**Особенности отображения частотной структуры сигналов в периферическом отделе слухового анализатора в норме и патологии**

Рассмотрены отображения частотной структуры сигналов на выходе модели периферического отдела слуховой системы, включающей в себя механизмы локальной обратной связи по микрофонным и суммационным потенциалам. При нарушении функционирования механизмов обратной связи отображения звуков на выходе модели существенно искажаются и перестают отражать формантную структуру звуков, что ухудшает восприятие. Для восстановления отражения формантной структуры звуков на выходе периферического отдела слуховой системы с нарушенными механизмами обратной связи предлагается выполнять их предварительную реконструкцию, увеличивающую контрастность частотной структуры сигналов.

Нарушение слуховой функции может быть обусловлено не только ухудшением чувствительности рецепторов внутреннего уха, ведущим к увеличению порогов восприятия тональных звуковых сигналов той или иной частоты, но и целым рядом факторов, существенно влияющих на восприятие человеком сигналов, особенно со сложной спектральной структурой.

Функциональное состояние наружных [волосковых клеток](file:///C%3A%5CNOW%5Cdbsearch.html%3Fnot_mid%3D1170023%26words%3D%25E2%25EE%25EB%25EE%25F1%25EA%25EE%25E2%25FB%25F5%20%25EA%25EB%25E5%25F2%25EE%25EA) существенно влияет на характер колебаний базилярной мембраны под действием звукового стимула, причем не только на амплитуду, но и на остроту частотных характеристик соответствующих ее участков [6]. Влияние наружных волосковых клеток проявляется также эффектом компрессии, при котором слабые звуковые колебания усиливаются соответствующими участками колебательной системы внутреннего уха значительно больше, чем сильные. Тем самым обеспечивается восприятие слуховой системой человека расширенного диапазона амплитуд колебаний звуковых сигналов. Соответственно нарушение функционирования наружных волосковых клеток ведет к значительным изменениям в характеристиках колебаний базилярной мембраны, что сказывается в первую очередь на ухудшении ее частотно-селективных свойств, а также на характеристике, описывающей связь амплитуды колебаний участков базилярной мембраны с амплитудой воздействующих на нее звуковых колебаний. Таким образом, колебания базилярной мембраны внутреннего уха оказываются существенно нелинейными, а их характеристики - зависящими как от уровня, так и от структуры действующего звукового сигнала. По существу, колебательная система улитки производит достаточно сложную обработку сигнала и формирует его отображение, которое с помощью внутренних волосковых клеток преобразуется в поток импульсаций в афферентных волокнах слухового нерва. Из сказанного следует, что такие эффекты, как кохлеарный фильтр, двухтоновое подавление, компрессия формируются механизмами внутреннего уха, регулирующими колебания базилярной мембраны, а не процессами в звуковоспринимающем отделе слухового анализатора, как это предполагалось ранее.

Для обсуждения характера нарушений слуховой функции, обусловленных теми или иными отклонениями в функционировании наружных волосковых клеток, необходимо знание механизма их взаимодействия с гидродинамической колебательной системой внутреннего уха. Наиболее наглядно это может быть сделано на основе модели механизмов переработки сигналов, действующих в периферической части слуховой системы.

В работах, проведенных в последние годы, показано, что отображение спектральной структуры сигналов в периферической части слуховой системы складывается под воздействием двух основных комплексов механизмов переработки сигналов, обусловленных структурами внутреннего уха. Основную роль в обеспечении преобразования частота-координата играет линейная гидродинамическая система улитки, свойства которой были описаны еще в работах G. Bekesy [4]. Частотно-селективные свойства отображения сигналов на выходе периферической части слуховой системы формируются в значительной степени за счет комплекса механизмов механо-электрической обратной связи, действующих во внутреннем ухе. При этом было показано, что эти механизмы являются слабозащищенными от повреждающего влияния таких факторов, как [гипоксия](file:///C%3A%5CNOW%5Cdbsearch.html%3Fnot_mid%3D1170023%26words%3D%25E3%25E8%25EF%25EE%25EA%25F1%25E8%25FF), ототоксические и наркотические вещества, громкие звуки, механические травмы [5]. Предполагается, что именно структуры внутреннего уха, обусловливающие обратные связи, а таковыми являются наружные волосковые клетки, обеспечивают высокие частотно-селективные свойства слуховой системы, а также ее способность адаптироваться к различным условиям окружающей среды. Кроме того, функционирование механизмов обратной связи зависит от структуры действующего звукового сигнала [3]. Следует также различать глобальные и локальные обратные связи во внутреннем ухе, в зависимости от цели построения данной модели [3].

В данной работе рассматривается влияние на отображение частотной структуры сигналов на выходе модели периферической части слуховой системы нелинейной локальной обратной связи по микрофонным и суммационным потенциалам, описанной в работах Л.Н. Бабкиной и соавт. [1, 2]. Было показано [1], что рассматриваемая модель позволяет объяснить принцип формирования остроселективной реакции колебательной системы внутреннего уха на тональный стимул. Были определены значения постоянных коэффициентов, входящих в модель, при которых амплитудно-частотные характеристики базилярной мембраны оказываются близкими к частотнопороговым кривым волокон слухового нерва и к соответствующим характеристикам внутрирецепторных потенциалов внутренних волосковых клеток. Используя полученную модель, были построены ее отклики на сигналы со сложной частотной структурой [2]. При этом степень нарушений в функционировании механизмов внутреннего уха, формирующих частотноселективные свойства периферической части слуховой системы, в модели характеризуется значением коэффициента "К1" (см. работу [2]). Значению К1=0 соответствует полное отсутствие обратной связи, т.е. полное нарушение функционирования наружных волосковых клеток. Нормальному состоянию системы обратной связи соответствует значение К1=0,7. Промежуточные значения К1 моделируют частичное нарушение действия механизмов, обусловливающих локальные обратные связи во внутреннем ухе. Приведенные на рис. 1-3 отображения звуков показывают, что колебательная система внутреннего уха обеспечивает автоматическое выделение для передачи по афферентным путям в высшие отделы нервной системы наиболее информативно значимых участков отображения, а именно местоположения формантных частот. Все остальные участки отображения оказываются заторможенными (рис. [1,б](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picone), [2,б](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#pictwo), [3,б](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picthree)).

Если функционирование наружных волосковых клеток нарушается, т.е. обратная связь существенно ослабляется, то отображение претерпевает кардинальное изменение. Легко видеть, что формантная структура звуков уже не выделяется. Зоны торможения исчезают (рис. [1,в](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picone); [3,в](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picthree)). Соответственно различение звуков будет ухудшено. Особенно резкое ухудшение различения звуков будет наблюдаться при наличии помех. Приведенные выше результаты показывают, что ухудшение функционирования механизмов обратной связи в периферическом отделе слуховой системы может приводить к существенному ухудшению отображения частотной структуры сигналов на выходе периферического отдела слуховой системы. При этом нарушается восприятие формантной структуры звуков речи и соответственно нарушается разборчивость ее восприятия. Выделение в колебательной системе внутреннего уха тех компонент сигнала, которые являются наиболее информативными, и одновременное подавление колебаний, вызванных действием менее важных компонент звуков, приводит к существенному сокращению общего потока импульсаций, поступающих по афферентным путям в высшие отделы нервной системы. И наоборот, отсутствие такого механизма ведет к возрастанию потока импульсаций, поступающих в высшие отделы нервной системы от неинформативных участков отображения. Это может являться причиной появления сильного шума в ушах, что характерно для многих пациентов, страдающих [сенсоневральной тугоухостью](file:///C%3A%5CNOW%5Cdbsearch.html%3Fnot_mid%3D1170023%26words%3D%25F1%25E5%25ED%25F1%25EE%25ED%25E5%25E2%25F0%25E0%25EB%25FC%25ED%25EE%25E9%20%25F2%25F3%25E3%25EE%25F3%25F5%25EE%25F1%25F2%25FC%25FE).

Рассмотрение отображений спектральной структуры звуков речи в норме (при действии механизмов обратной связи) и при патологии (при отсутствии этих механизмов) позволяет предложить метод, который может быть использован для улучшения восприятия звуков речи пациентами с сенсоневральной тугоухостью. Для улучшения отображения частотной структуры звуков на выходе периферического отдела слуховой системы необходимо с помощью предварительной обработки сигналов увеличить контрастность их частотной структуры с подчеркиванием наиболее информативно значимых частотных составляющих их спектров. Пример такой реконструкции сигнала приведен на рис. [1](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picone) и [2](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#pictwo). Из [рис. 1](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picone) видно, что при существенном ослаблении обратной связи отображение звука "а" на выходе данной модели периферического отдела слуха перестает отражать его формантную структуру ([рис. 1,в](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#picone)). В то же время, если в процессе обработки звука "а" он будет заменен двумя составляющими, частоты которых соответствуют его формантным частотам, то отображение реконструированного звука будет описывать формантную структуру исходного звука даже при существенном ослаблении обратной связи ([рис. 2,в](file:///C%3A%5CNOW%5Cref%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%BA%D0%B0msg.html%3Fmid%3D1170023%26uri%3Dindex.html#pictwo)).

Из вышесказанного следует, что текущее повышение контрастности частотной структуры звуков может быть использовано для улучшения восприятия их пациентами с сенсоневральной тугоухостью. Такая текущая реконструкция сигналов оказывается возможной с появлением нового поколения сигнальных процессоров, сочетающих в себе экономичность, высокую производительность, малые габариты и низкую стоимость при массовом производстве.

**Список литературы**

1. Бабкина Л.Н., Лопотко А.И., Молчанов А.П. Биофизика. М: РАН 1996; 41: 2: 471-478.

2. Бабкина Л.Н., Лопотко А.И., Молчанов А.П. Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologia Respiratoriae. St. Petersburg 1996; 4: 33-40.

3. Babkina L.N., Dombrovsky R.V., Molchanov A.P. Preprint of the report presented at the 103 rd Convention of AES. New York 1997.

4. Bekesy G. Experiments in hearing. New York, Toronto, London 1960.

5. Evans E.P. AES Proceedings of the 12 international conference. Copenhagen, Denmark 1993; 11-21.

6. Moore B.J. Echos. The newsletter of the Acoustical Society of America 1998; 8: 1-8.

**7.** Л.Н. БАБКИНА, А.П. МОЛЧАНОВ. Особенности отображения частотной структуры сигналов в периферическом отделе слухового анализатора в норме и патологии

Для подготовки данной работы были использованы материалы с сайта<http://www.nature.ru/>