

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ствами описанного режима работы являются уменьшение обратного хода, возможность снижения амплитуды управляющих импульсов, повышение средней скорости перемещения. Недостатком является необходимость управления сериями импульсов. При этом величина смещения ходовой части привода при первом и последнем импульсах будет близка к нулю.

Таким образом, исследование работы пьезоэлектрического инерционного привода показало следующее. Для снижения обратного хода рекомендуется повышать скважность управляющих импульсов. При этом привод будет функционировать в асинхронном режиме, отличающемся минимизацией продолжительности фазы синхронизации положения элементов кинематической пары. Представленный режим принципиально расширяет возможности инерционных приводов, позволяя отказаться от кинематических пар с сухим трением, использовать смазочные материалы, снизить износ элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anders M., Thaer M., Heiden C. Simple micropositioning devices for STM // Surface Science. vol. 181. №1-2. 1987. P.176-182
2. Инерционный двигатель. Патент 2297072 РФ. № 2005134280/28: заявл. 08.11.2005; опубл. 10.04.2007. Бюл. № 10.
3. Липанов А.М., Гуляев П.В., Шелковников Е.Ю. Прецизионный пьезодвигатель наноперемещений для сканирующего туннельного микроскопа // Датчики и системы. №9. 2004. С. 30-33
4. Гуляев П.В., Шелковников Ю.К., Тюриков А.В., Осипов Н.И. Высокоточный инерционный пьезоэлектрический привод вращательно-поступального типа // Электротехника. 2010. №10. С. 8-11
5. Липанов А.М., Гуляев П. В., Шелковников Е.Ю., Тюриков А. В.. Инерционный пьезоэлектрический шаговый привод субнанометровой точности // ПТЭ. №5. 2009. С. 121-122
6. Hongzhuang ZHANG, Ping ZENG, Shunming Hua, Guangming CHENG. Zhigang Yang Impact drive rotary precision actuator with piezoelectric bimorphs //Front. Mech. Eng. China. 2008, №3(1). P 71-75
7. Ленк А. Электромеханические системы: Системы с распределенными параметрами. М.: Энергоатомиздат, 1982. 472 с.
8. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие— М.: Энергоатомиздат, 1987. 384с.
9. Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник.- СПб.: Политехника, 1994. 608 с.

К.т.н., с.н.с. П.В. Гуляев, д.т.н., зав. лаб. Е.Ю. Шелковников, к.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Тюриков, к.т.н., с.н.с. С.Р. Кизнерцев, аспирант М.Р. Гафаров, студент С.И. Липанов – (3412) 21-89-55, iit@udman.ru - Институт прикладной механики УрО РАН.

УДК 621.317.761; 621.317.762; 621.317.7.023

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, Е.В. Ильченко

Статья посвящена разработке прибора для контроля параметров ультразвуковых колебательных систем, предназначенных для работы в составе ультразвуковых установок различного технологического назначения. Приводится структурная схема и методика проведения измерений. Анализируются результаты измерений, проведенных при помощи созданного прибора.

Ключевые слова: добротность, резонанс, контроль, ультразвук.

Введение

Ультразвук представляет собой волнообразно распространяющееся колебательное движение частиц среды и характеризуется рядом отличительных особенностей по сравнению с колебаниями слышимого диапазона. В ультразвуковом диапазоне частот сравнительно легко получить направленное излучение; ультразвуковые колебания хорошо поддаются фокусировке, в результате чего по-

вышается интенсивность ультразвуковых колебаний в определенных зонах воздействия. При распространении в газах, жидкостях и твердых телах ультразвук порождает уникальные явления, многие из которых нашли практическое применение в различных областях науки и техники [1]. Высокоэффективное преобразование энергии электрических колебаний в упругие ультразвуковые, их концентрация и ввод в обрабатываемые среды

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

остаётся на сегодняшний день одной из основных проблем при создании ультразвуковых аппаратов.

