

УДК 534.134

О.А.Зубченко, С.А. Найда, д-р техн. наук

Спектрально-временной анализ гласных звуков и сигналов вызванной отоакустической эмиссии уха человека

В работе описана математическая модель среднего уха человека на основе связанных контуров. С ее помощью вычислены значения парциальных частот среднего уха. Исследована взаимосвязь парциальных частот среднего уха человека с формантными частотами гласных звуков и резонансными частотами сигналов задержанной вызванной отоакустической эмиссии уха человека в норме.

In work the mathematical model of a middle ear of the person on the basis of the connected contours is described. With its help values of partial frequencies of a middle ear are calculated. The interrelation of partial frequencies of a middle ear of the person with formants frequencies of vowel sounds and resonant frequencies of signals of the detained caused otoacoustic emissions of an ear of the person in norm is investigated.

Ключевые слова: *формантные частоты, гласные звуки, среднее ухо человека, связанные контура, вызванная отоакустическая эмиссия.*

Введение

Акустическая теория резонансов гласных звуков (формант), главным стимулом для развития которой служило создание синтезаторов речи, имеет длинную историю и ей посвящены монографии [1, 2]. Было, в частности, установлено, что частотные положения формант, зависящие главным образом от передаточной функции речевого тракта, имеют тесную статистическую взаимосвязь, характеризуемую коэффициентом взаимной корреляции. Резонансы же слухового тракта специально не исследовались, вследствие чего и корреляция между резонансными частотами слухового и речевого трактов не рассматривалась. О состоянии исследований слухового тракта у человека можно судить хотя бы по тому, что параметры его элементов приводятся без указания на то, к мужскому или женскому уху они относятся. Создание математической модели [3] и получение формулы для параметра среднего уха человека в норме [4]

дало возможность проводить исследования резонансов слухового и речевого трактов человека.

В работе [5] рассмотрен вопрос, с какой частотой среднего уха совпадает частота III форманты звука «а» и других гласных. Характерной физической особенностью гласных звуков является то, что они отличаются сравнительно большой интенсивностью и длительностью звучания (0,1-0,3 с), дискретным спектром и формантной структурой огибающей спектра.

Целью данной работы является определение первой и второй парциальных частот среднего уха, их взаимосвязи с формантными частотами гласных звуков «а» и «у», и спектральными максимумами сигналов вызванной отоакустической эмиссии (ВОАЭ) уха человека в норме. Установление такой взаимосвязи может дать новый объективный метод диагностики слуха.

Модель среднего уха человека на основе связанных контуров

Для анализа колебаний системы среднего уха человека воспользуемся методом электро-механических аналогий [3]. В его основу положено подобие уравнений, которые описывают электрические и механические явления. При этом электрическим величинам: напряжению, емкости, индуктивности, активному сопротивлению, соответствуют механические: сила, гибкость, масса, активное механическое сопротивление.

С физической точки зрения барабанная перепонка представляет собой тонкую, равномерно растянутую пленку, обладающую распределенной инерцией и упругостью – мембрану. Инерция мембраны характеризуется массой единицы площади ρ (в кг/м²), а упругость – силой натяжения τ (в Н/м). Последняя представляет собой силу, действующую в плоскости мембраны на единицу длины опоры мембраны. Мембрана при расчете заменяется простой колебательной системой в виде подвешенного на пружину поршня. Эквивалентная масса поршня и масса мембраны связаны соотношением:

$$m_{\text{экв}} = \frac{4}{3} m_M = \frac{4}{3} \pi a^2 \rho, \text{ кг}, \quad (1)$$

где a – радиус мембраны. Эквивалентная гибкость пружины:

$$C_{\text{экв}} = \frac{1}{8\pi t}, \frac{\text{М}}{\text{Н}}. \quad (2)$$

Оценка $m_{\text{экв}}$ перепонки при толщине 0,074мм, площади $S_{\text{б.пер}}=64\text{мм}^2$ и $\rho_{\text{пер}}=103\text{кг/м}^3$ дает значение $m_{\text{экв}} \approx 6,3$ мг.

