

УДК.62-791.2

Д. В. Злобин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
Д. С. Кулешова, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
О. В. Муравьева, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АУСКУЛЬТАЦИИ\*

*Описаны разработанные методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик акустических датчиков электронной аускультации в широком диапазоне частот в замкнутом объеме за счет применения электроакустической обратной связи. Приведены результаты сравнительных исследований различных типов медицинских аускультативных датчиков.*

**Ключевые слова:** амплитудно-частотная характеристика, медицинская аускультация, датчик звукового давления, электроакустическая обратная связь.

Интерес к созданию средств электронной аускультации обусловлен существенными недостатками традиционных стетофонендоскопов (нелинейность амплитудно-частотной характеристики, невозможность усиления и фильтрации сигнала, субъективность восприятия и интерпретации звуковых явлений), и множеством появляющихся преимуществ (возможности долговременного мониторинга, документирования и многократного воспроизведения звуковых образов, цифровой обработки и визуализации). Поэтому использование методов и средств электронной аускультации позволяет перейти из области качественных оценок звуковых явлений организма в область объективных количественных измерений и повысить информативность диагностики.

К настоящему времени в средствах электронной аускультации используются электроакустические датчики звукового давления, основанные на различных физических принципах – датчики на основе электретных микрофонов («Sony ECM-155», HP STETOS, Handheld STG); контактные микрофоны на основе пьезокерамики типа ЦТС и ПВДФ (СМ-01 фирмы Measurement Specialties); контактный микрофон стержневого типа (институт гидромеханики НАН Украины); датчики гидрофонного типа, пьезокерамические виброакселерометры [1, 2], разработанные авторами датчики на основе биморфного пьезоэлемента ЗП-2, использующие изгибные колебания пластин [3].

Для получения объективных данных аускультации с помощью разнообразных датчиков звукового давления к последним предъявляются высокие требования по чувствительности, равномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в диапазоне рабочих частот, акустической помехозащищенности и отношению сигнал/шум. Соответствие выходного

электрического сигнала датчика воспринимаемому им звуковому давлению в заданном диапазоне частот и уровней звукового давления с минимальными отклонениями от линейной зависимости – основное требование при разработке и эксплуатации акустических датчиков, поэтому периодическая поверка чувствительности и АЧХ датчиков электронной аускультации является обязательным условием.

В работе представлены результаты разработки методики и устройства для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков звукового давления в замкнутом объеме с применением обратной связи, с использованием которых исследованы основные параметры датчиков электронной аускультации различных типов.

### Используемые подходы и полученные результаты

Под АЧХ датчика понимается зависимость от частоты уровня звукового давления, принимаемого датчиком в определенной точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от излучателя, при постоянном значении напряжения синусоидального сигнала на излучателе. Обычно АЧХ измеряют в звукомерных заглушенных камерах, реализующих условия свободного поля, в котором влияние отражающих поверхностей пренебрежимо мало [4].

В ассортименте фирм-производителей из устройств для градуировки датчиков звукового давления представлены так называемые «эталонные источники звукового давления». Примерами могут служить модели эталонных источников фирмы Brüel&Kjær (рис. 1), имеющие частотный диапазон от 100 до 20000 Гц (модель 4204), от 80 до 6300 Гц (модель 4295) и от 100 до 5000 Гц (модель 4296), развивающие максимальное акустическое давление до 122 дБ. Вибростенд типа 4808 фирмы Brüel&Kjær

© Злобин Д. В., Кулешова Д. С., Муравьева О. В., 2012

Получено 15.10.12

\* Работа выполнена в рамках проекта «Исследование механизмов взаимодействия физических полей с биосистемами и разработка биомедицинских технологий повышения безопасности, эффективности и информативности медицинских приборов и систем» по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2014 гг. в части проведения научно-исследовательских работ (рег. номер НИР 7.1378.2011); в соответствии с разделом 2 мероприятий Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2016 гг. (проект ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

с использованием контрольных акселерометров с линейной АЧХ от 20 до 6000 Гц использовался при градуировке чувствительности контактных микрофонов на основе пьезокерамики [2].



