

Акустичні прилади та системи

УДК 534.121

Розвиток методів моделювання зовнішнього та середнього вуха людини

Гарасюк^f А. О., ORCID [0000-0001-7212-4174](https://orcid.org/0000-0001-7212-4174)e-mail: nastia.garasiuk@gmail.comДідковський^s В. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-0807-822X](https://orcid.org/0000-0002-0807-822X)e-mail: v.didkovskiy@gmail.comКафедра Акустики та Акустоелектроніки acoustic.kpi.ua

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Розглядаються основні підходи моделювання роботи зовнішнього та середнього вуха людини. На основі результатів експериментів професора Борисенка О. М. змодельовано зовнішнє і середнє вуха людини за допомогою методу електромеханічних аналогій. У роботі запропоновано розширену модель слухової системи з використанням якої знайдено парціальні частоти елементів, які входять до складу зовнішнього та середнього вуха людини.

Ключові слова — середнє вуха; електромеханічні аналогії; частотна характеристика; електрична модель середнього вуха.

I. ВСТУП

У світі майже 10% людей мають різноманітні патології слуху. Майже 500 млн населення живуть із туговухістю чи повною глухотою; із них понад 32 млн — діти. За останньою статистикою близько 55 млн людей у Південній Америці страждають різною формою втрати слуху на одне чи два вуха; 16% дорослих європейців мають втрату слуху. Тому проблема дослідження слухової системи людини з метою покращення теоретичного та практичного оснащення діагностування для подальшого лікування людей зі слуховими вадами є надзвичайно гострою.

Проблемі передачі та перетворення звукового сигналу в слуховій системі присвячено чимало робіт, зокрема роботи Михасева Г. І [1], [2], Фірсова М. А., Дж. Фланагана [3], Х. Фастла, G. Von Bekesy, К.-В. Huttenbrik, М. Bortnitz, Н.-J. Beer. G. Hofmann [4], [5], Найди С. А. [6], [7], Дідковського В. С. [8], [9], Попова Ю. В., Борисенка О. М..

Вивчення механіки середнього вуха протягом останніх років викликає все більший інтерес, оскільки її розуміння дозволяє застосовувати нові методи хірургічної реконструкції вуха. При цьому, знання передавальних характеристик середнього вуха, що є перетворювачем який дозволяє ефективно передавати енергію сигналу в завиток, коли звук спочатку перетворюється на механічні коливання ланцюга барабанної перетинки та кісточок, а потім у вібрації рідини у внутрішньому вусі [3]. При відсутності

такого трансформатора енергія коливань у більшій мірі буде відбиватися на межі овального вікна з рідиною лабіринту. Дана стаття присвячена аналізу експериментально отриманих амплітудно-частотних характеристик середнього вуха та розробці теоретичних засад і методу електромеханічних аналогій для синтезу вихідних параметрів слухової системи за її відомою АЧХ.

II. ПЕРЕДУМОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.

За основу візьмемо експеримент, який був проведений Борисенком О. М. та його колегами для визначення впливу зміни об'єму порожнин середнього вуха на передачу звука. Експеримент був проведений на ізольованих блоках скроневої кістки; використано 5 людських скроневих кісток, які були заготовлені зі збереженням сосцеподібного відростку та частково зі лускою скроневої і потиличної кісток без вушної раковини та частини перетинчасто-хрящового відділу зовнішнього слухового проходу. Група кістка заготовлювалася протягом перших 24 годин після смерті. Вона була діагностована на відсутність патології вуха та зберігалася в 70%-ому розчині етилового спирту за температури 5°C.

Кількість енергії звукової хвилі, що передавалася у рідину завитка оцінювалася за допомогою гідрофона. Для цього з боку середньої черепної ямки в основному завитку просвердлювався отвір діаметром 2 мм. Основний завиток знаходився попереду від



лабіринтної порції каналу лицьового нерву. В зроблений отвір вставляли металевий конус, попередньо заклеївши щілину між конусом і краями отвору кістковим цементом. Завиток і конус наповнювали фізіологічним розчином. У металевий конус вставляли гідрофон. Сигнал від гідрофону проходив через вузькосмуговий фільтр і передпідсилювач [10].