Для решения этой проблемы используются специальные ультразвуковые колебательные системы (УЗКС), представляющие собой устройства, объединяющие в единой системе пьезоэлектрический преобразователь, волновод-концентратор и рабочий инструмент [2].

Теоретические предпосылки для создания прибора

В диапазоне частот технологического применения упругих колебаний в качестве колебательных систем с распределёнными постоянными применяют стержневые системы.

Эти устройства характеризуются тем, что форма и размеры их поперечного сечения являются постоянными или изменяются по определённому закону, причем поперечные размеры меньше длины волны, а продольные соизмеримы или несколько больше этой величины [3].

В ультразвуковой аппаратуре в основном применяют продольные колебания, поэтому стержневые системы также работают в этом режиме.

В обычных условиях практического применения колебательных систем последние используются в режиме вынужденных колебаний.

В этом случае, если имеется колебательная система, характеризующаяся массой и упругостью, и к этой системе приложена сила, изменяющаяся по следующему закону:

$$F = F_m \sin \omega t, \quad (1)$$

где t – время, ω – частота, то мгновенное значение колебательной скорости будет рассчитываться по следующему соотношению:

$$\xi = \xi_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Максимум амплитудного значения ξ_m соответствует выполнению условия

$$\omega = \omega_0, \quad (3)$$

где ω_0 – собственная или резонансная частота системы.

При резонансе в механической системе, образованной узловым соединением массы и упругости, амплитуды сил, действующих на элементы системы максимальны, равны друг другу и больше амплитуды, приложенной к системе силы в Q раз [3]. Величина добротности системы равна Q .

Резонансное значение амплитудной скорости ξ_m равно ξ_{mm} . Отношение амплитудной

скорости к резонансной амплитудной скорости определяется соотношением:

$$\frac{\xi_m}{\xi_{mm}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q\omega_0^2}{\omega^2} \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right)^2}}. \quad (4)$$

Если обозначить $y = \xi_m/\xi_{mm}$, а $x = \omega/\omega_0$, то график зависимости $y(x)$ будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

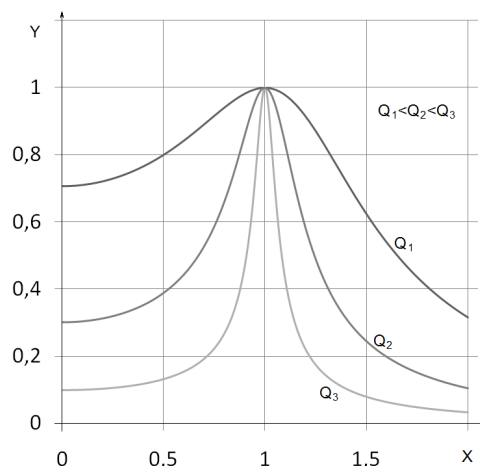


Рисунок 1 – Зависимость нормированной колебательной скорости от нормированной частоты

С увеличением добротности Q резонансные кривые становятся острее и симметричнее. Иными словами, чем больше Q , тем меньше ширина резонансной кривой. Если выбрать x_1 и x_2 , соответствующие границам относительной ширины резонансной кривой, то, выбрав уровень, на котором определяется эта ширина равным $\sqrt{0,5}$, получим:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}. \quad (5)$$

Добротность, непосредственно связанная с шириной резонансной кривой, характеризует качество системы, потери в ней, ее избирательность, т.е. способность выделять энергию колебаний желательной (резонансной) частоты [3].

При создании и эксплуатации ультразвуковых технологических аппаратов добротность УЗКС является важнейшим параметром, определяющим эффективность ультразвукового воздействия, и поэтому ее измерение является актуальной задачей.

