилителя, получается искомый коэффициент преобразования

$$K_{пр} = U_{имп} / (K_u \cdot U_{вх}) = 2,8\text{В} / (500 \cdot 25\text{В}) = 2,2 \cdot 10^{-4}, \text{ или}$$

$$K_{пр} = 0,22 \text{ мВ/В}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрены классификации ультразвуковых расходомеров и электроакустических преобразователей. В настоящее время наиболее актуальным для нужд народного хозяйства, ввиду маленькой погрешности измерения и долговечности прибора, является использование в ультразвуковых расходомерах акустических пьезопреобразователей. В экспериментальной части работы проведено исследование основных параметров и характеристик пьезопреобразователей, таких как диаграмма направленности, зависимости электрического импеданса от частоты, коэффициента преобразования, температурного коэффициента для резонансной частоты. С помощью измеренных зависимостей электрического импеданса от частоты была установлена возможность выявлять скрытые дефекты у пьезопреобразователей, в частности, плохую склейку корпуса с согласующим слоем. При исправном датчике форма кривой зависимости импеданса от частоты  $Z(f)$  существенно меняется при изменении акустического импеданса нагрузки, а при неисправном датчике вышеупомянутая кривая не сильно меняет свои значения при изменении акустического импеданса нагрузки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красильников В.А. Введение в акустику. М. : Изд-во МГУ, 1992. 152 с.
2. Харитонов А.В. Электрические схемы-аналоги электроакустических преобразователей. Л: ЛЭТИ, 1979. 59 с.
3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : Справочник. 5 изд. В 2 кн. СПб : Политехника, 2002. Кн. 1. 409 с. 2004. Кн. 2.
4. Ильинский В.М. Измерение массовых расходов. М.: Энергия, 1973. 144 с.
5. Хансуваров Т.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня. М.: Изд-во стандартов, 1990.
6. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации // Пьезоэлектрическое приборостроение. В 3 т. Т. 3. Ростов-на-Дону: Изд-во СКИЦ ВШ, 2006. 346 с.
7. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г. Электроакустические преобразователи. М. : Техносфера, 2013. 296 с.
8. Петров П.Н. Акустика. Электроакустические преобразователи. СПб : СПбГУАП (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения), 2003. 80 с.
9. Богуш О.М., Макаров Д.Г. Акустические пьезоэлектрические преобразователи для многолучевых ультразвуковых расходомеров газа. ООО «Пьезоэлектрик», Ростов-на-Дону. 10 с. URL : <https://docplayer.ru/50754030-Akusticheskie-pezoelektricheskie-preobrazovateli-dlya-mnogoluchevyh-ultrazvukovyh-rashodomerov-gaza.html> (дата обращения 31.05.2021).
10. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезопреобразователей. СПб: Политехника, 2014. 294 с.
11. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. 5-е изд. М.: Мир, 1988. 704 с.