К барабанной перепонке прикреплены слуховые косточки: молоточек с $m_{\text{мт}}=25$ мг, наковальня с $m_{\text{н}}=30\text{мг}$, стремя с $m_{\text{с}} \approx 3\text{--}4\text{мг}$. Т.о., суммарная масса косточек и мембраны равна $m_{\Sigma} = 65$ мг.

Рассмотрим электромеханическую схему среднего уха.

Среднее ухо человека представляет собой механоакустическую систему. Механическая ее часть образована барабанной перепонкой и соединенной с ней системой косточек. Натяжение барабанной перепонки может регулироваться соответствующими мышцами. Акустическая часть образована барабанной полостью с объемом $V_{\text{б.пол}} \approx 1\text{см}^3$ и соединенной с ней слуховой (евстахиевой) трубой. Диаметр отверстия из барабанной полости в трубу равен от 3 до 6 мм, т.е. площадь $S_0=(7\text{--}28)\text{мм}^2$, а длина трубы $l_{\text{тр}}=37$ мм. Поскольку евстахиева труба соединяется с носоглоткой отверстием малого диаметра, ее объем определим как объем конуса, выбрав $S_0=28 \text{ мм}^2$ для взрослого человека:

$$V_{\text{тр}} = \frac{1}{3} S_0 l_{\text{тр}} = 345\text{мм}^3. \text{ Т.к. длина трубы превышает}$$

ее диаметр даже при выходе из барабанной полости, присоединенной массой (массой соколящегося воздуха) можно пренебречь. Масса воздуха в трубе, движущегося как единое целое, равна $m_{\text{тр}} = \rho_0 V_{\text{тр}} = 4,15 \cdot 10^{-7}$ кг. Аналогично тому, как это делается с устройствами электроакустических аппаратов, осуществляющих изменение площади сечения колеблющегося потока воздуха, заменим среднее ухо его моделью - акустическим трансформатором (рис.1): $S_{\text{б.п.}}$, $S_{\text{б.пол}}$ и S_0 – площадь барабанной перепонки, барабанной полости и отверстия из барабанной полости в евстахиеву трубу соответственно; r_1 - сопротивление потерь в результате передачи звуковой энергии через цепь слуховых косточек во внутреннее ухо; r_2 - сопротивление потерь колеблющегося воздуха на трение о стенки евстахиевой трубы (сопротивлением r_2 по сравнению с r_1 естественно пренебречь, что проверялось расчетом r_2 по известным форму-

лам); $m_{\text{тр}}$ - масса воздуха, движущегося как единое целое в евстахиевой трубе; m_{Σ} - суммарная масса косточек и барабанной перепонки; $C_{\text{а.б.пол}}$, $C_{\text{а.б.п}}$ – акустические гибкости барабанной полости и перепонки соответственно.

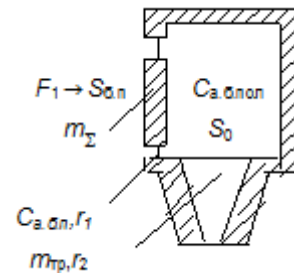


Рис.1. Механическая модель среднего уха человека

На рис.2 приведена полная (а) и приведенная (б) схема электрического аналога среднего уха. Как видно, приведенная эквивалентная схема представляет собой два связанных контура. Общим элементом для них (элементом связи) является барабанная полость. При этом масса косточек, гибкость барабанной перепонки и барабанной полости, и активная составляющая акустического сопротивления создают последовательный резонансный контур, а гибкость барабанной полости и эквивалентная масса воздуха в слуховой трубе – параллельный контур. Особенностью связанной системы является то, что поглощение энергии звука происходит в том же контуре (барабанной перепонки), в который она и вводится. Функция второго контура в этом случае сводится к расширению полосы пропускания уха.

Парциальная частота 1 контура:

$$f_{1п} = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_{\Sigma} C_{\Sigma}}} = 0,8, \text{ кГц}, \quad (3)$$

где $C_{\Sigma} = \frac{C_{\text{экв}} \cdot C_{\text{а.б.пол}}}{C_{\text{экв}} + C_{\text{а.б.пол}}}$, а парциальная частота

2 контура:

$$f_{2п} = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_{\Sigma} C_{\text{а.б.пол}}}} = 2,6, \text{ кГц} - (4)$$

почти в 3 раза больше, чем контура 1.

Определение формантных частот гласных звуков «а» и «у»

Для выявления взаимосвязи формантных частот гласных звуков «а» и «у» мужского и женского голоса с резонансными частотами среднего уха человека было произведено экспериментальное исследование с помощью прикладного пакета Sound Forge. Трехмерные спек-

тры были получены с помощью пакета SpectraLab.

На рис. 3 приведен пример полученных результатов для звука «а» женского голоса.

Усредненные результаты (по 5 измерениям) всех проведенных экспериментов по определению формантных частот гласных звуков «а» и «у» для мужского и женского голоса сведены в табл.1.

Сравнив данные табл.1 со значениями парциальных частот среднего уха можно сделать вывод, что первая парциальная частота близка

по значению с первой формантной частотой звука «а» как для мужского, так и для женского голоса, и со второй формантной частотой звука «у» для мужского голоса.

Таблица 1

Гласные	Частота основного тона, Гц	Формантные частоты, Гц		
		f_1	f_2	f_3
<i>Женский голос</i>				
А	265	780	1050	2710
У	305	285	590	2875
<i>Мужской голос</i>				
А	120	645	1060	2660
У	135	290	720	2520

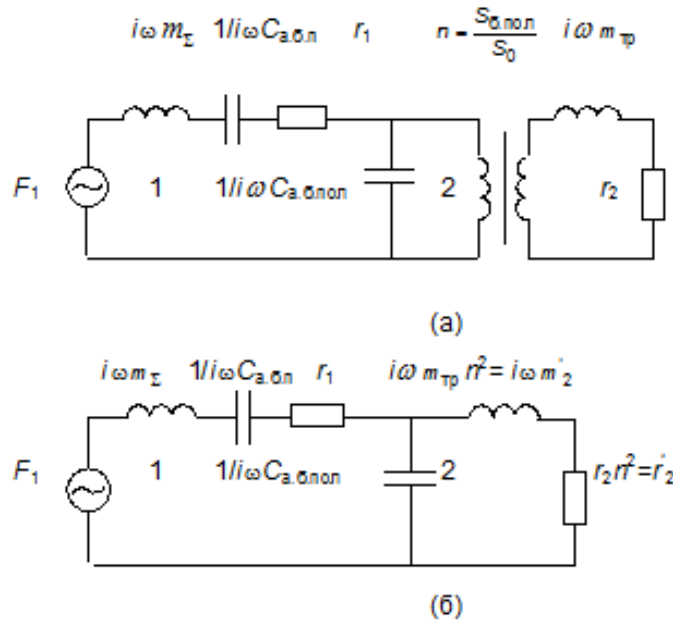


Рис.2. Полная (а) и приведенная (б) схема среднего уха человека

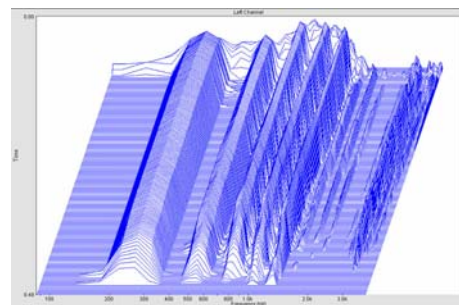
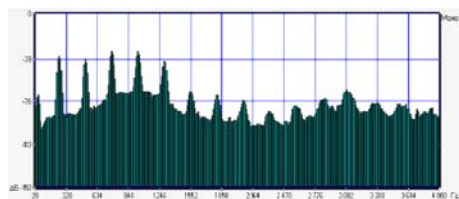
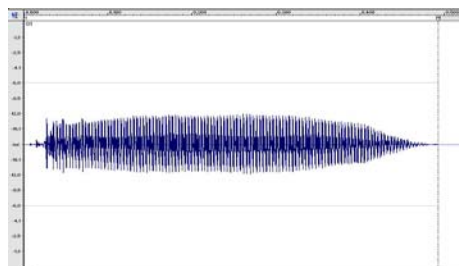


Рис.3.Спектрально-временной анализ звука «а» женского голоса: (а) - сигнал во временной области, (б) – спектр сигнала, (в) – трехмерный спектр

В работе [5] указаны данные тимпанограммы полученной с помощью трехчастотного тимпанометра (226, 660, 1000 Гц). По результатам проведенного исследования резонансная частота среднего уха мужчины равна 700 Гц, а женщины – 1000 Гц.

С учетом этого можно уточнить, что первая парциальная частота близка по значению с первой формантной частотой звука «а» для мужского, и второй - для женского.

Частоты третьей форманты звуков «а» и «у» близки ко второй парциальной частоте среднего уха человека.

Также следует отметить, что частоты третьей форманты звуков «а» и «у» практически равны, и зависимости от пола произносящего не выявлено.

Спектрально-временной анализ сигналов вызванной отоакустической эмиссии

Для выявления взаимосвязи парциальных частот среднего уха человека с резонансными частотами сигналов вызванной отоакустической эмиссии был проведен спектральный анализ сигналов ВОАЭ с помощью программы в пакете MatLAB.

Исследовались сигналы ВОАЭ в ответ на стимул в виде щелчка и тональных посылок с разными частотами.

На рис.4,5 представлены примеры ВОАЭ в ответ на широкополосные щелчки у нормально слышащих испытуемых.

При рассмотрении спектров приведенных сигналов (рис.6,7 соответственно) можно отметить, что частота максимума спектра сигнала ВОАЭ совпадает с частотой максимума спектра стимула и соответствует значению $2f_1П$. На спектре, представленном на рис.5, частота второго максимума соответствует второй парциальной частоте среднего уха человека.

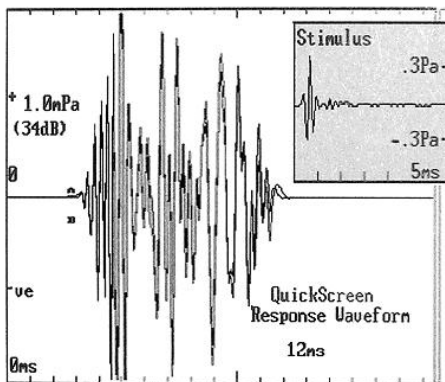


Рис.4. Пример типичной ВОАЭ, полученной здоровым ухом новорожденного в ответ на стимул в форме щелчка, уровень эквивалентного пика которого 84 дБ УЗД (уровня звукового давления) [6]

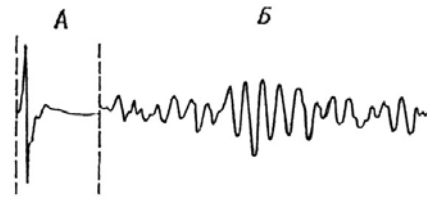
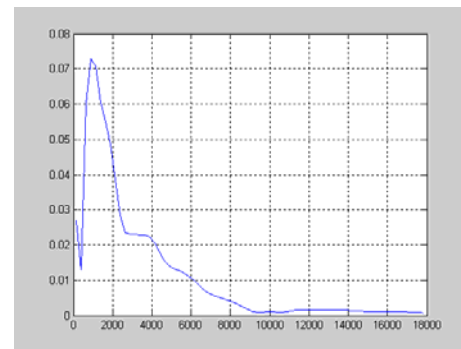
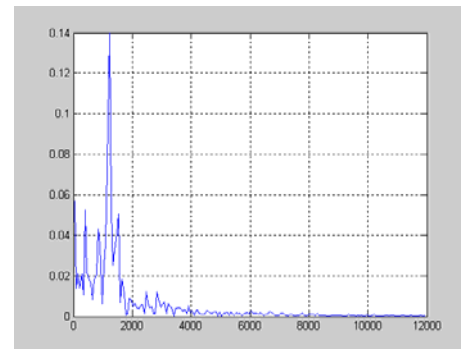


Рис.5. ВОАЭ правого уха нормально слышащего испытуемого 22 лет в ответ на широкополосный щелчок; А – форма щелчка, Б – форма ответа (ответ увеличен по сравнению со стимулом в 32 раза) [7]



(а)



(б)

Рис.6. Спектры: (а) стимула; (б) сигнала ВОАЭ

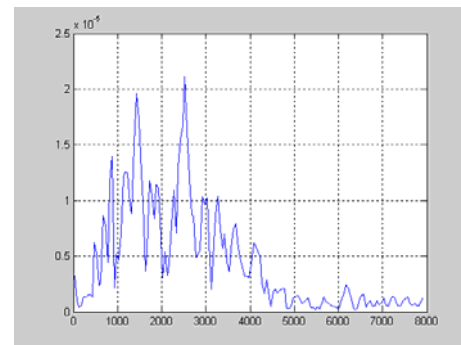


Рис.7. Спектр сигнала ВОАЭ

Также в работе исследовались сигналы ВОАЭ в ответ на тональные посылки уровнем 50 дБ с различной частотой заполнения (рис.8).

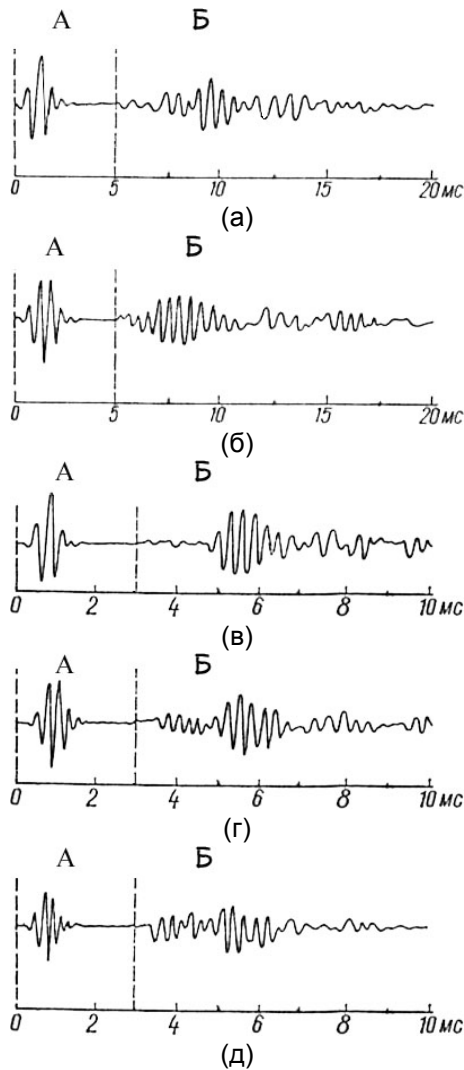
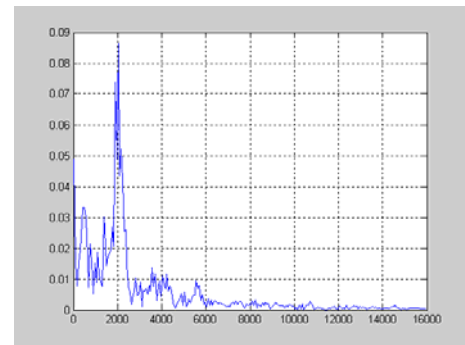
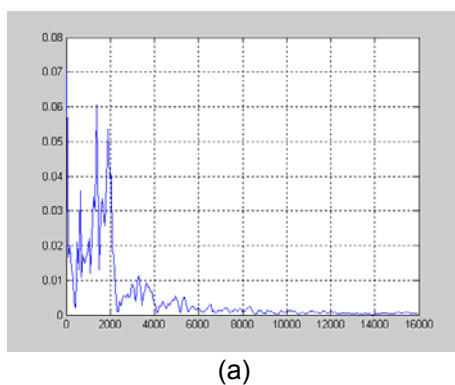
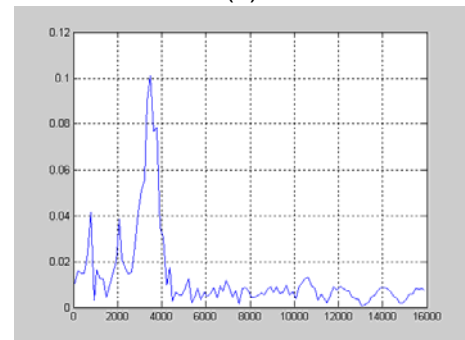


Рис.8. Сигналы ВОАЭ: А - формы стимулов (частота заполнения 1500 Гц (а), 2000 Гц (б), 3000 Гц (в), 4000 Гц (г) и 6000 Гц (д)), Б – формы ответов (ответы увеличены по сравнению со стимулами в 32 раза) [7]

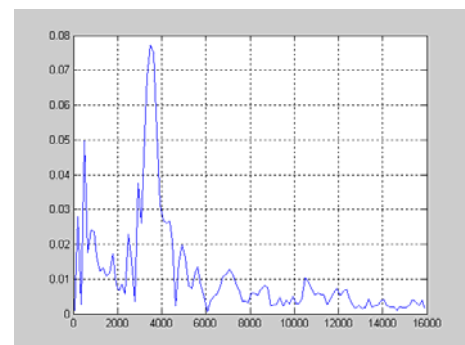
На рис.9 приведены спектры сигналов ВОАЭ в ответ на тональные посылки.



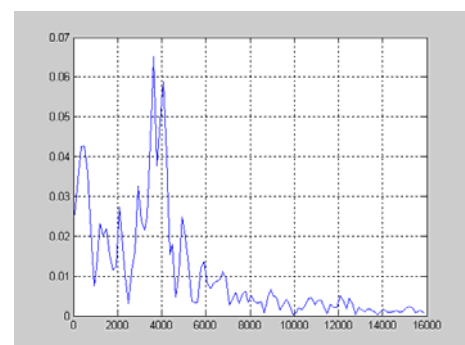
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис.9. Спектры сигналов ВОАЭ в ответ на тональные посылки с частотой заполнения: 1500 Гц (а), 2000 Гц (б), 3000 Гц (в), 4000 Гц (г) и 6000 Гц (д)

Выводы

- В работе было установлено, что:
- Первая парциальная частота среднего уха человека совпадает с частотой первой форманты звука «а» для мужского голоса и частотой второй форманты женского голоса.
 - Частоты третьей форманты гласных «а» и «у» равны. Зависимости от пола произносящего не выявлено. Вторая парциальная частота среднего уха совпадает с частотой третьей форманты как для мужского, так и для женского голоса.
 - Форма сигнала ВОАЭ зависит от вида используемого стимула: широкополосный щелчок или тональная посылка.
 - В случае использования в качестве стимула широкополосного щелчка резонансные частоты сигналов ВОАЭ совпадают с парциальными частотами среднего уха человека.
 - При использовании в качестве стимула тональных посылок с различной частотой заполнения наблюдается следующая закономерность: при частоте заполнения до 2000 Гц резонансная частота сигнала ВОАЭ совпадает с частотой заполнения стимула, при частотах, близких ко второй парциальной частоте среднего уха и выше резонансная частота сигнала эмиссии совпадает со второй парциальной частотой.

Литература

1. *Фант Г.* Акустическая теория речеобразования. – М.: Наука, 1964. – 284 с.
2. *Фланаган Дж.Л.* Анализ, синтез и восприятие речи: Пер. с англ./ Под. ред. А.А. Пирогова. – М.: Связь, 1968. – 394 с.
3. *Найда С.А.* Математическая модель среднего уха человека // *Электроника и связь.* – 2002. – №15. – С.49-50.
4. *Найда С.А.* Формула середнього вуха людини в нормі. Відбивання звуку від барабанної перетинки // *Акустичний вісник.* – 2002. – № 3. – С.46-51.
5. *Найда С.А.* Об акустических резонансах речевого и слухового трактов и их корреляции // *Электроника и связь.* – 2002. – № 16. – С.56-58.
6. *Kemp D.T.* Otoacoustic emissions, their origin in cochlear function, and use// *British Medical Bulletin.* – 2002. – V.63. – P.223-241.
7. *Соколов Ю.К., Базаров В.Г., Лимар Б.Я., Радченко А.И., Цыбулько А.И.* Аудиометрия по вызванной отоакустической эмиссии и перспективы ее использования в диагностике заболеваний преддверно-улиткового органа// *Журнал вушних, носових і горлових хвороб.* – 1990. – № 2. – С.38-45.