

УДК 611.84

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ И ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО ПРОТЕЗА СЛУХОВЫХ КОСТОЧЕК

Т.С. СМОЛЬСКАЯ¹, Э.В. ДРУЦ¹, Е.Л. МАЛЕЦ², М.С. ЛУШАКОВА¹, П.В. КАМЛАЧ¹

¹*Белорусский государственный университет информатики и электроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

²*ГУ "Республиканский научно-практический центр оториноларингологии"
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Проблемы, связанные с потерей слуха, могут быть эффективно решены с использованием титановых протезов для замены слуховых косточек. Однако успешное восстановление слуха напрямую зависит от того, насколько эффективно протез передает звуковые волны от слуховых косточек к внутреннему уху. В данной работе проведен анализ передачи звука через титановый протез с использованием виртуальных методов моделирования. Цель исследования – оценить акустические свойства титанового протеза, а также определить, как его конструкция влияет на передачу звука в диапазоне частот, критически важных для человеческого слуха (250 Гц – 8000 Гц).

Ключевые слова: титановый протез, слуховые косточки, передача звука, частотный анализ, вибрационные характеристики, акустические свойства, виртуальное моделирование, восстановление слуха, частоты слуха человека, цепь слуховых косточек.

FREQUENCY ANALYSIS AND VIBRATION CHARACTERISTICS OF A TITANIUM AUDITORY OSSICLE PROSTHESIS

T.S. SMOLSKAYA¹, E.V. DRUTS¹, E.L. MALETS², M.S. LUSHAKOVA¹, P.V. KAMLACH¹

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*SI "ENT Center of the Republic of Belarus"
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. Problems associated with hearing loss can be effectively addressed using titanium prostheses to replace the auditory ossicles. However, the success of hearing restoration depends directly on how efficiently the prosthesis transmits sound waves from the ossicles to the inner ear. This study analyzes the transmission of sound through a titanium prosthesis using virtual modeling methods. The aim of the research is to evaluate the acoustic properties of the titanium prosthesis and determine how its design affects sound transmission within the frequency range critical for human hearing (250 Hz – 8000 Hz).

Keywords: titanium prosthesis, auditory ossicles, sound transmission, frequency analysis, vibration characteristics, acoustic properties, virtual modeling, hearing restoration, human hearing frequencies, ossicular chain.

Введение

Для улучшения характеристик титановых протезов важно понять, как их структура и материал влияют на передачу звука. В частности, критические параметры включают частотный диапазон (250–8000 Гц), который охватывает как низкие, так и высокие частоты, необходимые для восприятия речи и окружающих звуков. Акустическое моделирование и виртуальный частотный анализ позволяют исследовать эти аспекты протезов, выявляя потери энергии и вибрационные свойства в каждом частотном диапазоне.

Цель данного исследования – провести частотный анализ и оценить вибрационные характеристики титанового протеза слуховых косточек, используя виртуальные методы моделирования. Это позволит определить, какие конструктивные особенности могут улучшить акустические свойства протеза, обеспечивая более точную передачу звуковых волн и, соответственно, лучшее качество слуха для пациентов.

Методика проведения моделирования

Для эксперимента была использована адаптированная 3D-модель слуховых косточек и протеза (рисунок 1). Для проведения акустического и частотного моделирования была выбрана программная среда COMSOL, также были учтены физико-механические свойства титана (плотность, модуль упругости и коэффициент затухания).

