

АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДНЬОГО ВУХА ЛЮДИНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Дана публікація присвячена аналізу параметрів, які можуть бути використані при побудові моделі функціонування середнього вуха дорослої людини. Було проаналізовано основні параметри на основі опублікованих анатомічних даних. Приведено аналіз чутливості параметрів та оптимізацію параметрів за допомогою ПЗ Matlab. Визначені параметри можуть використовуватись для майбутнього моделювання функцій вуха та створення його моделі.

Ключові слова: параметр, аналіз, середнє вухо, чутливість, модель.

Abstract

This publication is dedicated to the analysis of parameters that can be used in constructing a functional model of the adult human middle ear. The key parameters were analyzed based on published anatomical data. A sensitivity analysis of the parameters and their optimization using MATLAB software were conducted. The determined parameters can be used for future modeling of ear functions and the development of its model.

Key words: parameter, analysis, middle ear, sensitivity, model.

Вступ

Середнє вухо людини — це крихітна механічна структура, що складається з барабанної перетинки, трьох слухових кісточок (молоточка, коваделка та стремінця), зв'язок середнього вуха, сухожиль м'язів і порожнини середнього вуха. Дослідження функції передачі звуку в середньому вусі проводилися на скроневих кістках людини або на тваринах. Водночас було розроблено численні моделі середнього вуха для кращого розуміння механізму передачі звуку в людському вусі.

Моделі вуха також дозволяють оцінювати імплантовані пристрої та протези, оскільки скроневі кістки не завжди доступні, а повторюваність експериментів на окремих кістках є обмеженою. За допомогою визначення критичних параметрів та їх оптимізації можна проводити моделювання акустико-механічної передачі звуку як у нормальному, так і в патологічному вусі.

Результати дослідження

Параметричні моделі стали першим кількісним підходом до механіки вуха, який спрощує динамічний рух слухових кісточок до поступальних і обертальних рухів жорстких тіл.[1] Середнє вухо людини анатомічно складається з: барабанної перетинки, трьох слухових кісточок (молоточок, коваделко, стремінце), сухожиль, зв'язок середнього вуха, м'язів, середньо вушної порожнини. Також до основних складових додаються зв'язки між частинами вуха. Структура вуха представлена на рисунку 1.

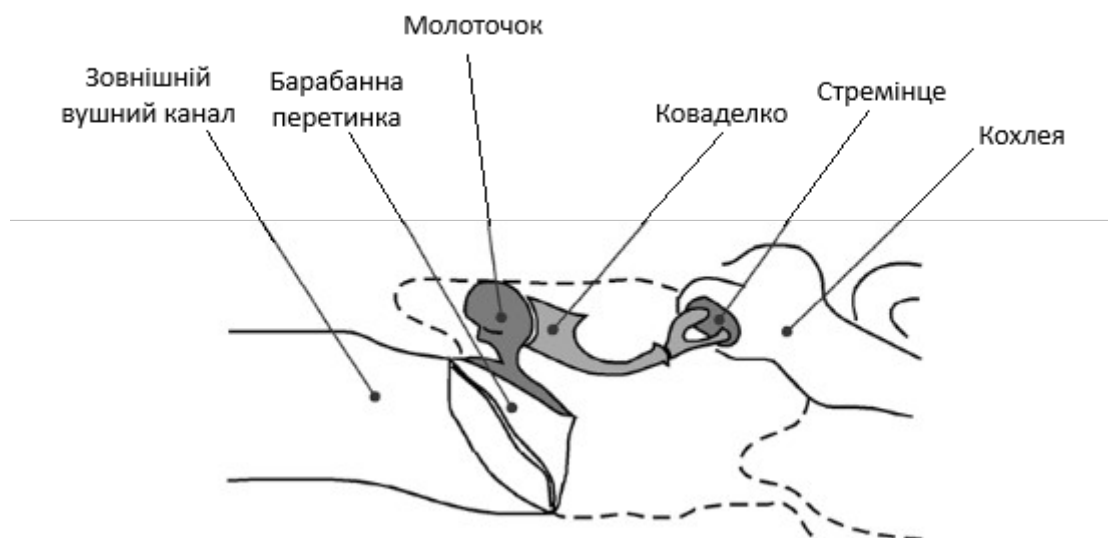


Рисунок 1 — Анатомічна будова середнього вуха людини

Для коректного моделювання роботи середнього вуха людини, необхідно визначити параметри анатомічних частин, які безпосередньо впливають на процес передачі акустичних сигналів із зовнішнього середовища. До статичних параметрів відносяться: об'єм повітря в зовнішньому слуховому каналі варіюється від 910 до 1 725 мм³ (Stinson, 1989), що відповідає масі приблизно 1,17–2,23 мг.[2] Молоточок та коваделко розглядалися як жорсткі тіла, що обертаються навколо фіксованої осі в діапазоні частот 250 Гц – 8 000 Гц. Оскільки амплітуда їх вібрації (~0,1 мкм) складає менше 0,01% від довжини молоточка та коваделка (на рівні міліметрів), їх обертальний рух було спрощено до поступального руху, а еквівалентна маса обчислена за рівнянням:

$$m = J / L^2 \quad (1)$$

- J — момент інерції молоточка або коваделка відносно осі обертання,
- L — відстань між точкою прикладання сили та віссю,
- m — еквівалентна маса.

Маса молоточка знаходиться в межах 23–27 мг, а коваделка – 25–32 мг.[2] Використовуючи рівняння (1), еквівалентна маса молоточка, або коваделка обчислена як приблизно 4 мг. Маса стремінця прийнята рівною 1,78 мг на основі опублікованих даних 1,05–4,35 мг.[2] Барабанна перетинка має форму конуса з кутом приблизно 135°, площу поверхні від 55,8 до 85,0 мм², середню товщину 0,045–0,1 мм і густину 1,2 г/см³. [3]

Таблиця 1 — Основні фізичні параметри частин середнього вуха

Анатомічна структура	Ключовий параметр	Величина
Зовнішній слуховий канал	Об'єм повітря	910-1725 мм ³
Барабанна перетинка	Форма	Конус, кут 135°
	Площа	55,8-85,0мм ²
	Товщина	0,045-0,1мм
	Густина	1,2г/см ³
Молоточок	Маса	23-27мг
Коваделко	Маса	25-32мг
Стремінець	Маса	1,05-4,35мг
Кохлея	Маса	~6,4мг
Барабанна перетинка	Форма	Конус, кут 135°

Динамічні характеристики визначаються передачею коливань від барабанної перетинки до стремінця, що контролюється рівняннями руху з відповідними параметрами. За основу були взято експериментальні вимірювання зміщень барабанної перетинки та основи стремінця в скроневих кістках людини за допомогою подвійних лазерних доплерівських інтерферометрів у частотному діапазоні 250–8 000 Гц для формування цільової функції.[4]

Процес оптимізації параметрів був спрямований на мінімізацію цільового рівняння Лагранжа через ітераційний процес. В якості динамічних параметрів було використано параметри, перетворені з електричної схеми моделі Крінглеботна.[5] За моделлю Крінглеботна, динамічні параметри розподіляються на параметри жорсткості(K1-K8)[5] та демпфування(C1-C8)[5] та моделюють фізичні властивості взаємозв'язків основних фізіологічних структур середнього вуха. Пара параметрів K4-C4, яка за моделлю відображає зв'язок, що підтримує молоточок, можна виключити із списку ключових динамічних параметрів. Використовуючи значення, отримані з моделі Крінглеботна, можна вирахувати значення коливання барабанної перетинки та стремінця, порівнюючи їх з експериментальними даними. Завданням було: використовуючи програмне забезпечення Matlab та програмний модуль Optimization Toolbox, підібрати динамічні параметри жорсткості та демпфування, при яких розрахункові значення показників, отримані за допомогою Matlab, будуть максимально наближені до показників, які були отримані при експериментальних вимірюваннях зміщень барабанної перетинки та основи стремінця в скроневих кістках людини за допомогою подвійних лазерних доплерівських інтерферометрів у частотному діапазоні 250–8 000 Гц.[4] Для оптимізації параметрів використовується метод послідовного квадратичного програмування та ітераційне змінювання величин динамічних параметрів K1-K8, C1-C8. Метод SQP (послідовне квадратичне програмування) є одним із найефективніших методів нелінійної оптимізації з обмеженнями. Він використовує квадратичні апроксимації цільової функції на кожному кроці, що дозволяє швидко знаходити оптимальне рішення. За допомогою зміни параметрів вдалось досягти відповідності між експериментальними даними та еталонними.

Таблиця 2 — Значення вхідних параметрів моделі Крінглеботна до та після оптимізації

Параметр	Початкове значення	Після оптимізації
K1	1200	1175
K2	2000	20001
K3	10974	94740
K5	1000000	1000017
K6	135	167
K8	618	623
C1	0	0,000007
C2	0,05	0,5
C3	0,732	1,74
C4	0,0841	0,122
C5	0,036	0,359
C6	0,0216	0,00028
C7	0,2	0,02
C8	0,00036	0,00004

Висновки

У даній роботі проведено аналіз параметрів, що визначають функціонування середнього вуха людини, та їх оптимізацію для побудови моделі, яка враховує анатомічні та механічні особливості цього органу. На основі опублікованих даних були визначені ключові статичні та динамічні параметри, які впливають на процес передачі звуку. Зокрема, були розглянуті характеристики барабанної перетинки, слухових кісточок та кохлеї. Для моделювання передачі акустичних коливань використано параметри, отримані з моделі Крінглеботна та проведено їх корекцію за допомогою методу послідовного квадратичного програмування в середовищі MATLAB. Процедура оптимізації дозволила досягти високого рівня відповідності між експериментальними даними та розрахунковими

значеннями. Отримані результати в подальшому можуть бути застосовані для побудови фізичної моделі середнього вуха людини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aibara R, Welsh JT, Puria S, Goode RL. Human middle ear sound transfer function and cochlear input impedance. //HearRes – 2001.- С. 100–109
2. Davis H Anatomy and physiology of the auditory system. In: Davis H, Silverman SR (eds) Hearing and deafness, 3rd edn. Holt, Rinehart & Winston, New York. 1978 (PDF).
https://www.researchgate.net/publication/8411598_Lumped_parametric_model_of_human_ear_for_sound_transmission
3. Møller AR. Network model of the middle ear. // J Acoust Soc Am – 1961. - С. 168–176.
4. Gan RZ, Wood MW, Dormer KJ. Human middle ear transfer function measured by double laser interferometry system. //Otol Neurotol 25 – 2004. – С. 423–435.
5. Kringelbotn M Network model for the human middle ear. //Scan Audiol – 1988, С. 75–85.

Марчук Андрій Юрійович - аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, andriu4934@gmail.com.

Науковий керівник: **Наталія Іванівна Заболотна** — д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, E-mail: natalia.zabolotna@gmail.com.

Marchuk Andrii Yuriyovych - Postgraduate student, Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, andriu4934@gmail.com.