Рис. 1. Эталонные источники звукового давления фирмы Brüel&Kjaer

Результаты анализа звуковых феноменов организма позволяют распределить аускультативные признаки на низко-, средне- и высокочастотные с диапазонами частот от 10 до 180 Гц, от 180 до 710 Гц и от 710 до 1400 Гц соответственно, при этом звуковые явления органов дыхания находятся в диапазоне от 300 до 1400 Гц, для сердечно-сосудистой системы – от 10 до 800 Гц.

Измерительные системы для градуировки датчиков электронной аускультации в заданном диапазоне

частот отсутствуют на рынке измерительного оборудования, что объясняется сложностью создания эталонных излучателей, особенно в области инфразвукового диапазона. Отсутствие на рынке эталонных излучателей с низкими граничными частотами обусловлено прежде всего физическими причинами. Известно, что для эффективного излучения низких частот источник должен иметь довольно большую площадь и габариты, сопоставимые с длиной волны. Длина акустической волны  $\lambda$  в воздухе на частоте  $f=200$  Гц составляет около 1,6 м, поэтому создание источника с АЧХ, линейной до единиц герц, требует конструкции, принципиально отличающейся от классической компоновки.

Учитывая параметры поверяемых датчиков, были сформулированы основные требования к разрабатываемой установке для измерения АЧХ: возможность плавного изменения параметров звукового давления; возможность измерения уровня звукового давления по эталонному датчику с погрешностью не более 3 дБ; уровень гармоник не более -40 дБ во всем диапазоне частотных аускультативных признаков организма.

Установка для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков звукового давления конструктивно состоит из двух блоков – акустического и электронного (рис. 2).

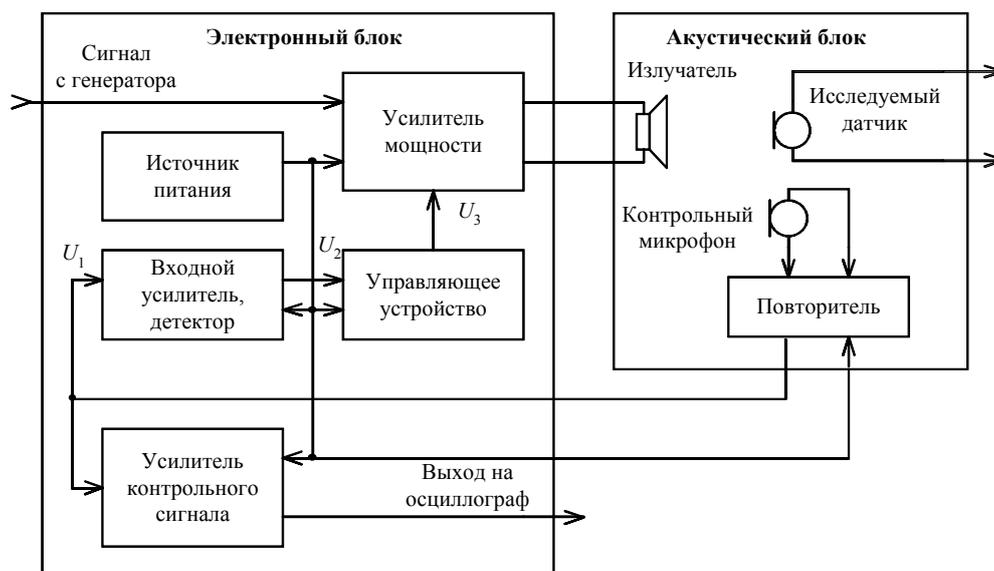


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения АЧХ датчиков звукового давления

Конструкция и расположение элементов (излучатель, исследуемый датчик, контрольный микрофон, повторитель) в акустическом блоке представлены на рис. 3. Исследуемый датчик устанавливается напротив электродинамического излучателя на противоположной стенке акустического блока установки. Крепление исследуемого датчика имеет виброизоляцию от корпуса для исключения паразитной вибрационной связи через корпус конструкции и элементы крепления датчика. Выходной сигнал с исследуемого датчика выводится на осциллограф вместе с сигналом контрольного микрофона. По изменению амплитуды сигнала с исследуемого датчика в зависимости от частоты снима-

ется его амплитудно-частотная характеристика. Контрольный микрофон используется для создания цепи акустической обратной связи. В качестве контрольного используется активный электретный микрофон, установленный рядом с исследуемым датчиком, что обеспечивает равенство звуковых давлений на обоих приемниках (контрольном и исследуемом). Амплитуда выходного сигнала контрольного микрофона достигает 1,5 В с постоянной составляющей 2,5 В. Повторитель необходим для увеличения выходного сопротивления сигнала с контрольного микрофона с целью уменьшения внешних наводок на кабель, соединяющий контрольный микрофон с электронным блоком.

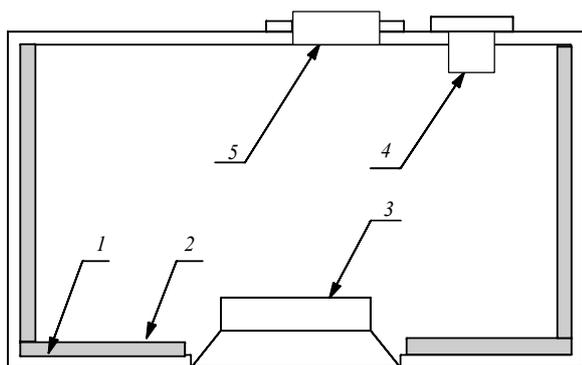


Рис. 3. Конструкция акустического блока: 1 – корпус; 2 – демпфер; 3 – электродинамический излучатель; 4 – контрольный микрофон с повторителем; 5 – исследуемый датчик

Известно, что для частот инфразвукового диапазона получение высоких значений звукового давления излучателем небольших габаритов возможно только при его работе на замкнутый воздушный объем. Поэтому основным элементом акустического блока является герметичная камера, на внутренний объем которой работает электродинамический излучатель, создающий необходимый уровень звукового давления. Излучатель представляет собой низкочастотный электродинамический громкоговоритель FD115-10В бытовой акустической системы Dialog W-203 (габариты 250×140×150 мм), имеющий следующие параметры: сопротивление катушки 4 Ом, максимальная мощность 20 Вт.

Неравномерность АЧХ акустического блока обусловлена наличием собственных звуковых резонансов замкнутого объема, соответствующих его характерным размерам, а также нелинейной АЧХ электродинамического излучателя. Для снижения собственных резонансов и уровня вибрации стенок акустического блока его внутренние стенки были покрыты виброизолирующим материалом, а внутренний объем частично заполнен звукопоглощающим материалом для устранения стоячих волн. Результаты измерения зависимости уровня вибрации стенок и уровня звукового давления внутри корпуса от частоты до и после принятых мер по звукопоглощению и виброизоляции, представлены на рис. 4, который наглядно иллюстрирует степень влияния принятых мер на акустические характеристики корпуса – заметно значительное снижение как уровня вибрации стенок акустической системы (рис. 4, а), так и резкое уменьшение внутренних акустических резонансов (стоячих волн) (рис. 4, б).

Несмотря на принятые меры, получение равномерной частотной характеристики в замкнутом объеме возможно только при использовании системы активной коррекции, имеющей в своем составе звено электроакустической (электромеханической) обратной связи (ЭМОС). Опыт практического применения подобных систем показывает, что использование в качестве регулирующего параметра в звене ЭМОС мгновенного значения звукового давления на частотах выше 100 Гц затруднительно вследствие влияния временной задержки в акустическом тракте. Для

решения этих проблем необходима отстройка от фазовой составляющей сигнала за счет использования в качестве параметра ЭМОС характеристики сигнала, не подверженной влиянию фазового сдвига. Исследования показали целесообразность использования в качестве регулирующего параметра ЭМОС прорежектированного и усредненного за несколько периодов уровня мгновенного звукового давления, излучаемого в замкнутый объем (рис. 5).

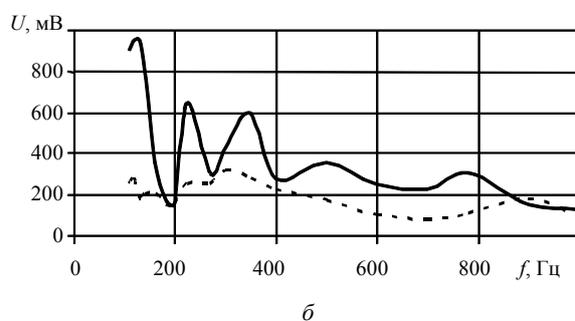
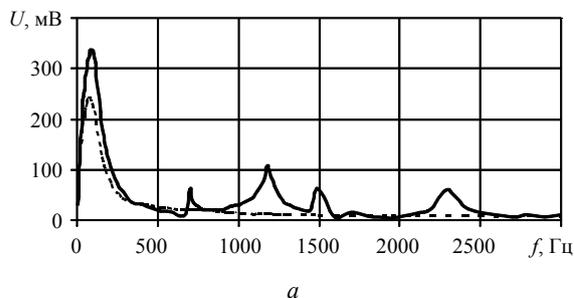


Рис. 4. Зависимости уровня звукового давления внутри корпуса (а) и вибрации стенок корпуса (б) от частоты до и после демпфирования

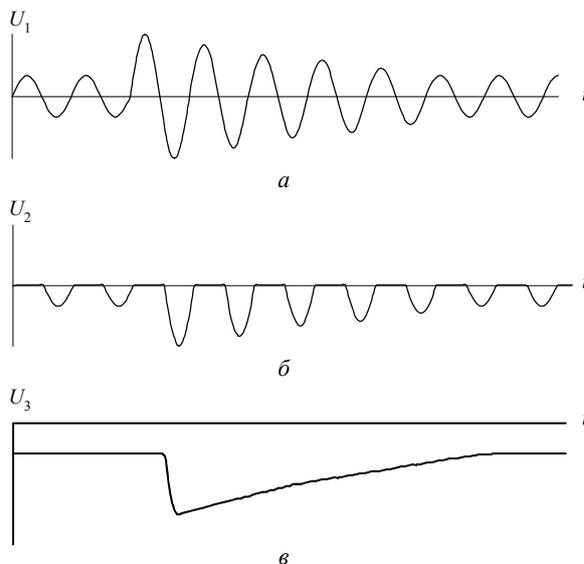


Рис. 5. Временные диаграммы работы устройства электроакустической обратной связи: а – исходный сигнал; б – прорежектированный сигнал; в – усредненный за несколько периодов

Цепи обработки и усиления электрического сигнала, построенные соответствии с предлагаемыми техническими решениями, конструктивно объедине-

ны в электронном блоке, включающем усилитель контрольного сигнала, входной усилитель с детектором, управляющее устройство, усилитель мощности, источник питания.

Усилитель контрольного сигнала предназначен для усиления по напряжению (с коэффициентом усиления, равным 3) входного сигнала, поступающего с контрольного микрофона, и позволяет уменьшить влияние внешних наводок на выходной контрольный сигнал, поступающий с повторителя контрольного микрофона и регистрируемый на осциллографе.

Входной усилитель служит для усиления входного сигнала с контрольного микрофона до уровня, необходимого для управляющего устройства, что обеспечивается при превышении выходным сигналом падения напряжения на  $p-n$ -переходе диода детектора (0,6..0,8 В). Так как входной усилитель входит в цепь внешней акустической обратной связи, он имеет регулировку коэффициента усиления в пределах 10...100, в зависимости от требуемого уровня звукового давления. Как и усилитель контрольного сигнала, входной усилитель имеет на входе защиту от постоянной составляющей сигнала.

Усилитель мощности обеспечивает усиление входного сигнала с внешнего генератора по напряжению (до 5 раз) и току (до 2 А) для эффективного возбуждения излучателя, его коэффициент усиления задается управляющим устройством в зависимости от уровня акустического давления, создаваемого излучателем. Управляющее устройство усилителя мощности предназначено для поддержания постоянного акустического давления путем изменения коэффициента усиления усилителя мощности. В его состав входят интегратор и схема на базе полевого транзистора, реализующая электронное управление усилением.

Источник питания: сетевой трансформаторный с входным напряжением ~220 В 50 Гц и потребляемым током 0,1 А. Выходные напряжения:  $\pm 8$  В для

питания усилителя мощности и  $\pm 5$  В для питания остальных частей установки, максимальная выходная мощность 13 Вт.

Принцип действия установки заключается в следующем. Входной сигнал с генератора усиливается и поступает на электродинамический излучатель, уровень которого фиксируется контрольным микрофоном. Сигнал с микрофона ( $U_1$ , рис. 3), пройдя через входной усилитель, детектор и управляющее устройство, включающее в себя интегратор с постоянной времени порядка 2 секунд, преобразуется в медленно меняющееся напряжение, амплитуда которого пропорциональна величине звукового давления ( $U_3$ , рис. 3). Это напряжение воздействует на затвор полевого транзистора, включенного в цепь обратной связи усилителя мощности в качестве управляемого напряжением сопротивления. Все эти элементы образуют ЭМОС по звуковому давлению, уровень которого поддерживается постоянным вне зависимости от частоты, уровня входного сигнала с генератора, условий распространения звуковых волн в корпусе акустического блока. Например, если по каким-либо причинам уровень сигнала на контрольном микрофоне увеличивается, это вызывает соответствующее увеличение модуля управляющего напряжения на затворе полевого транзистора и эффективное значение его сопротивления возрастет. Это приводит к соответствующему уменьшению коэффициента усиления выходного усилителя, и уровень звукового давления снижается.

Для оценки эффективности работы системы ЭМОС и измерения параметров разработанной установки ее АЧХ по звуковому давлению была измерена с помощью шумомера Assistant total (SIU V3RT) приборостроительной компании «НТМ-Защита», обеспечивающего измерение уровня акустического давления в диапазоне 2...40000 Гц с погрешностью, соответствующей 1-му классу точности, по схеме, приведенной на рис. 6.

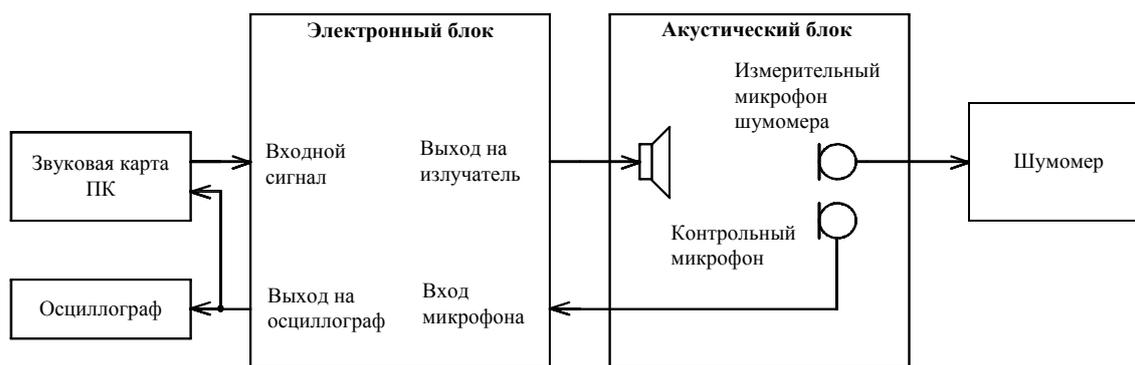


Рис. 6. Блок-схема измерения основных параметров разработанной установки

Результаты измерения АЧХ установки, представленные на рис. 7, а, показывают, что она является линейной с отклонением не более  $\pm 3$  дБ в диапазоне частот от 4 до 900 Гц, что является недостижимым для электродинамического излучателя без использования цепи обратной связи. Представленная на рис. 7, б зависимость суммарного коэффициента

гармоник выходного сигнала установки от частоты, измеренная с помощью профессиональной звуковой карты, имеющей собственный уровень искажений не выше  $-100$  дБ (0,001 %), показывает, что в большей части рабочего диапазона коэффициент гармоник не превышает величины 1 %, возрастая до 4 % на частоте 1 кГц.

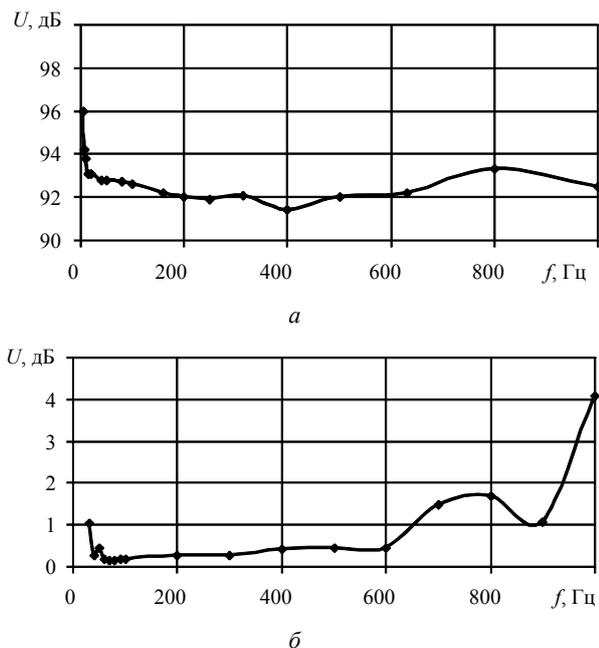


Рис. 7. АЧХ разработанной установки (а), зависимость коэффициента гармонических искажений от частоты (б)

Основные технические параметры разработанной установки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические параметры разработанной установки

Технический параметр	Значение
Рабочий частотный диапазон, Гц	5...1500
Коэффициент гармоник в диапазоне частот 30...600 Гц, дБ	не более -50
Уровень звукового давления, дБ	55...95
Погрешность измерения уровня звукового давления в диапазоне частот 5...900 Гц (во всем диапазоне частот), дБ	не более 3
Мощность, потребляемая от сети, Вт	не более 20

Разработанное устройство использовано для сравнительных измерений ряда технических характеристик датчиков электронной аускультации: разработанного датчика изгибного типа на основе биморфного пьезоэлемента ЗП-2 [1] и датчиков электронных стетоскопов некоторых зарубежных фирм-производителей (микрофонного типа стетоскопа Jabes, на основе пьезопленки ПВДФ стетоскопа СМ-01 и механического фонендоскопа).

Результаты измерения АЧХ исследуемых датчиков приведены на рис. 8, согласно которому неравномерность АЧХ для механического фонендоскопа в диапазоне частот 10...1000 Гц составила 18,4 дБ, электронного фонендоскопа Jabes – 16,7 дБ, датчика на основе ПВДФ – 17,9 дБ, разработанного датчика на основе ЗП-2 – 4,4 дБ. Максимальная чувствительность соответствует электронному фонендоскопу Jabes (580 мВ), самая низкая чувствительность наблюдается у датчика на основе ПВДФ (46 мВ). Низкая чувствительность последнего объясняется невозможностью полной реализации пьезосвойств пленки на основе ПВДФ в связи с неполной переда-

чей давлений на пьезоэлемент, деформирующийся по толщине, в отличие от датчика на основе ЗП-2, давление на который передается полностью в виде колебаний изгиба.

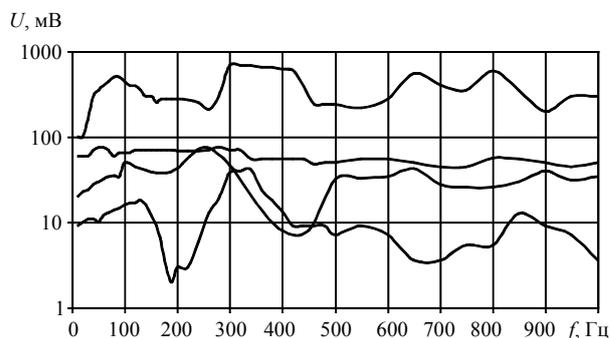


Рис. 8. АЧХ аускультационных датчиков различных типов: датчик электронного фонендоскопа Jabes (кривая 1); датчик на основе биморфной пластины ЗП-2 (кривая 2); механический фонендоскоп (кривая 3); датчик на основе ПВДФ электронного фонендоскопа СМ-1 (кривая 4)

Для оценки влияния на чувствительность качества акустического контакта на крепление исследуемого датчика устанавливалась силиконовая мембрана, приближенная к биосреде по акустическим свойствам. Результаты исследования влияния на чувствительность датчиков звукового давления качества акустического контакта, представленные в табл. 2, показали, что датчик на основе ПВДФ реализует максимальную чувствительность при контакте с биосредой через гель; датчик на основе биморфной пластины ЗП-2 имеет практически одинаковую чувствительность вне зависимости от типа контакта. Наличие мембраны в качестве контактного слоя ухудшает чувствительность фонендоскопа с датчиком микрофонного типа и механического фонендоскопа в связи с несогласованностью акустических импедансов сред.

Таблица 2. Сравнительная чувствительность датчиков на частоте  $f = 200$  Гц

Тип датчика	Напряжение при приеме из воздуха, мВ	Напряжение при приеме через мембрану, мВ	Напряжение при контакте с мембраной через гель, мВ
Датчик на основе ПВДФ	3	27	54
Датчик на основе ЗП-2 (без усиления)	8	7,5	12
Электронный фонендоскоп Jabes	280	80	–
Механический фонендоскоп	33	6	–

Оценено влияние внешних акустических шумов с корпуса датчика и из окружающей среды на их акустическую помехозащищенность (табл. 3). Наилучшую акустическую помехозащищенность (минимальное значение сигнал/шум) имеет датчик на ос-

нове асимметричной биморфной пластины (26 дБ). Высокий уровень шумов электронного фонендоскопа Jabes, несмотря на его высокую чувствительность, существенно ухудшает его техническую характеристику – отношение сигнал / шум (36 дБ) в сравнении с 86 дБ для датчика на основе биморфной пластины ЗП-2. Сложность реализации надежного электрического экранирования пленок на основе ПВДФ приводит к низкой помехозащищенности таких преобразователей от внешних наводок.

Таблица 3. Сравнительная помехозащищенность датчиков

Тип	$U_{ш}$ , мВ	Отношение сигнал/шум, дБ	Акустическая помехозащищенность, дБ
Электронный фонендоскоп Jabes	4	36	6
Датчик на основе ЗП-2	0,2	86	26
Датчик на основе ПВДФ	1	48	18

### Выводы

Разработанные методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик аускультативных датчиков звукового давления в замкнутом объеме с использованием обратной электро-механической связи не имеют на сегодняшний день

аналогов на рынке. Установка позволяет с достаточно высокой точностью оценивать АЧХ аускультативных датчиков различных типов (контактного, воздушного), а также измерять их абсолютную чувствительность по звуковому давлению в диапазоне частот звуковых явлений органов дыхания и сердечно-сосудистой системы.

Проведенный с использованием разработанной установки сравнительный анализ технических характеристик разработанного датчика электронной аускультации на основе ЗП-2 и его зарубежных аналогов показал, что по равномерности АЧХ, отношению сигнал / шум, акустической помехозащищенности, акустическому согласованию с биосредой разработанный датчик звукового давления на основе изгибных колебаний пластины ЗП-2 превосходит зарубежные аналоги.

### Библиографические ссылки

1. Гончарова И. Ю. Датчики для регистрации шумов дыхания // Акустический вестник. – 2001. – № 3. – С. 56–62.
2. Гринченко В. Т., Макаренко В. Т. Сравнение эффективности электроакустических преобразователей устройств электронной аускультации // Акустический вестник. – 2007. – Т. 10. – № 1. – С. 17–29.
3. Аппаратное и программное обеспечение системы электронной аускультации органов дыхания и сердечно-сосудистой системы / О. В. Коробейникова, Д. С. Кулешова // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 1(45). – С. 91–96.
4. Адоменас П. Измерители амплитудно-частотных характеристик и их применение. – М. : Связь, 1968. – 164 с.

*D. V. Zlobin*, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*D. S. Kuleshova*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*O. V. Muravieva*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Technique and Device of Gain-Frequency Characteristics Measuring for Electronic Auscultation Sensors

*The paper presents the developed technique and device of measuring the gain-frequency characteristics of electronic auscultation sensors in closed volume for a wide frequency range by application of electro-acoustic feedback coupling. The results of comparative investigations of different types of medical auscultation sensors are given.*

**Key words:** gain-frequency characteristics, medical auscultation, sound pressure sensor, electro-acoustic feedback coupling.