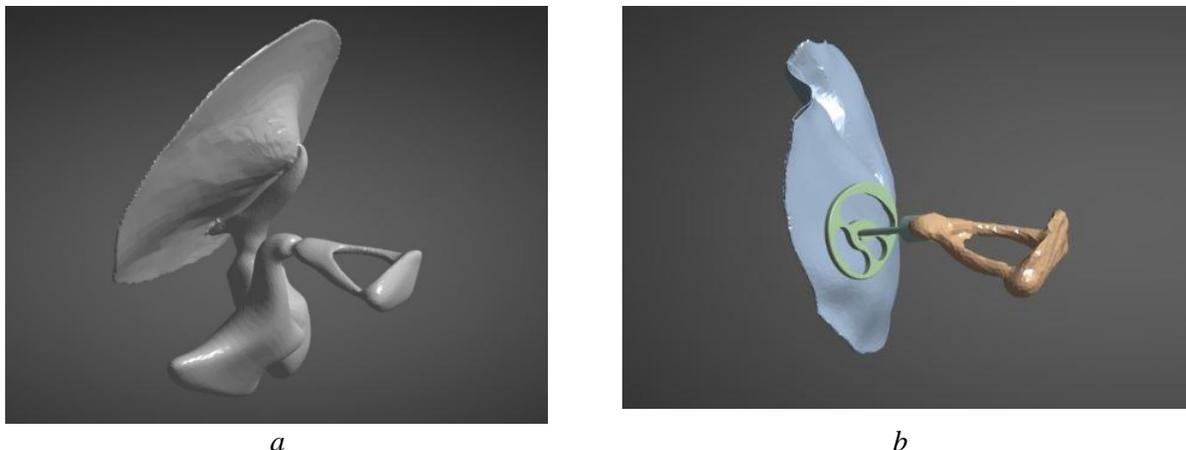


Рис. 1. 3D модель среднего уха: *a* – без импланта; *b* – с имплантом

Симуляция проводилась в частотном диапазоне от 250 Гц до 8000 Гц, на каждой из частот оценивались вибрационные характеристики и передача звуковых волн через титановый протез. Процесс включал расчет амплитуды и потерь энергии, которые возникают при передаче звука через протез на различных частотах. Дополнительно измерялись вибрационные характеристики – амплитуды колебаний внутри протеза при воздействии звуковых волн каждой из частот.

Результаты моделирования

Данные, полученные в результате симуляции, были структурированы в виде графиков (рисунок 2), отражающих потери энергии и эффективность передачи звука для каждой частоты.

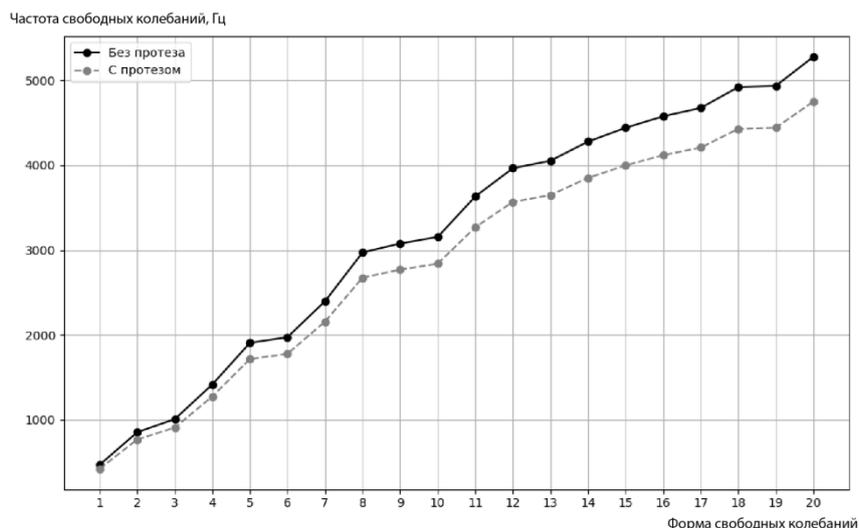


Рис. 2. 3D модель среднего уха: *a* – без импланта; *b* – с имплантом

Из графика видно, что частоты колебаний для среднего уха с протезом ниже, чем для уха без протеза. Это указывает на изменение динамических характеристик системы при установке импланта, что связано с дополнительной массой и структурной жесткостью титанового протеза.

Разница между частотами для уха с протезом и без него увеличивается с ростом номера моды, что говорит о более сильном влиянии протеза на высокочастотные колебания.

Поскольку собственные частоты связаны с акустической проводимостью и вибрационными характеристиками системы, снижение этих частот может указывать на незначительное снижение эффективности передачи звука через протез в высокочастотном диапазоне. Это влияет на восприятие высоких звуковых частот и должно учитываться при проектировании импланта.

Заключение

В данной работе был проведен анализ влияния титанового протеза слуховых косточек на вибрационные характеристики среднего уха. На основе частотного анализа показано, что установка протеза приводит к снижению собственных частот колебаний структуры, особенно заметному на высоких режимах.

Результаты моделирования подчеркивают необходимость тщательного выбора материалов и конструктивных характеристик протеза для обеспечения оптимальной передачи звуковых волн. Полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований и улучшения конструкции титановых протезов с целью минимизации потерь в высокочастотном диапазоне, что имеет решающее значение для улучшения качества жизни пациентов с нарушением слуха.

Список литературы

1. Hong, C. J., Giannopoulos, A. A., Hong, B. Y., et al. Clinical applications of three-dimensional printing in otolaryngology-head and neck surgery: a systematic review / C. J. Hong, A. A. Giannopoulos, B. Y. Hong, et al. –*Laryngoscope*, 2019. – 129(9), 2045-2052.
2. Besl, P. J., & McKay, N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes / *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992. – 14(2), 239-256.
3. Fischler, M. A., & Bolles, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / *Communications of the ACM*, 1981. – 24(6), 381-395.
4. Johnson, A. E., & Hebert, M. Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes / *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999. – 21(5), 433-449.
5. Plecko, M., et al. Osseointegration of novel titanium implant surfaces: A comparative in vivo study / *Acta Biomaterialia*, 2012. – 8(9), 3507-3514.
6. Zhuang, X., et al. Automatic reconstruction of 3D cardiac anatomy and segmentation of cardiac MR images: a review / *Physics in Medicine & Biology*, 2010. – 55(20), 71-98.