В связи с этим была поставлена задача разработки прибора для контроля основных параметров УЗКС, таких как добротность, ре-

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

зональная частота и амплитуда колебаний на резонансной частоте. Контроль параметров ультразвуковых колебательных систем, например, на этапе настройки ультразвукового аппарата, позволил бы «отбраковать» некоторые УЗКС, например с низким значением добротности, повысив, в конечном итоге, эффективность работы ультразвукового аппарата.

Конструктивная схема прибора

Самый простой способ определения параметров УЗКС, таких как резонансная частота, амплитуда колебаний и добротность это измерения, проводимые при помощи точечного пьезоэлектрического датчика, представляющего собой широкополосный приемный пьезоэлектрический преобразователь с точечным контактом [4]. Исследуемая колебательная система подключается к низковольтному генератору ультразвуковой частоты и в процессе плавной перестройки частоты генератора контролируют напряжение на выходе пьезоэлектрического датчика, который измерительной иглой касается определенной точки излучающей поверхности УЗКС. Для упрощения и ускорения процесса измерений его автоматизации, был разработан прибор, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

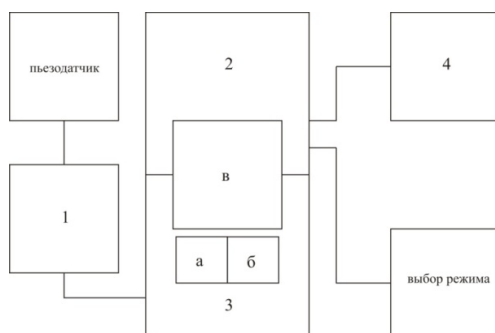


Рисунок 2 – Структурная схема прибора для контроля параметров УЗКС

Прибор для определения параметров УЗКС состоит из следующих основных блоков:

- блок усиления сигнала (1);
- блок управления (2);
- блок измерения параметров сигнала (3), включающий
 - а) блок выделения амплитуды сигнала;
 - б) блок выделения частоты сигнала;
 - в) микроконтроллер;
- блок индикации (4).

Блок усиления сигнала представляет собой последовательно включенные повторитель и инвертирующий усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. Необходи-

мость использования повторителя обусловлена тем, что выходное сопротивление на выходе пьезоэлектрического датчика, который используется в качестве первичного преобразователя, достигает несколько сотен мегаом. Сигнал, поступающий с пьезоэлектрического датчика, в процессе проведения измерений (для различных колебательных систем) может изменяться от милливольт до единиц вольт. Это обуславливает необходимость использования усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, устанавливаемым вручную.

Блок измерения параметров сигнала является основной частью устройства, и представляет собой микроконтроллер с возможностью ввода аналоговой и цифровой информации. Для ввода в микроконтроллер сигнала, пропорционального амплитуде колебаний используется амплитудный детектор. Для измерения частоты, из синусоидального сигнала при помощи триггера Шмидта формируется прямоугольный сигнал (однополярный с амплитудой 5 В) с частотой равной частоте исходного переменного напряжения, который подается на один из цифровых входов микроконтроллера.

Работа прибора происходит под управлением микроконтроллера, программное обеспечение которого обеспечивает весь вычислительный процесс и процесс визуализации измерительной информации на многоразрядном семисегментном индикаторе. Переключение режимов производится микроконтроллером по нажатию кнопки «переключение режимов».

Блок индикации состоит из пяти семисегментных индикаторов и индикатора шкального типа. В процессе настройки и измерения семисегментные индикаторы отображают измеренную частоту, а шкальный индикатор информирует об уровне амплитуды сигнала. После завершения измерений на семисегментные индикаторы последовательно выводятся значения резонансной частоты системы, добротности системы и значение амплитуды сигнала на выходе пьезоэлектрического датчика соответствующей резонансной частоте.

Особенности эксплуатации прибора

При работе созданного измерительного прибора можно выделить несколько режимов. Это режим настройки, измерения и режим отображения результатов измерений. При подаче напряжения питания устройство входит в режим настройки.

