

Система электронной аускультации: метод измерения амплитудно-частотных характеристик стетоскопов

А. О. Макалов¹, В. А. Смирнов¹, А. В. Прохорцов¹ ✉

¹ Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке метода измерения АЧХ классических и электронных стетоскопов. Произведено апробирование предложенного метода. Выполнены измерения АЧХ классического и электронного стетоскопов. Реализовано изменение конструкции головки электронного стетоскопа с целью улучшения ее функционирования. Для обоснования внесенных изменений конструкции осуществлено сравнение АЧХ исходной и улучшенной конструкции, повышение разнообразия конструкций систем электронной аускультации с измеренными характеристиками и апробированием. Серия статей включает в себя разработку модели системы электронной аускультации, разработку конструкции электронного стетоскопа, изготовление экспериментального образца, разработку методики измерения амплитудно-частотных характеристик электронных и классических стетоскопов, апробирование предложенных моделей и методов, анализ аускультативных данных.

Методы. Исследования базировались на методиках измерения частотных характеристик электроакустических преобразователей, предложенных в межгосударственных стандартах. На основе методик в межгосударственных стандартах разработан упрощенный метод измерения амплитудно-частотных характеристик электронных стетоскопов. В исследовании использовалось следующее оборудование: излучатель «Искусственный рот» Туре 4227 фирмы Brüel&Kjær; измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Туре 4146 с эталонной камерой 2CC фирмы Brüel&Kjær; анализатор Туре 2118 фирмы Brüel&Kjær.

Результаты. Получены амплитудно-частотные характеристики классического и электронного стетоскопов. Улучшена конструкция головки электронного стетоскопа, произведено сравнение амплитудно-частотных характеристик исходной и улучшенной конструкции.

Заключение. Предложен метод измерения параметров частотных характеристик уровня звукового давления классических и электронных стетоскопов. Метод максимально приближен к стандартизированным методам контроля акустических параметров, при этом обладает достаточной простотой и дешевизной относительно метода измерения по давлению, демонстрируя качественную схожесть результатов измерений.

Ключевые слова: система электронной аускультации; электронный стетоскоп; измерение амплитудно-частотной характеристики; измерение чувствительности; уровень звукового давления.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В. Система электронной аускультации: метод измерения амплитудно-частотных характеристик стетоскопов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-125-136>.

Поступила в редакцию 05.04.2023

Подписана в печать 30.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Electronic Auscultation System: a Method for Measuring the Amplitude-Frequency Characteristics of Stethoscopes

Alexey O. Makalov¹, Vladimir A. Smirnov¹, Alexey V. Prokhortsov¹ ✉

¹ Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Abstract

The purpose of research is increasing the diversity of designs of electronic auscultation systems with measured characteristics and testing. A series of articles includes the development of a model of an electronic auscultation system, the development of an electronic stethoscope design, the manufacture of an experimental sample, the development of a method for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic and classical stethoscopes, testing the proposed models and methods, and analyzing auscultatory data. The article proposes a method for measuring the frequency response of classical and electronic stethoscopes. The proposed method was tested. The frequency response of classical and electronic stethoscopes was measured. The design of the head of the electronic stethoscope has been improved, the frequency response of the original and improved designs has been compared.

Methods. The studies were based on methods for measuring the frequency characteristics of electroacoustic transducers proposed in interstate standards. On the basis of methods in interstate standards, a simplified method for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic stethoscopes has been developed. The following equipment was used in the study: Type 4227 "Artificial Mouth" emitter from Bruel & Kjaer; measuring condenser microphone "Artificial ear" Type 4146 with a 2CC reference chamber from Bruel & Kjaer; Type 2118 analyzer from Bruel & Kjaer.

Results. The amplitude-frequency characteristics of classical and electronic stethoscopes are obtained. The design of the electronic stethoscope head has been improved, the amplitude-frequency characteristics of the original and improved designs have been compared.

Conclusion. A method for measuring the parameters of the frequency characteristics of the sound pressure level of classical and electronic stethoscopes is proposed. The method is as close as possible to the standardized methods for monitoring acoustic parameters, while being sufficiently simple and cheap compared to the pressure measurement method, demonstrating the qualitative similarity of the measurement results.

Keywords: electronic auscultation system; electronic stethoscope; frequency response measurement; sensitivity measurement; sound pressure level.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V. Electronic Auscultation System: a Method for Measuring the Amplitude-Frequency Characteristics of Stethoscopes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest*

Введение

Производство систем электронной аускультации требует контроля амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) акустической и электронных частей. На сегодняшний день предложен только один метод измерения АЧХ акустической части стетоскопов [1; 2; 3]. Данный метод предполагает измерение частотной характеристики чувствительности датчиков электронной аускультации по давлению. Для этого используется камера замкнутого объема. Недостатком данного метода является малый верхний частотный предел измерений (1000 Гц) в результате отражения звуковых волн от стенок камеры и возникновения интерференционной картины. При этом общий диапазон акустической работы дыхания (АРД), на котором регистрируются различные шумы, составляет 200 Гц – 12,6 кГц [4], например, в [5] исследуются высокочастотные гармоники шумов форсированного выдоха. Для корректировки и исследований частотных характеристик головок стетоскопов требуется производить измерения на как можно большем диапазоне частот. В данной статье предложены методика измерения АЧХ электроакустической части и результаты экспериментальных исследований ряда стетоскопов по предлагаемой методике.

Материалы и методы

Головку электронного стетоскопа следует рассматривать как устройство

костной проводимости, так как имеет непосредственный контакт с телом пациента.

Измерения электроакустического преобразователя (ЭАП) костного проведения требуют использования специфического, достаточно редкого и дорогостоящего оборудования, связанного с обеспечением виброизмерений. Исходя из более широкого распространения и меньшей стоимости оборудования для измерений ЭАП воздушного проведения на данном этапе развития приборов электронной аускультации выглядит более рациональным использование последних. При этом необходимо учитывать, что такая методика должна быть по возможности максимально приближена по своей сути к виброизмерениям.

На сегодняшний день в области электроакустики наиболее широко применяются следующие стандарты, содержащие в себе методики измерений электроакустических преобразователей и устройств:

- ГОСТ Р 51024-2012. Аппараты слуховые электронные реабилитационные. Технические требования и методы испытаний.
- ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4-2004). Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров.
- ГОСТ 6343-74. Телефоны. Методы измерения электроакустических преобразователей.
- ГОСТ 6496-81. Ларингофоны. Методы измерения электроакустических параметров.

В ГОСТ Р 51024 описываются методы измерений как преобразователей костного проведения, так и воздушного, но уделяется основное внимание последним. В ГОСТ Р 53576 и ГОСТ 6343-74 рассматриваются исключительно устройства воздушного проведения, в ГОСТ 6496-81 – костного. Для измерения частотной характеристики чувствительности преобразователей воздушного проведения в ГОСТ Р 53576-2009 предлагаются следующие варианты:

1. Измерение чувствительности по свободному полю.
2. Измерение чувствительности по диффузному полю.
3. Измерение чувствительности по давлению.

Метод измерения чувствительности по давлению наиболее приближен к условиям работы стетоскопа, но требует разработки камеры малого объема для рабочего диапазона частот (200 Гц – 12,6 кГц) и в дальнейшем её поверки, что является трудоемкой конструкторской задачей. Для измерения чувствительности по свободному полю требуется заглушенная камера. Методика измерений в свободном поле звукомерной заглушенной камеры или установки «бесконечная труба» по п. 7.2 ГОСТ Р 53576-2009 должна быть отброшена как неподходящая из-за отсутствия стоячих волн и реакции ЭАП на отражения.

В основе метода принято решение использовать методику измерения парфонической чувствительности (п. 7.3.1 ГОСТ Р 53576-2009), несколько преобразовав под задачи измерения АЧХ стетоскопов.

В случае проведения врачом аускультации с использованием классического стетоскопа оливы оголовья вставляются непосредственно в ушные каналы. Звук проходит через акустическую головку, звукопроводящую трубку, акустический канал оголовья и попадает непосредственно в объем среднего уха. Соответственно требуется измерение характеристики звукового давления на барабанной перепонке. Для имитации человеческого уха при измерениях по ГОСТ Р 51024-2012 должна использоваться эталонная камера с эффективным объемом 2 см^3 , соединенная с измерительным микрофоном (имитатор внутреннего уха) для измерения параметров слуховых аппаратов и телефонов с ушными вкладышами ГОСТ Р МЭК 60318-5-2010.

В этом случае акустический канал оголовья герметично соединяется с внутренним объемом эталонной камеры (2 см^3) посредством акустического соединителя, а мембрана акустической головки озвучивается сигналом прибора «рот искусственный» с минимально возможным расстоянием (например, при соединении мембраны с защитной решеткой «рта искусственного»). При этом частотная характеристика звукового давления, создаваемого прибором, должна быть учтена при обработке результатов измерений, если при их проведении не используется система стабилизации звукового давления (п. 5.9.3 ГОСТ Р 53576). На рисунке 1 изображена структурная схема предложенной методики измерения.

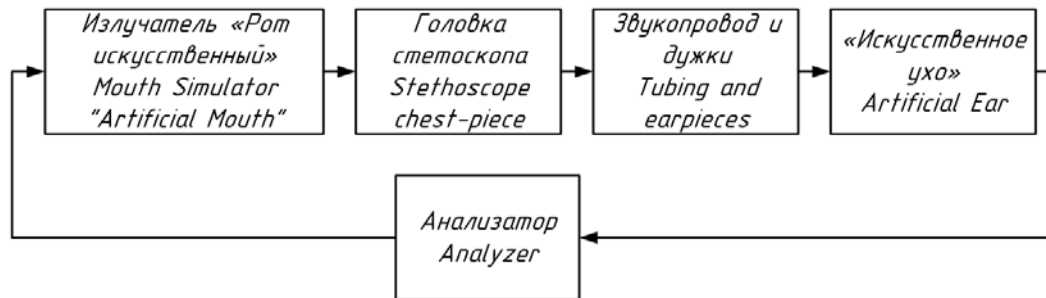


Рис. 1. Структурная схема измерения АЧХ классического стетоскопа

Fig. 1. Structural diagram for measuring the frequency response of a classic stethoscope

Следует отметить, что измерения по предложенной методике отражают действительную картину звукового давления в области барабанной перепонки человеческого уха в диапазоне 100 Гц – 10 кГц ввиду акустических ограничений измерительной аппаратуры.

Для измерения частотной характеристики уровня звукового давления (ЧХ УЗД) классического стетоскопа Little Doctor LD Special по разработанной методике использовалось следующее измерительное оборудование:

1. Излучатель «Искусственный рот» Type 4227 фирмы Bruel&Kjaer.

2. Измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Type 4146 с эталонной камерой 2СС фирмы Bruel&Kjaer.

3. Анализатор Type 2118.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты измерения ЧХ УЗД классического стетоскопа по предложенной методике (рис. 2).

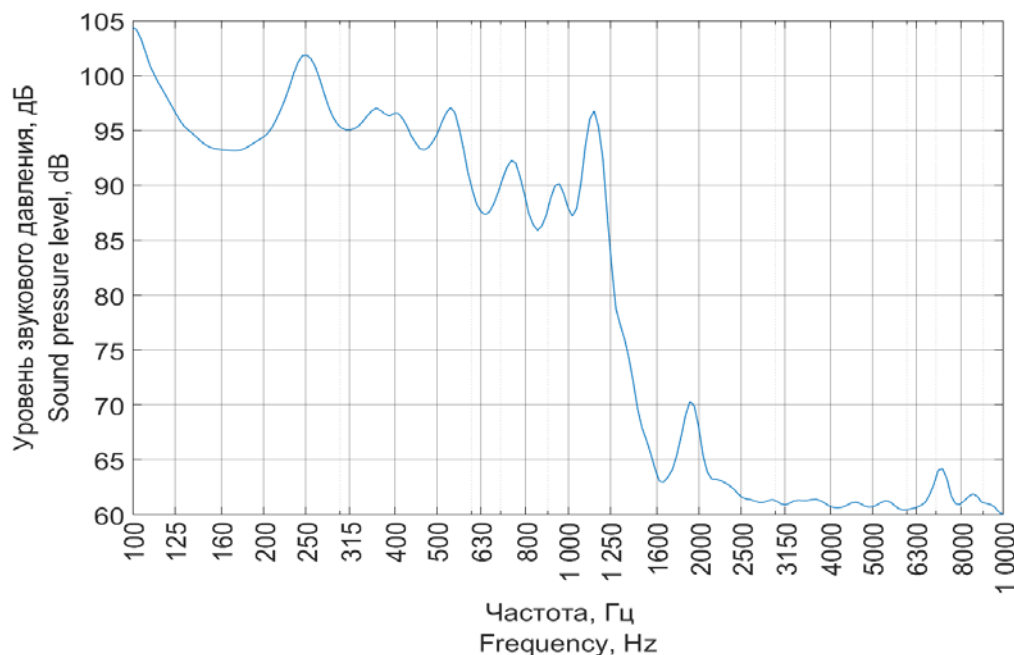


Рис. 2. Частотная характеристика уровня звукового давления стетоскопа Little Doctor LD Special

Fig. 2. Frequency response of the sound pressure level of the Little Doctor LD Special stethoscope

АЧХ (рис. 2) демонстрирует высокую неравномерность в диапазоне от 100 до 1250 Гц, что является результатом интерференции волн в звукопроводе. Данная картина связана с особенностями передаточной функцией гибкого звукопровода, параметры которой зависят от его длины, толщины стенок, внутреннего диаметра и свойств материала. Гибкость стенок звуковода приводит к тому, что собственная частота системы «головка – звуковод – ухо» мала и может находиться в начале рабочего диапазона частот (50–100 Гц), в результате чего наблюдается интерференционная картина на приемной части системы.

Также следует отметить схожесть результатов разработанного метода измерений с методом, используемым в [6; 7; 8; 9]. В статье описывается метод измерения частотной характеристики чувствительности по давлению при помощи использования камеры малого объема (ГОСТ Р 53576-2009) и электростатического излучателя. Согласно описанной методике [6], в структурной схеме на рисунке 1 излучатель «Искусственный рот» заменяется на электростатический излучатель, герметично соединенный с камерой малого объема, остальные функциональные элементы остаются неизменными. Для правильного измерения по данному методу головку стетоскопа следует плотно соединить с камерой малого объема. Таким образом, результаты измерений АЧХ стетоскопа по предложенному в данной статье методу схожи с методом измерения по давлению приведенном в публикации [6].

Для измерения частотной характеристики уровня звукового давления (ЧХ

УЗД) системы электронной аускультации [7; 10; 11] по разработанной методике использовалось аналогичное измерительное оборудование, кроме искусственного уха. В качестве искусственного уха использовался измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Type 4153 фирмы Bruel&Kjaer с акустической камерой связи, соответствующей ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017. Для измерений использовалось два варианта головок электронного стетоскопа – без мембраны и с мембраной от классического стетоскопа Little Doctor LD Special. Результаты измерений представлены ниже (рис. 3).

Частотная характеристика головки электронного стетоскопа с мембраной имеет два выраженных резонанса на частотах около 950 Гц и около 2000 Гц, что объясняется резонансными характеристиками замкнутой мембраной полости головки стетоскопа [11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20]. Уменьшить неравномерность АЧХ и уровень резонанса можно, уменьшив жесткость мембраны и добавив небольшое отверстие между внешней средой и полостью головки стетоскопа на её задней стенке. После второго резонанса чувствительность заметно падает.

Электронный стетоскоп без мембраны в области до 2000 Гц имеет меньшую неравномерность АЧХ, по сравнению стетоскопа с мембраной, хотя и немного меньшую (примерно на 5 дБ) чувствительность. В области частот выше 4000 Гц электронный стетоскоп без мембраны имеет заметный подъем АЧХ, что также объясняется резонансом полости головки.

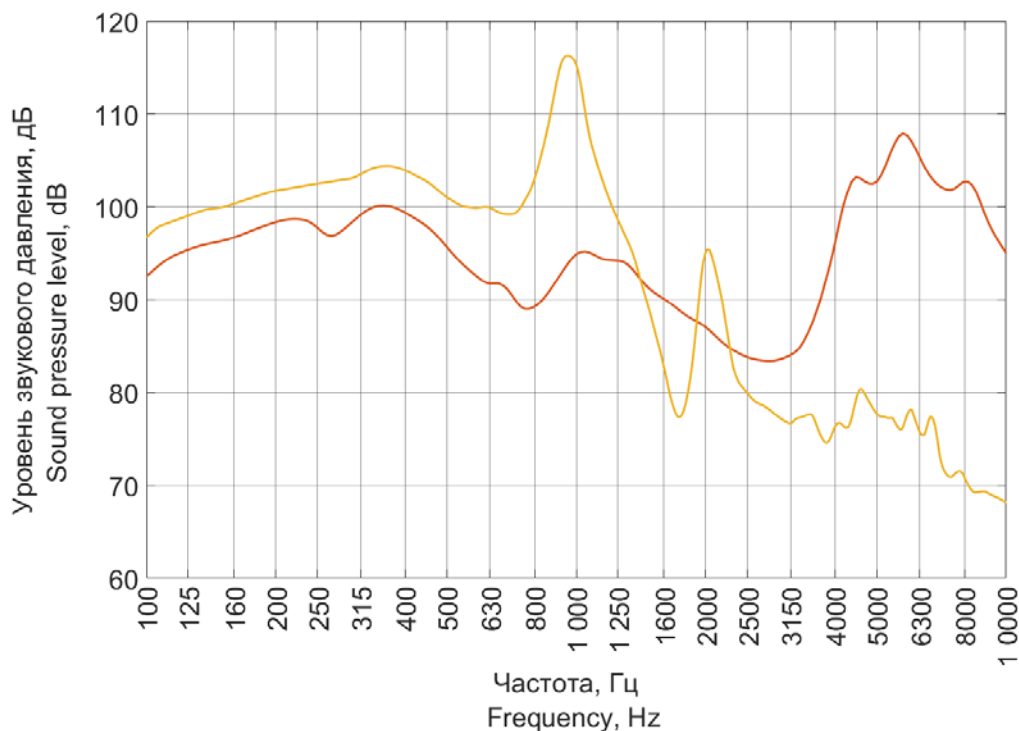


Рис. 3. Частотная характеристика уровня звукового давления системы электронной аускультации: желтый – головка электронного стетоскопа с мембраной LD Special; красный – головка электронного стетоскопа без мембраны

Fig. 3. Frequency response of the sound pressure level of the electronic auscultation system: yellow – electronic stethoscope head with LD Special membrane; red – electronic stethoscope head without membrane

Сравнение обычного стетоскопа с электронным показывает, что в области частот выше 2 кГц чувствительность электронного стетоскопа выше, чем классического. Данная частотная характеристика также обладает существенной неравномерностью.

Следует отметить, что измерение производилось на накладных наушниках, которые не обладают высокой равномерностью частотной характеристики в области от 100 Гц до 10 кГц. При проектировании систем электронной аускультации рекомендуется в качестве источника звуковоспроизведения использовать мониторные наушники, имеющие широкий частотный диапазон и равномерную частотную характеристику с минимальным разбросом от изделия к изделию.

Таким образом, можно контролировать повторяемость характеристик выпускаемых изделий.

Учитывая результаты приведенных выше измерений, в конструкцию головки электронного стетоскопа были внесены изменения. Также была разработана и изготовлена мембрана с контролируемой частотой резонанса. Также в новых экспериментах использованы полноразмерные мониторные наушники, обеспечивающие высокую равномерность частотной характеристики от 100 Гц до 16 кГц. На рисунке 4 изображена ЧХ УЗД измененной конструкции головки электронного стетоскопа, в которой использовалась мембрана из ПЭТ-плёнки толщиной 20 мкм.

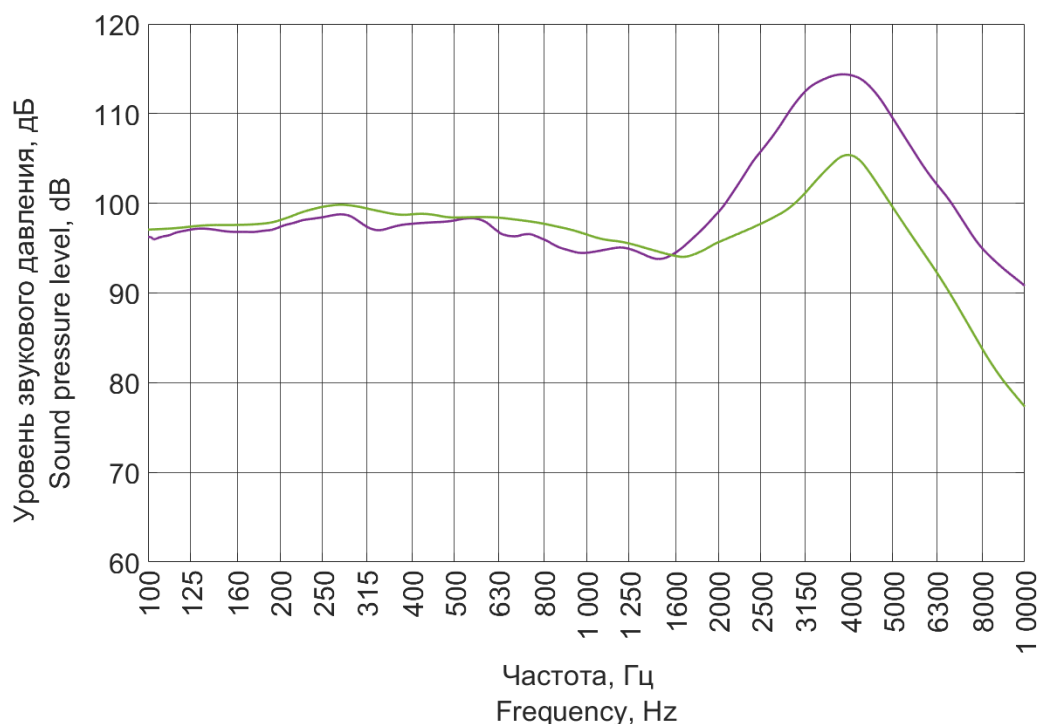


Рис. 4. Частотная характеристика уровня звукового давления измененной конструкции: фиолетовая линия – электронная головка с стетоскопа с натяжением мембраны, соответствующим резонансной частоте 800 Гц; зеленая линия – электронная головка с стетоскопа с натяжением мембраны, соответствующим резонансной частоте 250 Гц

Fig. 4. Frequency response of the modified sound pressure level: violet line – electronic head from a stethoscope with membrane tension corresponding to a resonant frequency of 800 Hz; green line – electronic head from a stethoscope with membrane tension corresponding to a resonant frequency of 250 Hz

На рисунке 4 фиолетовый график ЧХ имеет более высокий уровень резонанса на частоте 4 кГц. При этом для двух ЧХ отсутствуют резкие резонансные пики в диапазоне частот от 100 Гц до 1600 Гц. Частотная характеристика улучшенной конструкции обладает малой неравномерностью по сравнению с классической головкой стетоскопа.

Выводы

Предложен метод измерения параметров ЧХ УЗД классических и электронных стетоскопов. Метод максимально приближен к стандартизирован-

ным методам контроля акустических параметров, при этом обладает достаточной простотой и дешевизной относительно метода измерения по давлению, демонстрируя качественную схожесть результатов измерений.

В ходе экспериментальных исследований продемонстрировано влияние конструкции головки стетоскопа и характеристик мембраны на акустические параметры электронного стетоскопа. Предложены конструкция головки стетоскопа и характеристики мембраны, обеспечивающие минимальную неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне

частот. Электронный стетоскоп с мембраной меньшей толщины и мониторными полноразмерными наушниками демонстрирует большую равномерность АЧХ по сравнению с исходной конструк-

цией. Высокая равномерность АЧХ позволяет снизить влияние психоакустического эффекта маскирования звуков, что положительно сказывается на качестве проведения процедуры аускультации.

Список литературы

1. Злобин Д. В. Методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков электронной аускультации // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2012. № 4. С. 110–115.
2. Changes in the breath sound spectrum with bronchodilation in children with asthma / Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki // Respiratory Investigation. 2018. Vol. 56, is. 5. P. 392–398.
3. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 1994.
4. Рыбочкин А. Ф., Калугина Н. М. Методы и средства анализа акустических шумов легких человека // Научный вестник. 2016. № 2. С. 50–62.
5. Сафронова М. А., Ширяев А. Д., Коренбаум В. И. Анализ гармоник свистящих звуков в шумах форсированного выдоха человека // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 4. С. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN LNIKKO
6. Stethoscope acoustics. The doctor and his stethoscope / Ertel Paul Y. [et al.] // Circulation. 1966. N 34(5). P. 889–898.
7. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ / В. С. Кубланов, А. Ю. Долганов, В.Б. Костоусов [и др.]; под ред. В. С. Кубланова. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. 240 с.
8. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. 120 с.
9. Polat H., Güler I. A simple computer-based measurement and analysis system of pulmonary auscultation sounds // Journal of Medical Systems. 2004. N 28(6). P. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294.
10. Макалов А. О., Соболенкова В. С., Смирнов В. А. Проблемы и задачи в области электронной аускультации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 45–50.
11. Федотов А. А., Акулов С. А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. М.: Радио и связь, 2013. 250 с.
12. Исаков Р. В., Алексеева И. И. Биотехническая система регистрации виброакустических сигналов человека // Биотехносфера. 2017. № 5(53). С. 28–31. EDN YPQFDN.
13. Патент 188636 Российская Федерация, МПК А61В 5/08, А61В 7/04, А61В 7/00. Устройство для преобразования механического стетофонендоскопа в электронный / Малинин С. В., Фурман Е. Г. № 2018134746; заявл. 10.01.18; опубл. 18.04.19.

14. Патент 182368 Российская Федерация, МПК А61В 7/04. Электронный стетоскоп / Усков А. И., Ямпольский И. И. № 2017145290; заявл. 22.12.17; опубл. 15.08.18.

15. Патент 2644546 Российская Федерация, МПК А61В 7/04 (2006.01). Электронный медицинский стетоскоп / Борисов Е. Г., Борисова Л. И., Семенов А. Г. № 2016142823; заявл. 31.10.16; опубл. 12.02.18.

16. Степанов Д. А. Электронный стетоскоп: адаптация концепции под российские социально-экономические реалии // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения: труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2015 г.: в 2 ч. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета, 2015. Т. 10, № 1. С. 413–415.

17. Гончарук М. Е. Электронный стетоскоп. Проблемы электронной аускультации // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 08–28 декабря 2020 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2021. С. 341–344. EDN RPPQLB.

18. Barry Silverman, Michael Balk. Digital Stethoscope – Improved Auscultation at the Bedside // The American Journal of Cardiology. 2019. Vol. 123, is. 6. P. 984–985.

19. Angela Troncoso, Juan A. Ortega, Ralf Seepold, Natividad Martínez Madrid. Non-invasive devices for respiratory sound monitoring // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 192. P. 3040–3048.

20. Lukasz J. Nowak, Karolina M. Nowak. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes // Applied Acoustics. 2019. Vol. 155. P. 24–31.

References

1. Zlobin D. V. Metodika i ustroystvo dlya izmereniya amplitudno-chastotnykh kharakteristik datchikov elektronnoi auskul'tatsii [Methodology and device for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic auscultation sensors]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Izhevsk State Technical University*, 2012, no. 4, pp. 110–115.

2. Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki. Changes in the sound spectrum of respiration during bronchial dilation in children with asthma. *Respiratory Investigation*, 2018, vol. 56, is. 5, pp. 392–398.

3. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. S. Time series analysis: forecasting and control. 3rd ed. New York, Prentice-Hall Publ., 1994.

4. Rybochkin A. F., Kalugina N. M. Metody i sredstva analiza akusticheskikh шумов legkikh cheloveka [Methods and means of analysis of acoustic noises of human lungs]. *Nauchnyi vestnik = Scientific Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 50–62.

5. Safronova M. A., Shiryaev A. D., Korenbaum V. I. Analiz garmonik svistyashchikh zvukov v shumakh forsirovannogo vydokha cheloveka [Analysis of harmonics of whistling sounds in human forced exhalation noises]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic Magazine*, 2021, vol. 67, no. 4, pp. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN NIKKO
6. Ertel Paul Yu., eds. Acoustics of the stethoscope. The doctor and his stethoscope. *Circulation*, 1966, no. 34(5), pp. 889–898.
7. Kublanov V. S., Dolganov A. Yu., Kostousov V. B., eds. Biomeditsinskie signaly i izobrazheniya v tsifrovom zdravookhranении: khranenie, obrabotka i analiz [Biomedical signals and images in digital healthcare: storage, processing and analysis]; ed. by V. S. Kublanov. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2020. 240 p.
8. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. N. Analiz biomeditsinskikh signalov v srede MATLAB [Analysis of bimetallic metals in MATLAB environment]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 120 p.
9. Polat H., Guler I. A simple computer system for measuring and analyzing sounds during lung auscultation. *Journal of Medical Systems*, 2004, no. 28(6), pp. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294
10. Makalov A. O., Sobolenkova V. S., Smirnov V. A. Problemy i zadachi v oblasti elektronnoi auskul'tatsii [Problems and tasks in the field of electronic auscultation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 2020, is. 6, pp. 45–50.
11. Fedotov A. A., Akulov S. A. Izmeritel'nye preobrazovateli biomeditsinskikh signalov sistem klinicheskogo monitoringa [Measuring transducers of biomedical signals of clinical monitoring systems]. Moscow, Radio and Communications Publ., 2013. 250 p.
12. Isakov R. V., Alekseeva I. I. Biotekhnicheskaya sistema registratsii vibro-akusticheskikh signalov cheloveka [Biotechnical system of registration of vibro-acoustic human signals]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2017, no. 5(53), pp. 28–31. EDN YPQFDN
13. Malinin S. V., Furman E. G. Ustroistvo dlya preobrazovaniya mekhanicheskogo stetofonendoskopa v elektronnyi [A device for converting a mechanical stethophonendoscope into an electronic one]. Patent RF, no. 188636, 2018.
14. Uskov A. I., Yampolsky I. I. Elektronnyi stetoskop [Electronic stethoscope]. Patent RF, no. 182368, 2017.
15. Borisov E. G., Borisova L. I., Semenov A. G. Elektronnyi meditsinskii stetoskop [Electronic medical stethoscope]. Patent RF, no. 2644546, 2016.
16. Stepanov D. A. [Electronic stethoscope: adaptation of the concept to Russian socioeconomic realities]. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya. Trudy X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 19–21 noyabrya 2015 g.* [Health – the basis of human potential: problems and ways to solve them. Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, St. Petersburg, November 19–21, 2015]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, vol. 10, no. 1, pp. 413–415. (In Russ.)

17. Goncharuk M. E. [Electronic stethoscope. Problems of electronic auscultation]. *Nauka, tekhnika, promyshlennoe proizvodstvo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Vladivostok, 08–28 dekabrya 2020 goda* [Science, technology, industrial production: history, modern state, prospects. Materials of the regional scientific and practical conference of students and postgraduates, Vladivostok, December 08–28, 2020]. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2021, pp. 341–344. (In Russ.) EDN RPPQLB
18. Barry Silverman, Michael Balk. Digital stethoscope – improved auscultation at the patient's bedside. *American Journal of Cardiology*, 2019, vol. 123, is. 6, pp. 984–985.
19. Angela Troncoso, Juan A. Ortega, Ralph Sipold, Natividad Martinez Madrid. Non-invasive devices for monitoring the sound of breathing. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 192, pp. 3040–3048.
20. Lukash J. Novak, Karolina M. Novak. An experimental study of the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 155, pp. 24–31.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макалов Алексей Олегович, аспирант кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Alexey O. Makalov, Post-Graduate Student, of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Смирнов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: veld071@rambler.ru

Vladimir A. Smirnov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: veld071@rambler.ru

Прохорцов Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

Alexey V. Prokhortsov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru