

Можливості моделювання повітряного каналу слухової системи

Морозко П. В., ORCID [0000-0001-9366-812X](https://orcid.org/0000-0001-9366-812X)

e-mail p77morozko@gmail.com

Замша К. С.,

e-mail senya.shpion@gmail.com

Луньова С. А., доц. к.ф.-м.н., ORCID [0000-0003-0683-1211](https://orcid.org/0000-0003-0683-1211)

e-mail svetlana_lunyova@yahoo.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Проаналізована можливість застосування низькочастотних спрощень при моделюванні зовнішнього слухового каналу. Уточнений частотний діапазон достовірності представлення розподілених параметрів середовища з зосередженими елементами у вигляді маси та гнучкості повітря, замкненого в об'ємі каналу. Метод дослідження базується на розрахунку частотної залежності вхідного опору слухового каналу при застосуванні моделювання його у вигляді чотириполосника. Метод чотириполосника поєднує в собі як метод електроакустичних аналогій, так і теорію чотириполосника.

Бібл. 11, рис. 8.

Ключові слова — слуховий канал; метод чотириполосника; вузька труба сталого перетину; акустичні елементи коливальної системи.

I. Вступ

При моделюванні акустичних каналів для спрощення теоретичних обчислень останнім часом все більше застосовується метод чотириполосника [1]. Цей метод поєднує в собі як метод електроакустичних аналогій, так і теорію чотириполосника.

Метод електроакустичних аналогій може бути застосований, якщо системи з розподіленими параметрами можливо замінити системами з зосередженими параметрами. Як правило, це правомірно зробити в області низьких частот [2].

За теорією чотириполосника, будь-який акустичний елемент можна подати еквівалентною електричною схемою у вигляді симетричного Т-подібного чотириполосника. При цьому елементи схеми представляються у вигляді гіперболічних функцій [3]. У разі відсутності (або неврахування) втрат у системі від гіперболічних функцій можна перейти до відповідних тригонометричних функцій [4].

Якщо аргумент таких функцій, що визначається хвильовим розміром вузького каналу, малий, – можливе подальше спрощення у вигляді переходу до значення аргументу функцій. Це призводить до створення подібної схеми з елементами, які мають значення акустичної маси та гнучкості.

Таким чином, питання застосування зосереджених елементів для моделювання повітряного каналу зовнішнього вуха потребує обговорення граничного

діапазону частот, можливих для такого представлення.

Більшість існуючих моделей середнього та зовнішнього вуха [5, 6, 7, 8, 9] базуються саме на представленні каналів у вигляді електроакустичних схем, складених із зосереджених елементів.

В зв'язку з цим існує необхідність порівняння розрахунків частотних характеристик каналів за повними та спрощеними характеристиками.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботах [7, 8, 9] електромеханічні схеми слухового каналу і порожнини середнього вуха представлені у вигляді зосереджених елементів. Як показують проведені дослідження, такі уявлення можуть бути застосовані тільки в області низьких частот і обмежують опис процесу проходження звуку через слуховий тракт людини.

В роботі [7] зовнішній слуховий прохід представлений у вигляді ланцюжка Т-подібних LC-ланок, проте як необхідна кількість ланок, так і частотний діапазон, який обмежує роботу такої схеми, не обумовлюються.

У зв'язку з цим виникає потреба обговорити межі застосування даного подання шляхом порівняння з результатами строгого теоретичного рішення задач [1, 10], а також результатами представлення каналів



у вигляді Т-подібних схем з частотно залежними елементами [3, 4].

III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізувати можливість та межі застосування низькочастотних спрощень при моделюванні зовнішнього слухового каналу.

IV. МЕТОДИКА

Метод дослідження базується на розрахунку частотної залежності входного опору слухового каналу при застосуванні моделювання його у вигляді чотириполюсника. За методикою, дослідженою у роботах [1, 3, 4, 5], вузьку трубу з жорсткими стінками можливо представити у вигляді Т-подібної схеми (рис. 1)

В разі акустичного середовища без втрат у виразі для коефіцієнту розповсюдження хвилі

$$\gamma = \delta + jk$$

нехтуємо величиною затухання амплітуди хвилі δ і одержуємо

$$\gamma = jk,$$

де $k = \frac{\omega}{C_0}$ – хвильове число (ω – кругова частота).

Таке припущення дозволяє перейти від гіперболічних функцій до тригонометричних:

$$\begin{cases} th(j\frac{kl}{2}) = jtg(\frac{kl}{2}), \\ sh(jkl) = j\sin(kl). \end{cases} \quad (1)$$

Розглянемо граничні теоретичні моделі закритої та відкритої труби [5].

Модель закритої труби показана на рис. 2 (вихідний опір наближається до нескінченності, на схемі (рис. 1) клеми 1-2 розірвані і другою ланкою нехтуємо).

Умова резонансу:

$$j\rho_0 c_0 S tg \frac{kl}{2} + \frac{\rho_0 c_0 S}{j \sin kl} = 0.$$

В результаті частоти резонансу знаходяться за формулою:

$$f_{p_n} = (2n - 1)f_{p_1}, n = 2, 3, \dots,$$

де n – номер гармоніки; $f_{p_1} = \frac{c_0}{4l}$ – значення частоти першого резонансу закритої труби.

Частоти антирезонансу

$$f_{a_n} = nf_{a_1}, n = 2, 3, \dots,$$

де $f_{a_1} = \frac{c_0}{2l}$ – значення частоти першого антирезонансу закритої труби

Модель відкритої труби представлена на рис. 3. Вихідний опір на схемі (рис. 1) дорівнює нулю і клеми 1-2 з'єднані.

Умова резонансу:

- 1) $tg \frac{kl}{2} = 0$, або друга гармоніка частоти резонансу $f_{p_2} = \frac{c_0}{l}$;
- 2) $1 - \sin^2 \frac{kl}{2} = 0$, або перша частота резонансу $f_{p_1} = \frac{c_0}{2l}$.

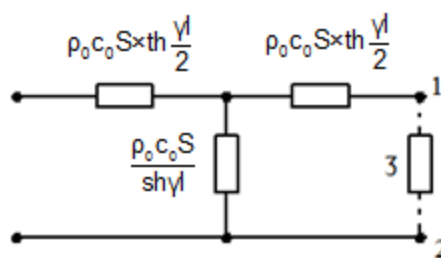


Рис. 1. Модель вузької труби з жорсткими стінками у вигляді Т-подібної схеми чотириполюсника (ρ_0, c_0 – густина та швидкість звуку в повітрі, S – діаметр каналу, l – довжина каналу).

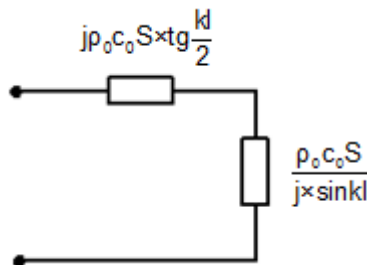


Рис. 2. Модель закритої труби без втрат.

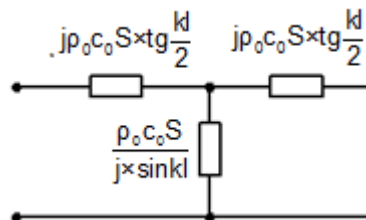


Рис. 3. Модель відкритої труби без втрат.

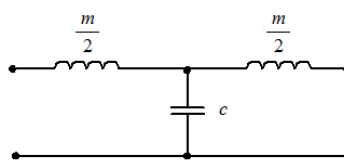


Рис. 4. Спрощене представлення відтинку труби з зосередженими параметрами.



Таким чином, частоти резонансу

$$f_{p_n} = n f_{p_1}, n = 2, 3, \dots; f_{p_1} = \frac{c_0}{2l}.$$

У разі, коли від аргументів функцій можна перейти до асимптотичних значень функцій, схема спрощується і елементи опорів представляються у вигляді мас та гнучкості (рис. 4)

Частоти антирезонансу:

$$f_{a_n} = (2n-1)f_{a_1}, n = 2, 3, \dots,$$

де $f_{a_1} = \frac{c_0}{4l}$ – значення частоти першого антирезонансу відкритої труби.

При цьому

$$m = \rho l S;$$

$$c = \frac{V}{\rho_0 c_0^2 S^2},$$

(V – об'єм середовища всередині труби.)

Зазначимо, що при переході до акустичних параметрів маса обчислюється як:

$$m_a = \frac{m}{S^2},$$

а акустична гнучкість:

$$c_a = c S^2.$$

V. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У даному розділі обговорюються результати розрахунків вхідного опору слухового каналу, одержані за повними та спрощеними моделями.

A. Закритий канал.

Розглядається зовнішній канал слухового апарату довжиною 27 мм і завширшки 7 мм [10].

Графік частотної залежності вхідного опору такого каналу, обчислений за моделлю закритої труби, представлений на рис. 5.

Як витікає з рис. 5, резонанс в каналі спостерігається на частотах 3 кГц та 9 кГц; антирезонанс – 6 кГц, що відповідає теоретичним даним [1, 10].

При застосуванні низькочастотних спрощень для вивізів елементів (див. рис. 4) частотна характеристика наведена на рис. 6.

У цьому разі частота резонансу $f_p = 3$ кГц дорівнює теоретичній, але частотних гармонік, як і частоти антирезонансу, не спостерігається.

B. Відкритий слуховий канал.

Для відкритого слухового каналу залежність вхідного опору від частоти подана на рис. 7.

Аналогічна характеристика при використанні спрощених співвідношень представлена на рис. 8.

Для відкритого каналу визначення частоти резонансу $f_p = 6$ кГц і антирезонансу $f_{a_1} = 3$ кГц; $f_{a_2} = 9$ кГц.

В разі застосування низькочастотних спрощень перша частота резонансу вже становить 4,1 кГц (замість 6 кГц), перша частота антирезонансу – 3 кГц, що співпадає з теоретичними даними (друга – очікувано відсутня).

Отже, застосування низькочастотних спрощень при моделюванні повітряних каналів призводить до суттєвої зміни резонансної частоти або відсутності частоти антирезонансу і відсутності гармонік цих частот.

Це пов'язане з обмеженням частотного діапазону використання значень аргументу функції замість самої функції.

Так, при розкладанні в ряд Тейлора функції

$$\sin(kl) \approx kl - \frac{(kl)^3}{3!} + \dots$$

для заміни її аргументом потрібно виконати умову [11]:

$$kl > \frac{(kl)^3}{3!}. \quad (2)$$

Для розмірів слухового каналу $l=7$ мм умова (2) призводить до максимальної частоти можливості такого розкладання

$$f < 3800 \text{ Гц},$$

а при жорсткій умові $kl \gg \frac{(kl)^3}{3!}$ діапазон застосування низькочастотних спрощень взагалі обмежується частотою $f < 380$ Гц.

Тому зрозуміло, що щодо частоти $f \leq 3$ кГц застосування низькочастотної асимптотики дозволяє отримати результати, наближені до теоретичних.

ВИСНОВКИ

Проаналізовані можливості вживання методу чотириполюсника для моделювання частотної залежності властивостей зовнішнього слухового каналу.

Застосування Т-подібної схеми вузького каналу з елементами, що описуються гіперболічними функціями хвильової довжини каналу, дозволяє одержати значення резонансних та антирезонансних частот, які практично співпадають з теоретичними значеннями, отриманими з розв'язку хвильового рівняння для аналогічної задачі.

Перехід до представлення елементів Т-подібної схеми зосередженими параметрами у вигляді акустичних мас та гнучкостей об'єму повітря, замкненого в каналі, значно зменшує частотний діапазон достовірності розрахунків і обмежує його частотою порядку 3 кГц.



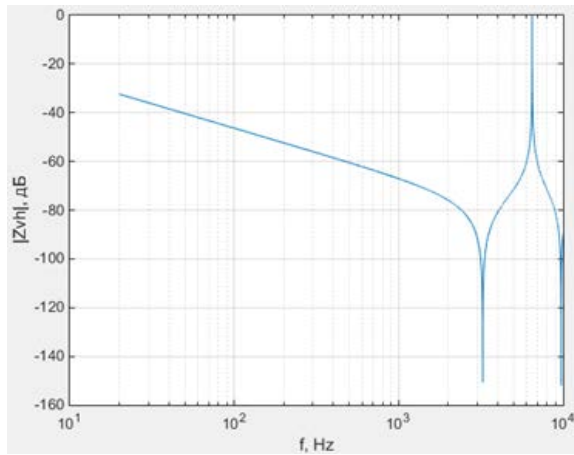


Рис. 5. Частотна залежність вхідного опору закритого слухового каналу.

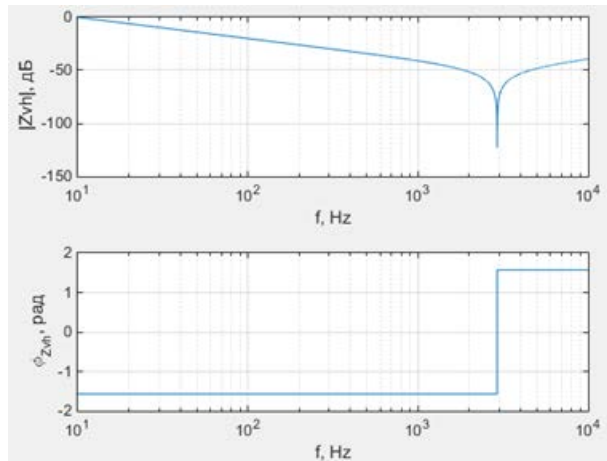


Рис. 6. Частотна характеристика вхідного опору закритого зовнішнього слухового каналу при застосуванні низькочастотних спрощень.

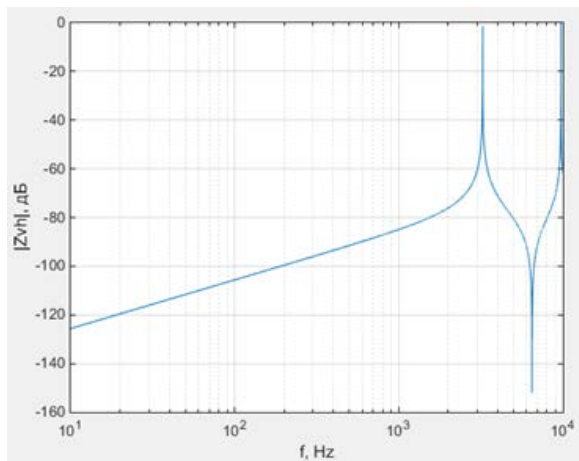


Рис. 7. Залежність вхідного опору від частоти для відкритого зовнішнього слухового каналу.

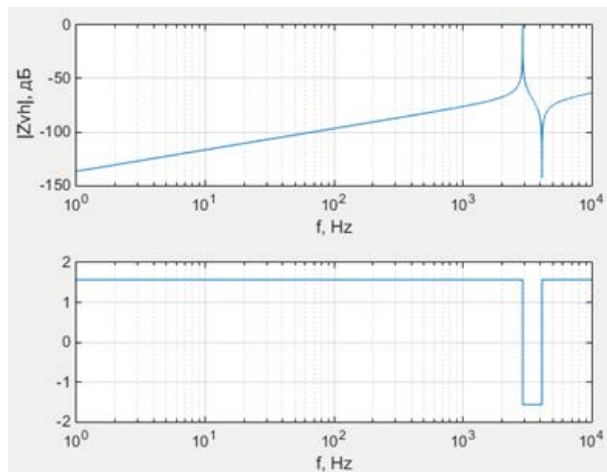


Рис. 8. Вхідний опір відкритого слухового каналу при використанні низькочастотних спрощень.

При недотриманні цієї умови у разі ідеальної відкритої труби суттєво знижується розрахункова частота резонансу; для закритої труби – не спостерігається частота антирезонансу. Також у частотній характеристиці каналу відсутні гармоніки частот резонансу та антирезонансу, які можуть відіграти суттєву роль при поєднанні моделі слухового каналу з моделлю слухової системи

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Y. S. Vahitov, Teoreticheskie osnovy elektroakustiki i elektroakusticheskaya aparatura [Theoretical fundamentals of electroacoustics and electroacoustic equipment], M.: Iskusstvo, 1982.
- [2] V. S. Didkovskiy and S. A. Lunova, Osnovi arhitekturnoi ta fiziologichnoyi akustiki [Fundamentals of architectural and physiological acoustics], K.: Avanpostprim, 2001.
- [3] T. Laurent, "Matematisk behandling av kontinuerligt inhomogena ledningar medelst ekvivalenter samt exempel pa metodens anvandning for olika praktiska problem," *Tekn.Medd.K. Telegrafstyrelsen*, pp. 113-133, 1940.

- [4] G.Fant, *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya* [Acoustic theory of speech formation], M.: Nauka, 1964.
- [5] V. S. Didkovskiy, S. A. Lunova and S. S. Kalinin, "Metod analizu zvukovih poliv u vuzkih konichnih trubah iz zhorstkimi stinkami [Method of analysis of sound fields in narrow conical pipes with rigid walls]," *Elektronika i zv'yazok*, pp. 38-43, 2013.
- [6] G.O.Mareev, "Sovremennyye predstavleniya o srednem uhe i ego matematicheskie modeli [Modern ideas about the middle ear and its mathematical models]," *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal*, pp. 96-100, 2012.
- [7] 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>
- [8] K. V. Frolov, I. F. Goncharovich and P. P. Lihnov, *Infrazvuk,vibratsiya,cheloveek* [Infrasound, vibration, man], M.: Mashinostroenie, 1996, p. 304.
- [9] S. A. Nayda, "Formula srednogo vuha v normi. Vidbittya zvuku vid barabannoYi peretinki [The formula of the middle ear is normal. Reflection of sound from the tympanic membrane]," *Akustichniy visnik*, vol. 5, no. 3, pp. 46-51, 2002.



[10] J. Flanagan, *Analiz, sintez i vospriyatie rech xi* Analysis, synthesis and perception of speech., M.: Svyaz, 1968.

[11] G. Korn and T. Korn, *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics], M.: Nauka, 1968.

Надійшла до редакції 30 червня 2017 р.

УДК 534.134

Возможности моделирования воздушных каналов слуховой системы

Морозко П. В., ORCID [0000-0001-9366-812X](https://orcid.org/0000-0001-9366-812X)

e-mail p77morozko@gmail.com

Замша К. С.,

e-mail senya.shpion@gmail.com

Лунёва С. А., доц. к.ф.-м.н., ORCID [0000-0003-0683-1211](https://orcid.org/0000-0003-0683-1211)

e-mail svetlana_lunyova@yahoo.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—Проанализирована возможность применения низкочастотных упрощений при моделировании наружного слухового канала. Уточнен частотный диапазон достоверности представления распределенных параметров среды сосредоточенными элементами в виде массы и гибкости объема воздуха, запертого в объеме канала. Метод исследования базируется на расчете частотной зависимости входного сопротивления слухового канала при использовании моделирования его в виде четырехполюсника. Метод четырехполюсника объединяет в себе как метод электроакустических аналогий, так и теорию четырехполюсника.

Библ. 11, рис.8.

Ключевые слова — слуховой канал; метод четырехполюсника; узкая труба устойчивого пересечения; акустические элементы колебательной системы.

UDC 534.134

Opportunities for Modeling the Air Channel of the Behavior System

P. V. Morozko, ORCID [0000-0001-9366-812X](https://orcid.org/0000-0001-9366-812X)

e-mail p77morozko@gmail.com

K. S. Zamsha,

e-mail senya.shpion@gmail.com

S. A. Luniova, Assoc.Prof. PhD, ORCID [0000-0003-0683-1211](https://orcid.org/0000-0003-0683-1211)

e-mail svetlana_lunyova@yahoo.com

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—The possibility of applying low-frequency simplifications in the modeling of the external auditory canal is analyzed. The specified frequency range of reliability of representation of distributed environmental parameters by lumped elements in the form of mass and flexibility of air, closed in the volume of the channel.

For calculations of the input resistance is considered the external channel of the hearing aid of a person in length 27 mm and a width of 7 mm.



The method of research is based on the calculation of the frequency dependence of the input resistance of the auditory channel in the simulation of it in the form of a four-pole, namely, the T-shaped narrow channel scheme with elements described by hyperbolic functions of the channellength wave form.

The obtained values of the resonance and antiresonance frequencies of the input resistance practically coincide with the values obtained from the theoretical solution of the wave equation of the channel.

Most of the existing modern models of the middle and outer ears are based on the presentation of channels in the form of electroacoustic schemes composed of lumped elements.

When modeling the auditory channel using a T-shaped circuit whose elements are represented by lumped parameters:

- in the case of a closed channel, the frequencies of antiresonance and harmonics of resonant frequencies are lost;
- there is a resonance frequency shift (4,1 kHz instead of 6 kHz), no antiresonance frequency and harmonic resonant frequencies in an open channel.

Such results are due to the fact that, in this case, the range of low-frequency simplifications is limited to a frequency of 3 kHz (and with a more severe restriction in general at a frequency of about 400 Hz), which significantly reduces the range of reliable calculations.

The modeling of the auditory channel with only lumped mass elements and flexibility leads to the absence of frequency response characteristics of the channel of harmonics of resonance and antiresonance frequencies, which can play a significant role in the combination of channel models and the auditory system as a whole.

In this connection, it is necessary to compare the calculations of the frequency characteristics of the channels according to the full and simplified characteristics.

Ref. 11, fig. 8.

Keywords — auditory channel; four-pipe method; narrow pipe of stable cross section; acoustic elements of the oscillatory system.