Звук подавали в зовнішній слуховий прохід через вушну воронку, жорстко фіксованій на динаміку; воронка не контактувала зі стінками слухового проходу. Частота сигналу змінювалася від 200 до 400 Гц за допомогою генератора з кроком 100 Гц у діапазоні 200-2000 Гц і 200 Гц у діапазоні 2000-44000 Гц. Рівень звукового тиску в зовнішньому слуховому проході підтримувався постійним на рівні 81 ± 0.5 дБ і контролювався за допомогою осцилоскопу. Скроснева кістка з конусом гідрофону і динамік з вушною воронкою жорстко фіксувалися в металевих штативах. Перед початком кожної серії вимірювань установка калібрувалася. У результаті проведених експериментів отримана усереднена амплітудно-частотна характеристика скросневої кістки на звукове подразнення за 5-тьма скросневими кістками.

Проходження акустичної хвилі в скросневій кістці характеризується наступними резонансними піками на частотах 400, 700, 900, 1400, 2400 та 2800 Гц (рис. 1). При цьому усереднена амплітуда відгуків становила 433.2; 306.7; 516.4; 472.1 мВ.

Отримані О. М. Борисенком значення резонансних частот слухової системи людини (Рис. 1) стали вхідними даними для моделювання АЧХ зовнішнього та середнього вуха.

III. ПІДХОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ТА СЕРЕДНЬОГО ВУХА

A. Механічна модель і метод електромеханічних аналогій

Існує декілька основних теоретичних підходів досліджень зовнішнього та середнього вуха людини. Перший підхід пропонує «механічну модель», у якій кожний компонент системи, а саме: барабанна перетинка, молоточок, наковальня, стремінце описується у вигляді об'єкта, що має певні механічні та фізичні характеристики. Барабанна перетинка та з'єднані з нею слухові кісточки створюють механічну частину, а барабанна порожнина з об'ємом і поєднана з нею евстахієва труба утворюють акустичну частину системи [11].

Найпростішою коливальною системою при цьому є маса, підвішена на пружині. Система рухається за відсутності тертя. Вважаємо, що масою пружини можна знехтувати в порівнянні з масою на пружині, а уся пружинність зосереджена в пружині. Коливання у слуховій системі є вимушеними, що відбуваються під дією зовнішньої сили, яка не залежить ні від узагальненої координати, ні від узагальненої швидкості, тобто, від характеру руху системи. Приймаємо джерело збуджуючої сили необмеженим, а саму силу такою, що змінюється за гармонічним законом.

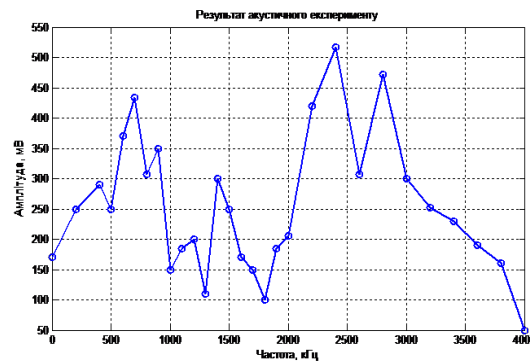


Рис. 1 Інтактна скроснева кістка [10]

Коливання в даній системі є взаємним перетворенням кінетичної енергії маси та потенціальної енергії деформації пружини. Ця коливальна система є системою із зосередженими параметрами.

Іншим підходом є метод електромеханічних аналогій, який базується на схожості рівнянь що описують коливальні процеси механічної і електричної природи. Якщо рівняння є аналогічними, то однаковими є і їхні розв'язки, тому розв'язок механічної задачі можна замінити розв'язком схожої електромеханічної.

За аналогією до механічної системи, найпростішим електричним коливальним контуром є з'єднання котушки та конденсатора. Коливання у цьому контурі є взаємним перетворенням електричної енергії конденсатора та магнітної енергії катушки.

У роботі [6] з використанням механічної моделі акустичного трансформатора, розроблено математичну модель середнього вуха людини. Згідно цієї моделі, еквівалентна схема середнього вуха людини є системою двох зв'язаних контурів. У роботі [11], розраховані значення парціальних частот контурів порівнюються з експериментальними даними, а саме результатами багаточастотної тимпанометрії і робиться висновок про їхній збіг. Проте дана модель розроблена для об'єктивних методів діагностики, що передбачають розташування акустичного зонду в зовнішньому слуховому проході.

Нині відомо чимало моделей середнього та зовнішнього вуха [6], [11-13] які базуються на представленні слухової системи за допомогою схем зі зосередженими параметрами. Проте, як показують дослідження, такі уявлення є істинними лише для області низьких частот.

Для того щоб якнайточніше відворити більшу кількість характерних резонансів людської слухової системи та врахувати наявність зовнішнього слухового проходу було запропоновано та досліджено систему з п'ятьма степенями свободи. У даній схемі за допомогою поняття довгих ліній перейдено до системи з розподіленими параметрами.

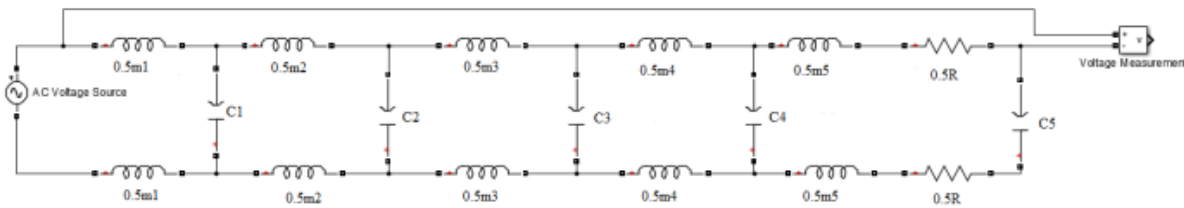


Рис. 2 Еквівалентна електрична модель зовнішнього та середнього вуха людини

В. Метод скінченних елементів.

Подальшим розвитком механічної моделі є метод «скінченних елементів» (FEM). У цьому випадку всі об'єкти системи розбиваються на складові частини у тривимірному просторі, як система з розподіленими параметрами, кожна з яких володіє строго заданими механічними властивостями, своїм способом з'єднання з оточуючими частинами.

Метод скінченних елементів дає бажані результати, але є складним, особливо враховуючи геометричні характеристики елементів середнього вуха людини. До того ж, важко пояснити фізичну природу даних, отриманим цим методом.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Для аналізу коливань зовнішнього та середнього вуха використовувався метод електромеханічних аналогій. При цьому електричними величинами: напрузі, ємності, активному опорі, індуктивності відповідають механічні: сила, гнучкість, активний механічний опір, маса. Було побудовано приведену еквівалентну схему середнього вуха людини та проаналізовано її за допомогою прикладного пакету Simulink (Рис. 2).

За аналогією до роботи [11] у цій схемі m_1 – маса повітря у зовнішньому слуховому проході, m_2 – маса барабанної перетинки, m_3 – маса молоточка, m_4 – маса наковальні, m_5 – маса стремінця, R – опір втрат за рахунок передачі енергії ланцюгом слухових кісточок, C_i – гнучкості відповідних елементів.

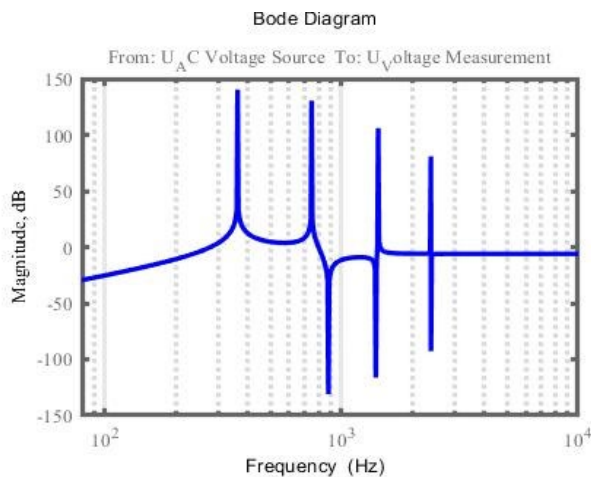


Рис. 3 Резонансні частоти зовнішнього та середнього вуха

Величини елементів еквівалентної електричної моделі вибираємо чисельно рівними відповідним механічним величинам:

$$m_1 = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \quad m_4 = 27 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

$$m_2 = 14 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \quad m_5 = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

$$m_3 = 23 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \quad R = 1.16 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Наведені значення параметрів запозичені з робіт [11], [14].

Значення для параметрів C_i були знайдені методом послідовного наближення, маючи на меті отримати частотну характеристику, що максимально відповідає експерименту Борисенка М. О.

$$C_1 = 37.5 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}, \quad C_2 = 78.2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф},$$

$$C_3 = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ Ф},$$

$$C_4 = 53 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}, \quad C_5 = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}.$$

Значення парціальних частот, що відповідають даним значенням параметрів:

$$f_1 = 2,2795 \cdot 10^3 \text{ Гц}, \quad f_2 = 481,0085 \text{ Гц},$$

$$f_3 = 691,9780 \text{ Гц},$$

$$f_4 = 1,3305 \cdot 10^3 \text{ Гц}, \quad f_5 = 10,327 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Отримані за допомогою цієї моделі значення резонансних частот зовнішнього та середнього вуха (364, 748, 1430, 2390 Гц) (Рис. 2) добре збігаються з експериментальними результатами (Рис. 3) [10].

Отримані значення парціальних частот — власних частот коливань окремо взятих елементів середнього вуха людини, можуть допомогти визначити масово-пружні характеристики для заміни ланцюга барабанна перетинка — овальне вікно (молоточок, наковальня, стремінець). Для знаходження пружних характеристик елементів, які підлягають заміні потрібно знайдені значення f та m підставити в формулу $C = (2\pi f)^2 \cdot m$ і отримаємо необхідні параметри для підбору матеріалів імплантів.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано три можливих підходи для відтворення середньостатистичної АЧХ здорової людини, а саме:

- механічна модель зовнішнього та середнього вуха, як системи зі зосередженими параметрами;
- метод скінчених елементів для моделювання зовнішнього та середнього вуха, як системи з розподіленими параметрами;
- метод електромеханічних аналогій.

У статті за розширеною моделлю зовнішнього та середнього вуха людини (5-ти контурна система) знайдені парціальні частоти елементів, які входять до складу слухової системи людини. Тобто, розв'язана задача синтезу елементів зовнішнього та середнього вуха людини.

Дана робота може бути корисною для науковців у галузі отоларингології і в отохірургії для вдосконалення методів діагностики слуху.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] G. I. Mikhasev and I. L. Slavashovich, "Sobstvennyye chastoty kolebatel'noy sistemy srednego ukha posle total'noy rekonstruktsii [Eigenfrequencies of the middle ear vibrational system after total reconstruction]," *Bull. St. Petersburg. State Univ. Ser. 1. Math. Mech. Astron.*, no. 3, pp. 107–116, 2012.
- [2] G. I. Mikhasev, M. A. Firsov, and V. P. Stnikov, "Modelirovaniye svobodnykh kolebaniy zvukoprovodyashchey sistemy rekonstruirovannogo srednego ukha [Modeling of free vibrations of the sound-conducting system of the reconstructed middle ear]," *Russ. J. Biomech.*, no. 1, pp. 52–62, 2005, URL: http://vestnik.pstu.ru/get_res/fs/file.pdf/2329/%25C3.%25C8.+%25CC.%25E8%25F5%25E0%25F1%25E5%25E2%252C+%25CC.%25C0.+%25D4%25E8%25F0%25F1%25EE%25E2%252C+%25C2.%25CF.+%25D1%25E8%25F2%25ED%25E8%25EA%25EE%25E2.+%25CC%25EE%25E4%25E5%25EB%25E8%25F0%25EE%25E2%25E0%25ED%25E8%25E5+%25F1%25E2%25EE%25E1%25EE%25E4%25ED%25FB%25F5+%25EA%25EE%25EB%25E5%25E1%25E0%25ED%25E8%25E9+%25E7%25E2%25F3%25
- [3] J. Flanagan, *Analiz, sintez i vospriyatiye rechi [Analysis, synthesis and perception of speech]*. 1968.
- [4] H.-J. Beer *et al.*, "Finite Element Modeling of the Human Eardrum and Applications," in *Middle ear mechanics in research and otosurgery*, 1996, pp. 40–47.
- [5] H.-J. Beer *et al.*, "Modelling of Components of the Human Middle Ear and Simulation of Their Dynamic Behaviour," *Audiol. Neurotol.*, vol. 4, no. 3–4, pp. 156–162, 1999, DOI: [10.1159/000013835](https://doi.org/10.1159/000013835).
- [6] S. A. Naida, "Matematicheskaya model' srednego ukha cheloveka [Mathematical model of the middle ear of a person]," *Electron. Commun.*, no. 15, pp. 49–50, 2002.
- [7] S. A. Naida, "Chastotnyye kharakteristiki koeffitsiyenta davleniya slukhovymi kostochkami i akusticheskogo refleksa [Frequency characteristics of the pressure coefficient of the auditory ossicles and acoustic reflex]," *Electron. Commun.*, no. 19, pp. 11–16, 2003.
- [8] V. S. Didkovskiy, S. A. Naida, O. A. Zubchenko, "Technique for Rigidity Determination of the Materials for Ossicles Prostheses of Human Middle Ear," *Radioelectronics and Communications Systems*, 2015, V. 58, No. 3, pp. 134–138, DOI: [10.3103/S073527271503005X](https://doi.org/10.3103/S073527271503005X)
- [9] V. S. Didkovskiy, S. A. Naida, "Building-up principles of auditory echoscope for diagnostics of human middle ear," *Radioelectronics and Communications Systems*, 2016, V. 59, No. 1, pp. 39–46, DOI: [10.3103/S0735272716010039](https://doi.org/10.3103/S0735272716010039).
- [10] O. N. Borisenko, Y. A. Sushko, I. A. Srebnnyak, and G. S. Serbin, "Vliyaniye izmeneniya ob'yema polostey srednego ukha na peredachu zvuka [The effect of changes in the volume of the cavities of the middle ear on sound transmission]," in *Problema reabilitatsii v otolaringologii. III plenum pravleniya Rossiyskogo obshchestva otolaringologov*, 2003.
- [11] S. A. Nayda, "Formula srednego vuha v normi. Vidbittya zvuku vid barabannoYi peretinki [The formula of the middle ear is normal. Reflection of sound from the tympanic membrane]," *Akustichnyy visnik*, vol. 5, no. 3, pp. 46–51, 2002.
- [12] W. Darlid, "Estimating bone conduction transfer function using optoacoustic emissions," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, no. 2, pp. 907–917, 2003, DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1582436>.
- [13] K. V. Frolov, I. F. Goncharovich and P. P. Lihnov, *Infrazvuk, vibratsiya, cheloveek [Infrasound, vibration, man]*, M.: Mashinostroenie, 1996, p. 304.
- [14] G. Bekeshi, V. A. Rozenblit. *Mekhanicheskiye svoystva ukha [The mechanical properties of the ear]*, London 1951, p. 683–691.

Надійшла до редакції 30 жовтня 2019 р.

УДК 534.121

Развитие методов моделирования наружного и среднего уха человека

Гарасюк^f А. О., ORCID [0000-0001-7212-4174](https://orcid.org/0000-0001-7212-4174)

e-mail: nastia.garasiuk@gmail.com

Дидковський^s В. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-0807-822X](https://orcid.org/0000-0002-0807-822X)

e-mail: v.didkovskiy@gmail.com

Кафедра Акустики та Акустoeлектроники acoustic.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина



Аннотация— Рассматриваются основные подходы моделирования работы наружного и среднего уха человека. На основе результатов экспериментов профессора Борисенко А. Н. смоделирован наружное и среднее ухо человека с помощью метода электромеханических аналогий. В работе предложено расширенную модель слуховой системы с использованием которой найдено парциальные частоты элементов, которые входят в состав наружного и среднего уха человека.

Ключевые слова — среднее ухо; электромеханические аналогии; частотная характеристика; электрическая модель среднего уха.

UDC 534.121

Development of Modeling Methods for the Outer and Middle Ear of a Human

A. O. Harasiuk^f, ORCID [0000-0001-7212-4174](https://orcid.org/0000-0001-7212-4174)

e-mail: nastia.garasiuk@gmail.com

V. S. Didkovskyi^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-0807-822X](https://orcid.org/0000-0002-0807-822X)

e-mail: v.didkovskyi@gmail.com

Department of Acoustic and Acoustoelectronic acoustic.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In the world, almost 10% of people have a variety of hearing disorders. Nearly 500 million people live with deafness; more than 32 million of them are children. Therefore, the problem of studying the human hearing system to improve the theoretical and practical equipment of diagnosis for the further treatment of people with hearing impairments is extremely acute.

This article is devoted to the analysis of experimentally obtained amplitude-frequency characteristics of the middle ear and to the development of theoretical foundations and the method of electromechanical analogies for the construction of middle ear frequency response.

The main possible approaches for theoretical obtaining of the external and middle ear frequency response based on the results of the average frequency response of a healthy person are analyzed, namely: a mechanical model with concentrated parameters, a finite element method and an electromechanical analogy method.

The first approach proposes a "mechanical model" in which each component of the system, namely: malleus, incus and stapes, ladder is described as an object having certain mechanical and physical characteristics. The simplest oscillatory system is the mass suspended on a spring. It is commonly believed that movement occurs in the absence of friction. This oscillatory system is a system with lumped parameters, however, this model is designed for objective diagnostic methods that involve the placement of an acoustic probe in the external auditory canal.

A further development of mechanical analogies is the Finite Element Method (FEM). In this case, all the objects of the system are broken down into components in three-dimensional space, as a system with distributed parameters, each of which has strictly specified mechanical properties, its own way of connecting with the surrounding parts.

Another approach is the method of electromechanical analogies, which is based on the similarity of equations describing oscillatory processes of mechanical and electrical nature. If the equations are similar, then their solutions are the same, so the solution of the mechanical problem can be replaced by the solution of similar electromechanical. By analogy to a mechanical system, the simplest electrical oscillating circuit is the connection of a coil and a capacitor. The oscillations in this circuit are the mutual conversion of the capacitor's electrical energy and the coil's magnetic energy.

Electromechanical analogies were used to analyze the oscillations of the outer and middle ears. In this electrical quantities: voltage, capacitance, active resistance, inductance are mechanical: strength, flexibility, active mechanical resistance, mass. The equivalent circuit of the human middle ear was constructed and analyzed using the Simulink application package. The values of the resonant frequencies of the outer and middle ear (364, 748, 1430, 2390 Hz) obtained in this model are in good agreement with the experimental results.

As a result, an equivalent electrical circuit is proposed that takes into account both the outer ear and the middle ear, and allows you to reproduce more of the characteristic resonances of the frequency response of the average healthy person.

Keywords — middle ear; electromechanical analogies; frequency response; middle ear electrical model.