В режиме настройки оператором производится подстройка частоты генератора низ-

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

кочастотных колебаний на частоту близкую к резонансной частоте УЗКС. Приближение текущей частоты генератора к резонансной частоте УЗКС определяется по уровню входного сигнала с пьезоэлектрического датчика, который выводится на светодиодный индикатор шкального типа.

Оператор, при помощи регулировки коэффициента усиления, задаваемого переменным резистором, должен добиться того, чтобы при настройке генератора на резонанс колебательной системы горели все элементы индикатора шкального типа. При выполнении этого условия будет использоваться весь динамический диапазон АЦП, на вход которого поступает сигнал с операционного усилителя. Текущее значение коэффициента усиления так же вводится в микроконтроллер и используется в дальнейшем для расчета амплитуды колебаний выраженной в вольтах (напряжение на выходе пьезоэлектрического датчика).

Выход из режима настройки и переход в режим измерений осуществляется очередным нажатием кнопки «переключение режимов».

В режиме измерений микроконтроллер работает по следующему алгоритму. Производится измерение текущей частоты. Если измеренная частота не равна предыдущему значению измеренной частоты, то производится измерение амплитуды сигнала. Измеренные амплитуда и частота сигнала заносятся в массив данных. Измерения повторяются до заполнения массива. После заполнения массива данных, осуществляется его сканирование и поиск максимального значения амплитуды и соответствующей ей частоты (резонансной частоты). После нахождения в массиве частоты, соответствующей резонансной и частот соответствующих амплитудам в $\sqrt{2}$ меньшим амплитуды соответствующей резонансной частоте вычисляется добротность по формуле (5). Время нахождения прибора в режиме измерений составляет примерно 7 секунд. В ходе проведения измерений оператору необходимо осуществлять плавную перестройку частоты низковольтного генератора в окрестностях резонансной частоты исследуемой УЗКС контролируя переход через резонансную частоту по показаниям индикатора шкального типа. Пьезоэлектрический датчик в процессе измерений должен быть прижат с фиксированным усилием к точке рабочей поверхности УЗКС. После завершения процесса измерения устройство автоматически переходит в режим отображения результатов.

В режиме отображения результатов измерений на индикаторе прибора последова-

тельно отображаются измеренные значения резонансной частоты, добротности и значения амплитуды сигнала (в вольтах). Выбор очередного параметра для отображения его на индикаторе прибора осуществляется путем нажатия кнопки «переключение режимов».

После того, как были последовательно отображены все измеренные параметры очередное нажатие кнопки «переключение режимов» переводит прибор в режим измерения.

Практическое применение созданного прибора

С целью исследования функциональных возможностей созданного прибора был проведен ряд измерений параметров колебательных систем, при излучении ультразвуковых колебаний в воздушную среду (т.е. без нагрузки). При проведения исследований была использована колебательная система (пьезопреобразователь) из комплекта медицинского ультразвукового аппарата «Тонзилпор»[5] с различными сменными рабочими инструментами. Эскизы инструментов, которые использовались при проведении контроля представлены на рисунке 3. Сменные инструменты, используемые в ходе исследований представляют собой: инструмент №1 – двухполуволновой стержневой волновод с грибовидным окончанием; инструмент №2 – полуволновой инструмент с грибовидным окончанием; инструмент №3 – полуволновая инструмент с окончанием в виде «ершика»; инструмент №4 – полуволновой стержневой инструмент с осевым каналом; инструмент №5 – двухполуволновой инструмент с окончанием типа «пика».

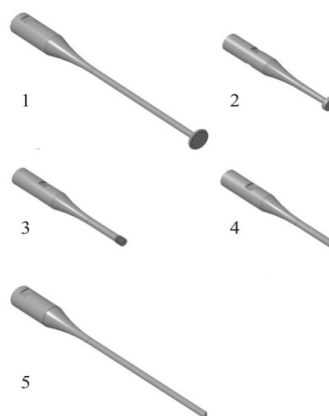


Рисунок 3 – Эскизы инструментов

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Исследования показали, что при присоединении различных рабочих инструментов амплитуда колебаний возрастает в несколько

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

раз (до 3 раз), разброс по резонансным частотам составляет около 570 Гц, добротность возрастает от 2 до 4.8 раз.

Таблица 1 - Параметры преобразователя с различными рабочими инструментами

Инструмент	Резонансная частота, Гц	Добротность	Амплитуда колебаний, В
Без инструмента	27803	51	0.285
Инструмент №1	26699	206	0.6
Инструмент №2	27272	122	0.89
Инструмент №3	27272	104	0.81
Инструмент №4	27235	119	0.87
Инструмент №5	26708	249	0.52

Для оценки влияния различных обрабатываемых сред на параметры УЗКС, была проведена серия экспериментов по измерению параметров излучателя многофункционального ультразвукового аппарата, предназначенного для обработки жидких сред [6]. Для обработки были выбраны жидкости с различными волновыми сопротивлениями. В таблице 2 представлены данные, полученные при контроле параметров УЗКС, предназначенной для обработки жидких сред. В качестве технологических сред были использованы дистиллированная вода, спирт и оливковое масло. Для сравнения были проведены результаты контроля в режиме холостого хода, т.е. при отсутствии жидкой среды.

Таблица 2 - Влияние волнового сопротивления среды на параметры УЗКС

Среда	Волновое сопротивление, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ [7]	Резонансная частота, Гц	Добротность	Амплитуда колебаний, В
Воздух	$0,45 \cdot 10^{-4}$	22612	370	3.41
Спирт	$93 \cdot 10^{-4}$	22310	230	2.49
Вода	$150 \cdot 10^{-4}$	22220	249	1.90
Масло	$125 \cdot 10^{-4}$	22241	239	2.01

Из полученных результатов следует, что увеличение акустической нагрузки снижает резонансную частоту УЗКС, причем величина ухода резонансной частоты зависит от волнового сопротивления обрабатываемой жидкости. Кроме того наблюдается снижение добротности при изменении акустической нагрузки, причем чем больше волновое сопротивление среды тем меньше добротность УЗКС, что обуславливается существенным

демпфированием излучателя обрабатываемой средой.

Был проведен ряд исследований, иллюстрирующих влияние качества акустического контакта сопрягаемых поверхностей УЗКС. Контроль проводился при различных углах затяжки инструмента и преобразователя. На рисунке 4 представлен график зависимости резонансной частоты от угла затяжки инструмента.

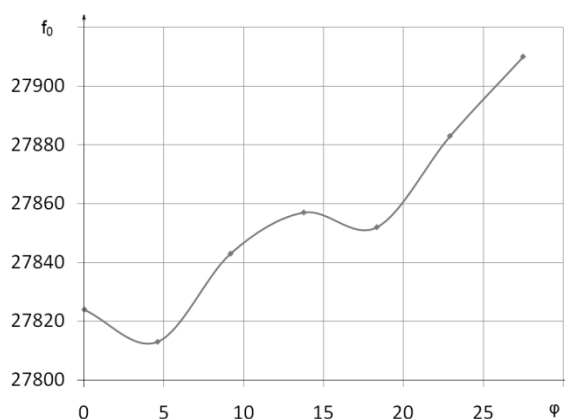


Рисунок 4 – Зависимость резонансной частоты от угла затяжки

На рисунке 5 представлен график зависимости амплитуды колебаний на резонансной частоте от угла затяжки инструмента.

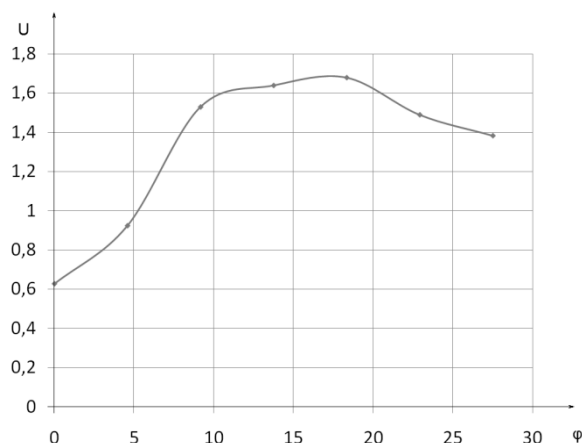


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебаний от угла затяжки

На рисунке 6 представлен график добротности системы от угла затяжки инструмента.

Исследования показали, что слабый акустический контакт ухудшает значения основных параметров УЗКС. Существует опти-

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

мальный момент затягивания резьбовых соединений элементов УЗКС, превышение которого может привести к чрезмерным напряжениям в соединениях, вытягиванию резьбовых соединений, что в конечном итоге приведет к выходу из строя элементов УЗКС.

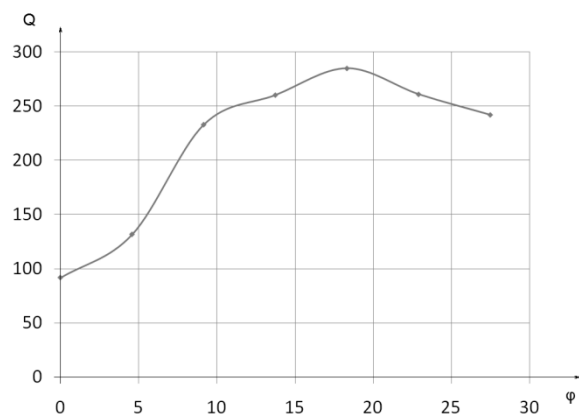


Рисунок 6 – Зависимость добротности от угла затяжки

Закключение

В результате проведенной работы был создан прибор для контроля основных параметров УЗКС. Разработанный прибор позволяет определить добротность УЗКС, значение резонансной частоты, а также значение амплитуды колебаний УЗКС в режиме резонанса, то есть основные параметры, необходимые для проектирования электронных генераторов и определяющие эффективность ультразвуковых технологических аппаратов при их эксплуатации.

С помощью разработанного прибора была проведена серия экспериментов, по установлению влияния различных рабочих инструментов, а также влияния различных обрабатываемых сред на параметры УЗКС.

Дальнейшие исследования и модернизация прибора (использование специального штатива, нормирование усилия прижима датчика, и т. п.) позволят автоматизировать процесс контроля основных параметров УЗКС и реализовать прибор для практического ис-

пользования при создании ультразвуковых технологических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с.
2. Конструирование ультразвуковых колебательных систем для ультразвуковых аппаратов / В.Н. Хмелев, А.Н. Лебедев, С.Н. Цыганок, И.И. Савин, В.Н. Штыр, М.В.Хмелев// Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003.– Новосибирск: НГТУ, 2003.
3. Теумин, И.И. Ультразвуковые колебательные системы / И.И. Теумин – М. Государственное научно-техническое издательство технической литературы, 1959 – 331с.
4. Ультразвуковые НЧ пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для НК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://acsys.ru/article/?article_id=5
5. Аппарат «Тонзиллор-ММ» для лечения Лор-заболеваний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://medprom.ru/medprom/mpp_0004788
6. Многофункциональный ультразвуковой аппарат серии «Алёна-Л» [U-sonic.ru - ООО «Центр ультразвуковых технологий» Лаборатория акустических процессов и аппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://u-sonic.ru/devices/alena-l>
7. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука / В.А. Шутилов – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980 – 280 с.

К.т.н., доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации **Р.В. Барсуков** тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ; инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов **Д.В. Генне**, тел. (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ; студент факультета информационных технологий автоматизации и управления **Е.В. Ильченко** тел. (3854)432570, e-mail: input90@mail.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ.