

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATICS

Научная статья

УДК 621.391:004.052

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.45>

Исследование костного звукопроведения в системе «бионический протез – внутреннее ухо»

**А. А. Байдаров^{1,2}, И. И. Безукладников¹, П. В. Майоров¹, А. А. Южаков^{1✉},
А. М. Еловигов², Н. Б. Асташина², С. Д. Арутюнов³**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Профессора Поздеева, 7

²Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера,
Российская Федерация, 614990, Пермь, ул. Петропавловская, 26

³Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова,
Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Делегатская, 20

uz@at.pstu.ru ✉

Аннотация. В статье выполнен анализ амплитудно-частотных и временных показателей предлагаемого научно-исследовательской группой технологического решения для реализации проекта по разработке «бионического протеза ушной раковины». Целью работы является определение и исследование аналитических и экспериментальных зависимостей показателей времени работы исследуемой системы от мощности воспроизведения звука, а также амплитуды подаваемого сигнала от его частоты для формирования вывода о соответствии современным требованиям слухового аппарата. Для решения поставленных задач был создан тестовый стенд, на котором выполнены экспериментальные исследования, на основании полученных данных сделаны выводы.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика; цифровые системы; беспроводная связь; костная проводимость; звук; бионический протез; слуховой аппарат; инновации в мире слуха

Финансирование: исследование проведено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка бионического протеза уха на основе интеллектуальных и медицинских 3D технологий».

Введение. Распространённость микротии достигает 4,53 случаев на 10 000 новорождённых. При этом у большинства пациентов отмечается частичное или полное нарушение слуха, вследствие стеноза или атрезии наружного слухового прохода,

что тесно связано с их психологическим состоянием и социальным благополучием, негативно сказывается на качестве жизни, что формирует актуальность и социальную значимость проблемы [1,2]. Одним из способов восстановления слуха

© Байдаров А. А., Безукладников И. И., Майоров П. В., Южаков А. А., Еловигов А. М., Асташина Н. Б., Арутюнов С. Д., 2022.

Для цитирования: Байдаров А. А., Безукладников И. И., Майоров П. В., Южаков А. А., Еловигов А. М., Асташина Н. Б., Арутюнов С. Д. Исследование костного звукопроведения в системе «бионический протез – внутреннее ухо» // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 45-55. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.45>

являются аппараты, обеспечивающие костную проводимость звука (Bone Anchored Hearing Aid). При комплексной реабилитации пациентов с микротией помимо восстановления функции слуха важным является и эстетический компонент – замещение дефекта наружного уха посредством эпитезов, изготавливаемых из силиконового материала [3–5]. Однако стоит отметить, что на сегодняшний день восстановление функции и эстетики развиваются обособлено друг от друга. В рамках настоящего исследования ведётся разработка конструкции бионического протеза уха [6], позволяющего восстановить как функцию (костная проводимость), так и эстетику утраченного органа за счёт объединения в единую конструкцию различных компонентов: непосредственно протез уха, фиксирующая система (магнитно-балочная фиксация на имплантатах), микрофон, блок обработки звука на базе специализированного цифрового сигнального процессора (DSP) со встроенными аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, модуль радиоканала Bluetooth для беспроводного управления и приёма внешних аудиосигналов и излучатель звуковых колебаний [7,8].

Целью настоящей статьи является решение одной из частных задач исследования – оценки технических параметров вибрационного излучателя в системе «излучатель-имплантат-костная ткань» бионического протеза уха.

Описание проблемы. Одной из значительных научных проблем является оценка качества передачи звука через систему «вибрационный излучатель» – «имплантат» – «височная кость». Данная система является значительно нелинейной, имеющей множественные переходы между средами, отличающимися различными показателями скорости звука, плотности и т. д., что приводит к возникновению резонансов и задержек на различных частотах. Для получения объективной оценки технических параметров данной

системы, пригодной для её использования в подсистеме FIR-фильтрации (эквализация групповой задержки, эквализация частотной характеристики, улучшение психоакустических параметров звукопередачи) требуется создание специализированного стенда-имитатора, учитывающего вышеперечисленные факторы, а также проведение натурных испытаний в условиях, максимально приближенных к реальности.

Постановка задач исследования. Так, в ходе изучения акустических параметров вибрационного излучателя бионического протеза уха возникла потребность в определении зависимости амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) от расположения креплений ушной раковины и вибрационного излучателя.

Проведённый ранее анализ акустических характеристик разрабатываемой системы [9] показал достаточную равномерность АЧХ в расширенном голосовом диапазоне частот (100–10 000 Гц), что соответствует показателям аналогичных, но более громоздких приборов, находящихся вне протезов.

Тем не менее, несмотря на общую равномерность характеристики, в диапазоне от 200 до 500 Гц, а также 3 000–3 500 Гц наблюдаются заметные резонансы, которые могут ухудшать психоакустический комфорт при использовании системы. Предлагаемым методом их устранения является использование КИХ-фильтров (фильтров с конечной импульсной характеристикой, Finite Impulse Response, FIR), функционирующих с использованием модифицированного соответствующим образом импульсного отклика (Impulse response). Использование таких фильтров позволяет обеспечить одновременное выравнивание как АЧХ, так и параметров групповой задержки акустического сигнала.

Однако выбор слишком длинной FIR-последовательности будет приводить к соответствующему росту задержки преобразования. В общем случае, задержка при использовании FIR-фильтров составляет

$(N - 1) / (2 * F_s)$, где F_s – частота дискретизации. Так, для линейно-фазового FIR-фильтра на 21 точку (21 tap) и частоты дискретизации в 1 кГц задержка будет составлять 10 мс. При выборе оптимальной длины последовательности в случае рассматриваемой системы необходимо учитывать психологическую комфортность прослушивания, значительно ухудшающуюся при задержках более 50 мс. В случае необходимости использования фильтров, приводящих к более серьёзным задержкам, на взгляд авторов, оптимальным является незначительное ухудшение АЧХ системы, что оказывает значительно меньший эффект на восприятие пользователя.

Различия в частотной характеристике наушников и бионического протеза обусловлены разными типами устройств для преобразования электрических сигналов – в случае Apple AirPods это обычный динамик, а в случае бионического протеза ушной раковины – специализированный костный вибратор. Тем не менее, необходимо заметить, что испытательный стенд, применявшийся в проекте по настоящее время, оказывает заметное влияние на результаты измерений для рассматриваемой системы. Так, измеренные резонансы, особенно в частотном диапазоне от 2 500 до 5 000 Гц с большой долей вероятности могут быть вызваны отражением сигнала от полимерных стенок ёмкости, заполненной баллистическим гелем. Негативное влияние на результат измерений также оказывает правильная кубическая форма резервуара. По этой причине для выполнения дальнейших исследований была проведена разработка стенда, более приближенного к реальности (в т. ч. использование имитатора черепной коробки соответствующей формы, более точное позиционирование измерительного микрофона, выбор материалов имитатора).

Отдельной задачей также является оценка иных параметров, оказывающих влияние на субъективное восприятие акустического сигнала (в частности – коэф-

фициента гармонических искажений (THD), вопросов, связанных с обеспечением стереозвучания при одновременном использовании двух бионических протезов, а также изучение вопросов, связанных с психоакустическим восприятием в случае, когда у пациента сохранён слух на второе ухо.

Описание испытательного стенда. В качестве основы тестового стенда используется нативная голова свиньи, поскольку системы слуха (звукопроведения) у человека и свиньи имеют высокую степень сходства. Основным отличием строения органа слуха у человека является наличие больших полостей в сосцевидном отростке, в то время как у свиней имеется только относительно небольшая слуховая булла.

Для проведения исследования используется только фрагмент черепа, содержащий структуры внутреннего уха, остальные части удаляются. Через ушной проход во внутреннее ухо одной из частей головы устанавливается датчик считывания звука (рис. 1).

Также в затылочной кости формируется ложе для установки имплантатов, на которых осуществляется закрепление бионического эпитеза уха с встроенным костным вибратором. Общий вид стенда после проведения вышеописанных манипуляций представлен на рис. 2

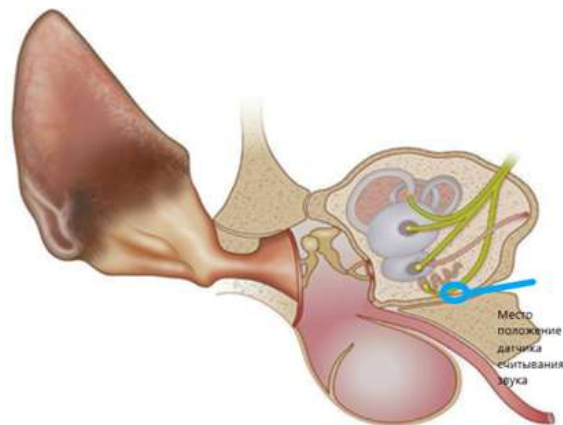


Рис. 1. Места установки датчика считывания звука

Fig. 1. Installation locations of the sound reading sensor

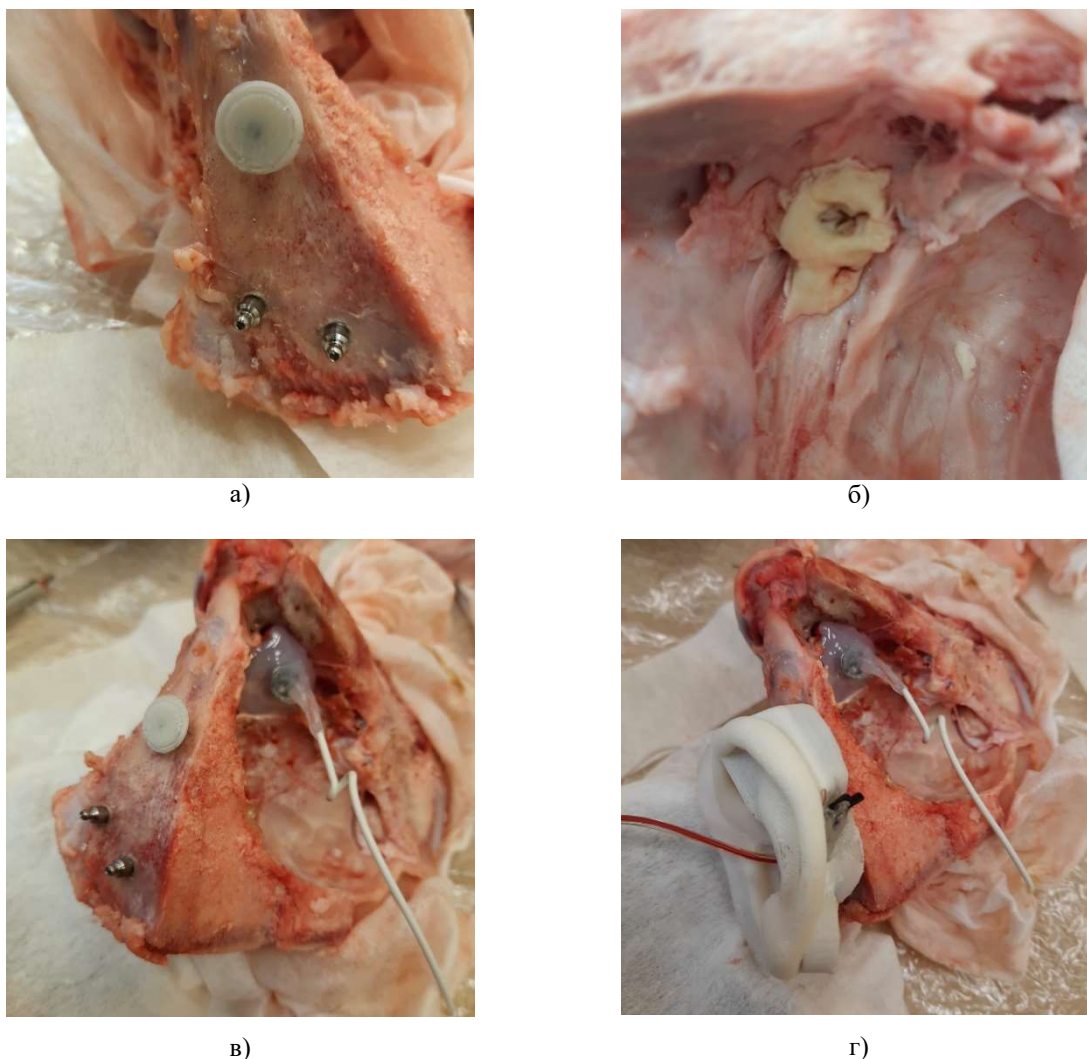


Рис. 2. Общий вид испытательного стенда
Fig. 2. General view of the test facility

Описание эксперимента. Для получения АЧХ и ФЧХ на бионический протез уха подаётся генерируемый программным обеспечением Room EQ Wizard сигнал «розовый шум». Воспроизводимый сигнал с вибратора бионического протеза уха путём костной проводимости передаётся во внутреннее ухо, где принимается датчиком считывания звука и передаётся обратно по Room EQ Wizard, в котором автоматически построится график АЧХ и ФЧХ этого сигнала.

Так же производится снятие таких характеристик, как мощность, нелинейное искажение и задержки при передаче вибрации.

Описанные выше показатели снимаются при разных расположениях креплений бионического протеза уха.

Проведение эксперимента. Костный вибратор был расположен на 13 час., относительно центра ушной раковины. За начальное расположение креплений бионического протеза уха были взяты точки 18:30 – 20:30 (рис. 3).

В качестве креплений эпитеза ушной раковины и костного вибратора используются имплантаты и супраструктура со сферическим фиксатором (рис. 4). Ответной частью шаровидного абатмента является основа из нержавеющей стали и пластиковый колпачок.

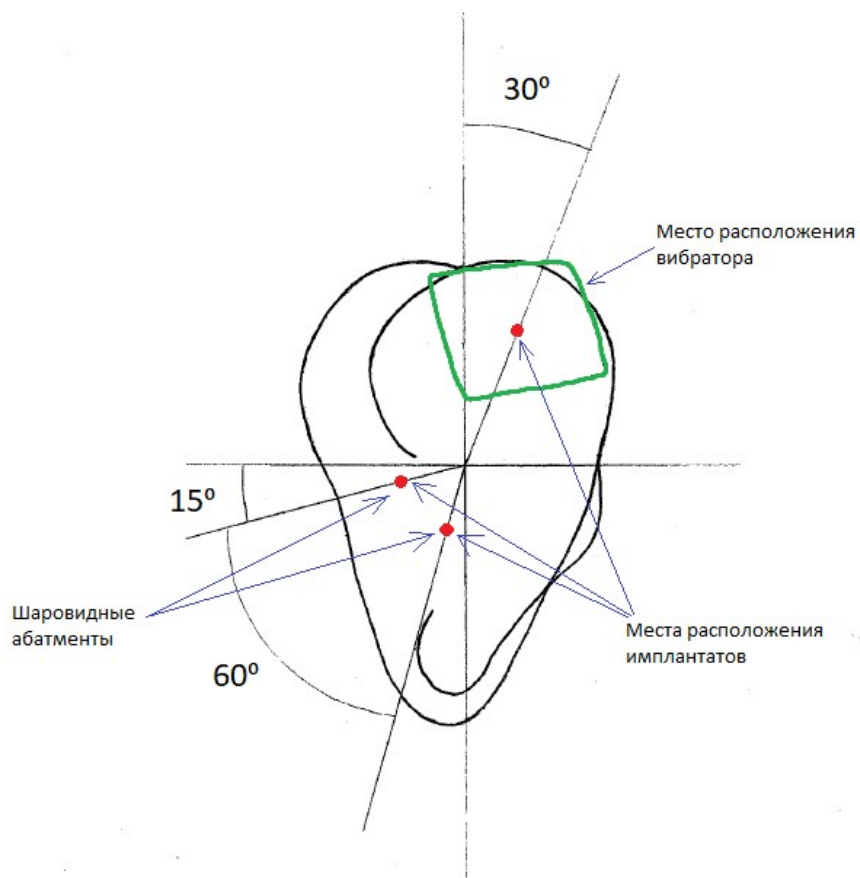


Рис. 3. Схема расположения точек крепления бионического уха в эксперименте

Fig. 3. Layout of the attachment points of the bionic ear in experiment



Рис. 4. Система крепления бионического уха с использованием супраструктуры со сферическим фиксатором

Fig. 4. Bionic ear attachment system with the use of suprastructure with spherical lock

В описанной конфигурации произведено снятие АЧХ сигнала типа «розовый шум» для определения её неравномерности. На рис. 5 приведены результаты измерения с учётом нормализации.

Как видно из представленных данных, общая АЧХ отличается достаточно высокой равномерностью на диапазоне от 1 до 20 кГц. Неравномерность составляет около ± 6 дБ. Присутствуют резонансные эффекты на частотах 8 и 19 кГц, обусловленные геометрией внутренних полостей уха и подлежащие компенсации.

Результаты измерения коэффициента гармонических искажений (КГИ) для частот

100, 500, 1, 5, 10 кГц представлены в табл. 1.

Высокий коэффициент искажений на низких частотах связан с отсутствием жёсткости крепления излучателя бионического уха к костной ткани и более высокой амплитудой вибрации. Для подтверждения влияния жёсткости крепления предполагается в дальнейшем осуществить «жёсткое» крепление бионического уха к костной ткани в тех же местах расположения, после чего вновь снять АЧХ характеристики сигнала, а также мощность, нелинейное искажение и задержки при передаче вибрации.

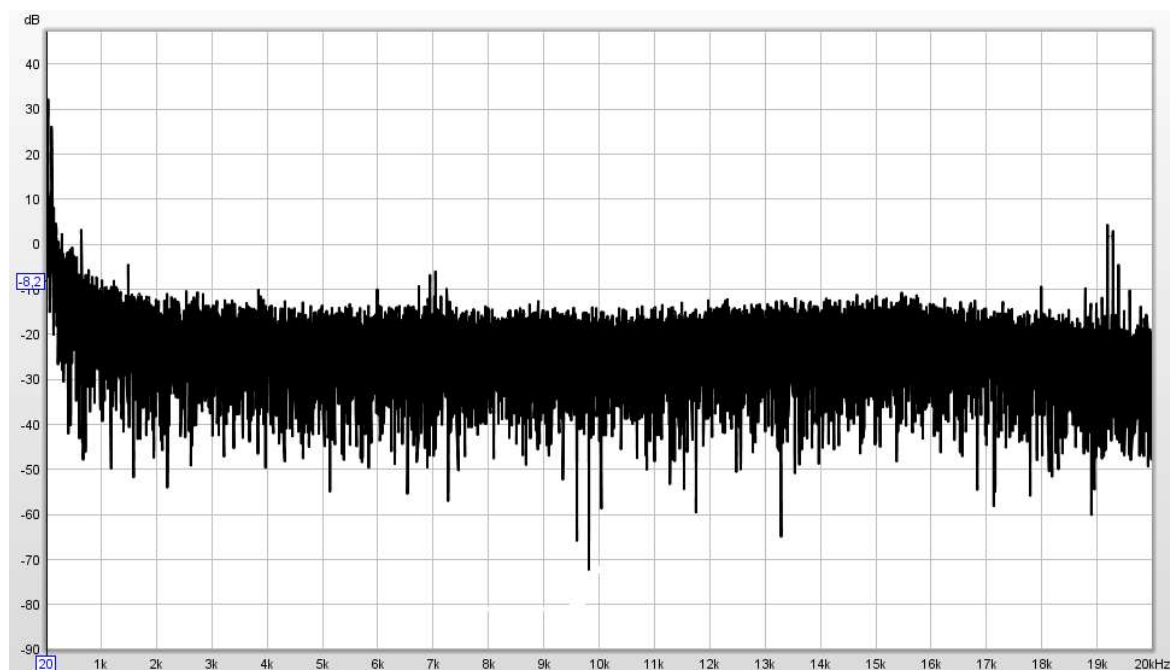


Рис. 5. Результаты измерения АЧХ на сигнале «розовый шум»

Fig. 5. The results of measuring the amplitude-frequency characteristic of the "pink noise" signal

Таблица 1. Результаты измерения коэффициента гармонических искажений на различных частотах

Table 1. The results of measuring the harmonic distortion factor at various frequencies

Частота сигнала, кГц	Коэффициент гармонических искажений, %
0,1	5
0,5	1
1	0.3
5	0.2
10	0.2

В рамках следующих этапов эксперимента планируется сформировать ложе для фиксирующих имплантатов диаметром 3,5 мм, в положениях 11–15 часов. Закрепить бионический протез уха при помощи супраструктуры со сферическим фиксатором и снять АЧХ характеристики сигнала, мощность, нелинейное искажение и задержки при передаче вибрации.

Заключение. Эксперимент, проведенный на разработанном испытательном стенде, максимально приближенном к реальности, позволил выявить ряд недостатков, присущих текущей конструкции бионического уха, основным из которых является недостаточная «жесткость» крепления излучателя уха к костным тканям головы, что значительно увеличивает искажения в слышимой области частот, в

некоторых случаях (100 Гц) делая их чрезмерно высокими. Также использование улучшенного стенда позволило определить резонансные характеристики системы «бионическое ухо – внутреннее ухо», подлежащие дальнейшей компенсации программным или аппаратным способом.

Одним из вариантов изменения АЧХ и резонансных характеристик является изменение точек крепления элементов протеза в костных тканях. Такой эксперимент запланирован в рамках дальнейших работ по проекту. Тем не менее, результаты первичных экспериментов уже показывают достаточную равномерность АЧХ, которая может быть компенсирована за счёт программной фильтрации без внесения значительных задержек.

Список источников

1. Johns A. L., Lucash R. E., Im D. D. et al. Pre and post-operative psychological functioning in younger and older children with microtia // J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2015. Vol. 68. Pp. 492–497.
2. Исследование качества жизни с помощью специфического опросника QL PAER пациентов после протетической реконструкции ушной раковины / С.Д. Арутюнов, Д.И. Поляков, С.А. Муслов и др. // Клиническая стоматология. 2021. № 1. С. 160–164.
3. Luquetti D. V., Leoncini E., Mastroiacovo P. Microtia-anotia: A global review of prevalence rates // Birth Defects Research Part A: Clinical and Molecular Teratology. 2011. Vol. 91. №. 9. С. 813–822.
4. Способ изготовления протеза ушной раковины: Пат. 2699291 РФ. МПК А61F 2/00 / Арутюнов С. Д., Степанов А. Г., Арутюнов А. С., Поляков Д. И., Гусев М. Н., Асташина Н. Б.; заявл. 05.02.2019; опуб. 05.09.2019, Бюл. № 25. – 9 с.
5. Устройство для изготовления идентичных экспериментальных конструкций временных несъемных зубных протезов: Пат. 2630354 РФ. МПК А61С 13/20 / Арутюнов С. Д., Янушевич О. О., Абакаров С. И., Апресян С. В., Перевезенцева А. А., Махина Я. Э., Раимова Д. Б.; заявл. 08.02.2013; опуб. 08.02.2013, Бюл. № 27. – 5 с.
6. Бионический протез уха: Пат. 2760398 РФ. МПК А61F 11/04 / Арутюнов С. Д., Асташина Н. Б., Южаков А. А., Степанов А. Г., Арутюнов А. С., Еловигов А. М., Фрейман В. И., Гурко В. А.; заявл. 23.11.2020; опуб. 24.11.2021, Бюл. № 33. 9 с.
7. Development and research of a wireless control system for device “Bionic ear” / S.D. Arutyunov, N.B. Astashina, A.A. Bajdarov et al. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. No. 3. Pp. 194–207. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-18.
8. Бионический протез уха: наступившее будущее / С.Д. Арутюнов, А.Г. Степанов, А.М. Еловигов и др. // Пермский медицинский журнал. 2020. № 4. С. 91–100.
9. Разработка и исследование модели беспроводной системы передачи данных между устройством управления и слуховым аппаратом / В. А. Гурко, В. И. Фрейман, А. А. Южаков и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 3(47). С. 28–43. DOI 10.25686/2306-2819.2020.3.28.
10. Адоменас П., Аронсон Я., Бирманас Е. Измерители АЧХ и их применение. М.: Связь, 1968. 165 с.
11. Винокуров В. И., Каплин С.И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения // Под ред. В. И. Винокурова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 351 с.
12. Гаврилов А. М. Нелинейный метод измерения амплитудно-частотной характеристики акустического излучателя // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 4. С. 447. DOI 10.7868/S0320791915030065.
13. Бутырин П. А. Автоматизация физических исследований эксперимента: компьютерные изме-

рения и виртуальные приборы. М.: ДМК Пресс. 2005. 264 с.

14. Шевчук В. П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем. М.: Физматлит, 2011. 320 с.

15. Петросьянц В. В., Бурындина А. Д. Автоматизация процесса снятия амплитудно-частотных характеристик электронных устройств // Молодой ученый. 2017. № 22 (156). С. 65-68.

Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 24.02.2022; принята к публикации 10.03.2021

Информация об авторах

БАЙДАРОВ Андрей Александрович – кандидат технических наук, проректор по информационным технологиям и инновационному развитию, заведующий кафедрой медицинской информатики и управления медицинскими системами, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера; доцент кафедры автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – адаптивные информационно-управляющие системы на основе нейронной технологии, системы управления и системы искусственного интеллекта, сервисная робототехника, сетевые технологии. Автор 60 научных публикаций.

БЕЗУКЛАДНИКОВ Игорь Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – интеллектуальные системы и устройства, человеко-машинное взаимодействие, сетевые технологии передачи данных, информационная безопасность. Автор 50 научных публикаций.

МАЙОРОВ Павел Валерьевич – аспирант кафедры автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – инфокоммуникационные технологии в устройствах медицинского назначения. Автор семи научных публикаций.

ЮЖАКОВ Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – нейронные измерительные устройства и системы; адаптивные информационно-управляющие системы на основе нейронной технологии; распознавание образов и информационная безопасность. Автор 300 научных публикаций.

ЕЛОВИКОВ Алексей Михайлович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой оториноларингологии, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера. Область научных интересов – оториноларингология, биомеханика. Автор 100 научных публикаций.

АСТАШИНА Наталья Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой ортопедической стоматологии, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера. Область научных интересов – стоматология, протезирование, челюстно-лицевая хирургия. Автор 150 научных публикаций.

АРУТЮНОВ Сергей Дарчоевич – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой пропедевтики стоматологических заболеваний, Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова. Область научных интересов – челюстно-лицевая реабилитация, стоматология, ортопедическая стоматология, анапластология, бионика. Автор 700 научных публикаций.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

УДК 621.391:004.052

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.45>

Study of Bone Sound Conduction in the "Bionic Prosthesis – Inner Ear" System

A. A. Baidarov^{1,2}, I. I. Bezukladnikov¹, P. V. Mayorov¹, A. A. Yuzhakov^{1✉}, A. M. Elovikov²,
N. B. Astashina², S. D. Arutyunov³

¹Perm National Research Polytechnic University,

7, Professor Pozdeev str., Perm, 614013, Russian Federation

²Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner,

26, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russian Federation

³A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry,

20, Delegatskaya str., Moscow, 127473, Russian Federation

uz@at.pstu.ru✉

Keywords: amplitude-frequency characteristic; digital systems; wireless communication; bone conduction; sound; bionic prosthesis; hearing aid; innovation in the world of hearing

Introduction. The prevalence of microtia reaches 4.53 cases per 10,000 newborns. At the same time, most patients have partial or complete hearing impairment due to stenosis or atresia of the external auditory canal, which is closely related to their psychological state and social well-being. This negatively affects the quality of life, which rises the urgency and social significance of the problem. One of the ways to restore hearing is application of devices that provide bone conduction of sound (Bone Anchored Hearing Aid). In the complex rehabilitation of patients with microtia, in addition to restoring hearing function, an important aesthetic component is also the replacement of the outer ear defect by means of epitheses made of silicone material. However, we shall note that nowadays, the restoration of function and aesthetics are developing separately from each other. Within the framework of the study, we develop a design of a bionic ear, which allows to restore both the function (bone conduction) and the aesthetics of the lost organ by combining various components into a single design: the ear prosthesis, the fixation system (magnetic bar fixation on implants), the microphone, a sound processing unit based on a specialized digital signal processor (DSP) with built-in analog-to-digital and digital-to-analog converters, a Bluetooth radio channel module for wireless control and reception of external audio signals, and a sound vibration emitter. The goal of the work was to solve one of the particular tasks of the study - to evaluate the technical parameters of the vibration emitter in the "emitter-implant-bone tissue" system of a bionic ear prosthesis. **Conclusion.** The experiment carried out on the developed test facility, which was closely approximated to real conditions, allowed us to identify a number of drawbacks inherent in the current design of the bionic ear. The main drawback is the weak construction of the attachment of the ear emitter to the bone tissues of the head, which significantly increases distortions in the audible frequency range, making them excessively high in some cases (100 Hz). In addition to this, the use of an improved test facility allowed to determine the resonant characteristics of the "bionic ear - inner ear" system, subject to further compensation by software or hardware. One of the options for changing the amplitude-frequency characteristic and resonance characteristics is to change the attachment points of the prosthesis elements in the bone tissues. Such an experiment is planned as part of the further work on the project. Nevertheless, the outcomes of initial experiments have shown sufficient uniformity of amplitude-frequency characteristic, which can be compensated by software filtering without significant delays.

Funding: this research was supported by the Government of the Perm Territory within the framework of the scientific project "Development of a bionic ear prosthesis based on intelligent and medical 3D technologies."

REFERENCES

1. Johns A. L., Lucash R. E., Im D. D. et al. Pre and post-operative psychological functioning in younger and older children with microtia. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2015. Vol. 68. Pp. 492–497.
2. Arutjunov S.D., Poljakov D.I., Muslov S.A. et al. Issledovanie kachestva zhizni s pomoshh'ju specificheskogo oprosnika QL PAER pacientov posle proteticheskoy rekonstrukcii ushnoj rakoviny [Study of the quality of life of patients using the QL PAER specific questionnaire after prosthetic auricular reconstruction]. *Klinicheskaya stomatologiya* [Clinical Dentistry]. 2021. No 1. P. 160–164. (In Russ.).
3. Luquetti D. V., Leoncini E., Mastroiacovo P. Microtia-anotia: A global review of prevalence rates. *Birth Defects Research Part A: Clinical and Molecular Teratology*. 2011. Vol. 91. №. 9. Pp. 813–822.
4. Arutjunov S. D., Stepanov A. G., Arutjunov A. S., Poljakov D. I., Gusev M. N., Astashina N. B. *Sposob izgotovleniya proteza ushnoj rakoviny* [Method for manufacturing a prosthesis of the auricle]. Patent RF, no. 2699291, 2019. (In Russ.).
5. Arutjunov S. D., Janushevich O. O., Abakarov S. I., Apresjan S. V., Perevezenceva A. A., Mahina Ja. Je., Raimova D. B. *Ustrojstvo dlja izgotovleniya identichnyh jeksperimental'nyh konstrukcij vremennyh nesemnyh zubnyh protezov* [Device for manufacturing identical experimental structures of temporary fixed dentures]. Patent RF, no. 2630354, 2013. (In Russ.).
6. Arutjunov S. D., Astashina N. B., Juzhakov A. A., Stepanov A. G., Arutjunov A. S., Elovikov A. M., Frejman V. I., Gurko V. A. *Bionicheskij protez uha* [Bionic ear prosthesis]. Patent RF, no. 2760398, 2021. (In Russ.).
7. Arutyunov S.D., Astashina N.B., Bajdarov A.A. et al. Development and research of a wireless control system for device "Bionic ear". *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. No. 3. Pp. 194–207. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-18.
8. Arutjunov S.D., Stepanov A.G., Elovikov A.M., Arutjunov A.S., Juzhakov A.A., Frejman V.I., Poljakov D.I., Astashina N.B. Bionicheskij protez uha: nastupivshee budushhee [Bionic ear prosthesis: the coming future]. *Permskij medicinskij zhurnal* [Perm medical journal]. 2020. No 4. Pp. 91–100. (In Russ.).
9. Gurko V.A., Frejman V.I., Juzhakov A.A. et al. Razrabotka i issledovanie modeli besprovodnoj sistemy peredachi dannyh mezhdru ustrojstvom upravlenija i sluhovym apparatom [Development and research of a wireless data transmission system model between a control device and a hearing aid]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2020. No 3(47). Pp. 28–43. DOI 10.25686/2306-2819.2020.3.28. (In Russ.).
10. Adomenas P.Ju., Aronson Ja.A., Birmanas E.M. et al. Izmeriteli amplitudno-chastotnyh harakteristik i ih primenenie [Amplitude-frequency response meters and their applications]. Moscow: Svjaz', 1968. 165 p. (In Russ.).
11. Vinokurov V.I., Kaplin S.I., Petelin I.G. *Jel'ektoradioizmerenija*. Pod red. V.I. Vinokurova. 2 e izd., pererab. i dop. [Electro-radio measurements. Under ed. V.I. Vinokurov. 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Vysshaja shkola. 1986. 351 p. (In Russ.).
12. Gavrilov A. M. Nelinejnij metod izmerenija amplitudno-chastotnoj harakteristiki akusticheskogo izluchatelja [A nonlinear method of measuring the amplitude-frequency characteristic of an acoustic emitter]. *Acoustical Physics*. 2015. Vol. 61. No 4. Pp. 447. DOI 10.7868/S0320791915030065 (In Russ.).
13. Butyrin P. A. Avtomatizacija fizicheskikh issledovanij jeksperimenta: komp'juternye izmerenija i virtual'nye pribory [Automation of physical research experiments: computer measurements and virtual instruments]. Moscow: DMK Press, 2005. 264 p. (In Russ.).
14. Shevchuk V. P. *Modelirovanie metrologicheskikh harakteristik intellektual'nyh izmeritel'nyh priborov i system* [Modeling of metrological characteristics of intelligent measuring instruments and systems]. Moscow: Fizmatlit, 2011. 320 p. (In Russ.).
15. Petros'janc V. V., Buryndina A. D. Avtomatizacija processa snjatija amplitudno-chastotnyh harakteristik jelektronnyh ustrojstv [Automation of the process of taking the amplitude-frequency characteristics of electronic devices]. *Molodoj uchenyj* [Young scientist]. 2017. No 22(156). Pp. 65–68. (In Russ.).

The article was submitted 31.01.2022; approved after reviewing 24.02.2022; accepted for publication 10.03.2022

For citation: Baidarov A. A., Bezukladnikov I. I., Mayorov P. V., Yuzhakov A. A., Elovikov A. M., Astashina N. B., Arutyunov S. D. Study of Bone Sound Conduction in the "Bionic Prosthesis – Inner Ear" System. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 1 (53). Pp. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.45>

Information about the authors

Andrej A. Bajdarov – Candidate of Technical Sciences, Vice-Rector for Information Technology and Innovative Development, Head of the Department of Medical Informatics and Management of Medical Systems, Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner, Associate Professor at the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University. Research interests – adaptive information and control systems based on neural technology, control systems and artificial intelligence systems, service robotics, network technologies. The author of 60 scientific publications.

Igor' I. Bezukladnikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University. Research interests – intelligent systems and devices, human-machine interaction, network technologies for data transmission, information security. The author of 50 scientific publications.

Pavel V. Majorov – PhD student at the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University. Research interests – infocommunication technologies in medical devices. The author of 7 scientific publications.

Aleksandr A. Yuzhakov – Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University. Research interests are neural measuring devices and systems, adaptive information and control systems based on neural technology, pattern recognition and information security. The author of 300 scientific publications.

Aleksej M. Elovikov – Doctor of Medical Sciences, professor, Head of the Department of Otorhinolaryngology, Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner. Research interests – otorhinolaryngology, biomechanics. The author of 100 scientific publications.

Natalija B. Astashina – Doctor of Medical Sciences, professor, Head of the Department of Orthopedic Dentistry, Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner. Research interests – dentistry, prosthetics, maxillofacial surgery. The author of 150 scientific publications.

Sergej D. Arutyunov – Doctor of Medical Sciences, professor, Head of the Department of Propaedeutics of Dental Diseases, A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry. Research interests – maxillofacial rehabilitation, dentistry, orthopedic dentistry, anaplas-tology, bionics. The author of 700 scientific publications.

Contribution of the authors: All authors made an equivalent contribution to the paper preparation. The authors declare that they have no conflict of interest.
All authors read and approved the final manuscript.