

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Значительные успехи медицины в области протезирования и выявления причин тех или иных функциональных отклонений непосредственно связаны с получением адекватных моделей физиологических явлений и происходящих нелинейных процессов в организме человека. Разработка моделей сенсорных систем представляет значительный научный и практический интерес в области прикладной медицины, биологического моделирования, биокибернетики, создания систем искусственного интеллекта и других современных направлений естествознания. Такие электрические модели с успехом могут быть применимы для создания научно-исследовательских и экспертных систем в лечебных центрах и отделениях посттравматической реабилитации больных с нарушением слуха. Существующие модели системы слухового восприятия рассматривают лишь процесс принятия и усиления звуковых колебаний, не учитывая при этом дальнейшую обработку сигнала и преобразование его в электрический. Можно утверждать, что существующие модели уха представляют собой лишь схемы, выполняющие функции слухового аппарата, что не отвечает полной достоверности процесса слухового восприятия.

Целью настоящей работы является моделирование процесса слухового восприятия на основе нелинейно-параметрической системы.

Как известно, слуховой тракт разбит на три составляющие: наружное, среднее и внутреннее ухо. Звуковые колебания от внешнего источника попадают в ушную раковину наружного уха. Вследствие специфической формы ушной раковины звуковые волны по-разному дифрагируют. Это приводит к различному изменению спектрального состава звуковых колебаний, попадающих в слуховой проход. Звуковая волна проходит через слуховой проход и приводит в движение барабанную перепонку среднего уха, частично отражаясь от нее. Барабанная перепонка перемещает последовательно соединенные между собой косточки среднего уха. Косточки осуществляют передачу механических колебаний от воздушной среды наружного уха к жидкой среде внутреннего. Среднее ухо согласует волновое сопротивление воздуха и жидкости внутреннего уха, т.е. способствует передаче большей интенсивности звука (эффект усиления порядка 28 дБ). Внутренняя косточка – стремечко – упирается в овальное окошко – отверстие в основании так называемой улитки. Улитка выполняет функцию преобразователя механических колебаний в электрические.

Улитка представляет собой спираль, вдоль которой проходят три канала. Два канала разделены базилярной мембраной. На ней находится кортиева орган, содержащий рецепторные (волосковые) клетки. Колебания овального окошка, располагаемого на входе улитки, передаются жидкости, заполняющей канал, прилегающий к базилярной мембране. Волоски кортиева органа отклоняются и волосковые клетки генерируют электрический сигнал. Далее этот сигнал по слуховому нерву передается в мозг: через два синаптических переключения сигнал попадает в первичную слуховую кору головного мозга. В дальнейшем за избирательность восприятия слуховой информации будет отвечать реакция мозга.

Для моделирования процесса слухового восприятия были использованы некоторые актуальные аспекты теории Бекеша [1], суть которой заключается в том, что при передаче колебаний основанию улитки, вызванных звуком определенной частоты, колебания с максимальной амплитудой возбуждятся только при равенстве резонансной частоты и частоты возбуждения улитки. Сложный акустический сигнал, состоящий из различных синусоидальных колебаний разной частоты, с различными фазами этих частотных составляющих, воздействуя на основание улитки, влечет появление сложного пространственного распределения вынужденных колебаний базилярной мембраны. Колебания высокой частоты локализируются вблизи основания улитки, а низкочастотные колебания – у вершины. Колебания волосков приводят к генерации в волосковых клетках сигналов, передаваемых в волокна слухового нерва. Передаваемый сигнал несет информацию об амплитудах и фазах колебаний базилярной мембраны в различные моменты времени и в различных точках мембраны.

Разработанная модель имеет косвенную аналогию и достаточно достоверно отображает процесс слухового восприятия. Представленная на рис. 1 схема моделирует функции слухового канала без учета бинаурального эффекта (определение направления на источник звука).

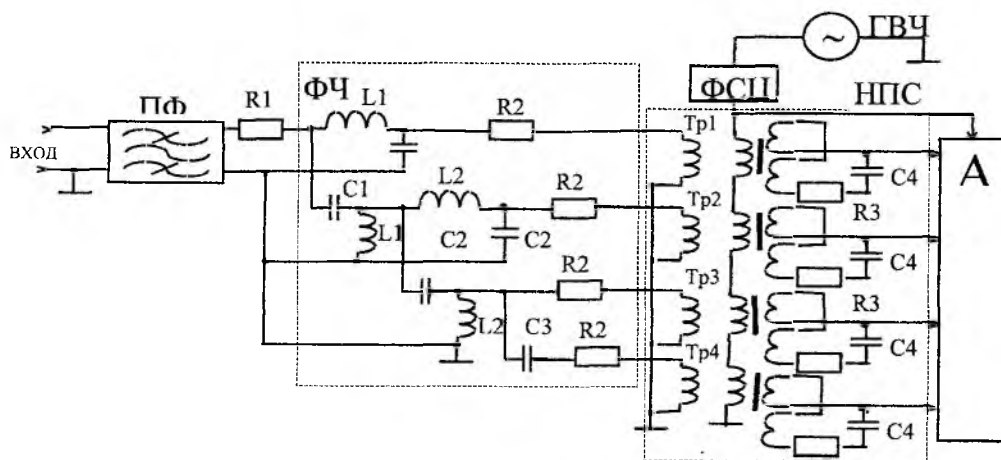


Рис. 1

Моделирующая система может быть представлена в следующем виде (рис. 1), где обозначены: ПФ – входной полосовой фильтр; R1 – аттенуатор входной цепи; ФЧС – фильтры частотной селекции каналов; ГВЧ – генератор сигнала частоты 100 кГц; ФСЦ – фазосдвигающая цепь; НПС – индуктивные нелинейно-параметрические системы; А – анализатор. Для ограничения частоты работы схемы в диапазоне слухового восприятия человеческого уха на входе предусмотрен многозвеньевой LC-полосовой фильтр (ПФ), состоящий из параллельных и последовательных колебательных контуров. Введением активных сопротивлений снижается добротность последовательно резонансным контурам ПФ, что вызывает расширение частотной полосы пропускания фильтра (сглаживает боковые полосы по низкой частоте (НЧ) до уровня 100-120 Гц, по высокой частоте (ВЧ) до 16-17 кГц).

Известно, что, если сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте максимально, то для последовательного – минимально. При входном сигнале, частота которого равна резонансной, реактивное сопротивление последовательного контура резко возрастает, что сглаживает пик характеристики резонансной кривой фильтра. Для сигналов, частота которых будет ниже или выше полосы звуковых частот (диапазона слышимости человеческого уха), входное сопротивление схемы будет практически равно активному сопротивлению провода катушки индуктивности ПФ, и колебания таких частот будут шунтироваться. Прохождение постоянной составляющей входных сигналов ограничивается конденсатором последовательного резонансного контура фильтра. В качестве аттенуатора амплитуды входного сигнала выступает сопротивление резистора R1.

Таким образом, входной канал схемы производит частотную избирательность входных колебаний на уровне порога слышимости звукового восприятия уха и моделирует функции барабанной перепонки и среднего уха.

Далее, аналогично выполняемым функциям кортиева органа базилярной мембраны улитки, производится частотная селекция сигнала по четырем частотным диапазонам. Происходит разделение сложного входного электрического сигнала на колебания различных частот соответственно по четырем каналам: канал НЧ, канал первой средней частоты (СЧ), канал второй СЧ и канал ВЧ колебаний. Для этого входной сигнал попадает на два параллельных фильтра: фильтр НЧ и фильтр высших частот на элементах L1C1. Низкочастотная составляющая отфильтровывается на уровне 1 кГц и поступает через аттенуатор R2 на управляющую обмотку трансформатора Тр1 индуктивного параметрического устройства (ИПУ). Через фильтр высших частот электрический сигнал с частотами выше 1 кГц поступает на два параллельных фильтра на элементах L2C2. Один из них представляет собой фильтр, пропускающий сигналы с частотой до 7 кГц; другой – фильтр второй СЧ и ВЧ. С выхода этого фильтра ВЧ сигналы частотой выше 14 кГц проходят через конденсатор малой емкости C3, так как для них сопротивление прохождению в этом случае будет меньшим. Таким образом выделяются сигналы с колебаниями второй СЧ и ВЧ, верхняя частотная граница которых будет ограничиваться полосой пропускания входного полосового фильтра.

Четыре ИПУ, собранные соответственно на трансформаторах Тр1 - Тр4, выполненных на одинаковых сердечниках, имеют по три обмотки: обмотку управления, накачки и резонансную, причем, обмотки накачки и управления во всех трансформаторах содержат одинаковое количество витков, а резонансные - разное (Тр 1 самое большое количество витков, Тр 4 – самое меньшее и Тр 2 – соответ-

венно имеет больше витков резонансной обмотки, чем Тр 3). Каждая резонансная обмотка совместно с конденсатором С4 образует нелинейный колебательный контур. ИПУ питаются (накачиваются) через управляемую фазосдвигающую цепочку (ФСЦ) генератором синусоидального напряжения (ГВЧ), частота колебаний которого равна 100 кГц. ФСЦ, построенная на основе трех СL-звеньев с регулируемой емкостью, позволяет изменять фазу выходных колебаний генератора от 0° до 180°. Частота накачки будет лежать значительно выше верхней частотной области работы схемы, что дает возможность возбуждения модулируемых параметрических колебаний в ИПУ. Это аналогично характеру процесса преобразования электрических сигналов, проходящих по нервным окончаниям.

Обмотки управления обладают значительной добротностью по отношению к входному воздействию в рабочей полосе частот. Для исключения самовозбуждения (генерации) ИПУ в резонансные контуры последовательно включены сопротивления. Введение потерь приводит к тому, что при отсутствии сигнала на обмотке управления переводит ИПУ в режим "срыва" колебаний. При наличии управляющих сигналов с фазой, совпадающей с фазой накачки на входе ИПУ, в резонансном контуре возникают параметрические колебания. Таким образом моделируется функция слухового нерва.

Далее сигналы с выходов четырех ИПУ поступают на анализатор (А), который производит визуализацию и анализ характеристик входных колебаний, что является своего рода аналогом функции мозга.

Принцип действия моделирующей схемы заключается в следующем. Из полного электрического сигнала, содержащего различные синусоидальные колебания разной частоты, с различными фазами этих частотных составляющих, поступающих от внешнего источника, на полосовом фильтре выделяется сложный многочастотный сигнал с колебаниями в диапазоне от 100 Гц до 17 кГц. Затем этот сигнал поступает на каскад фильтров, где производится его селекция по четырем частотным каналам. Сигналы с каждого канала поступают на управляющие обмотки соответствующих нелинейно-параметрических систем – ИПУ, питание которых осуществляется через ФСЦ посредством внешнего генератора накачки. При условии достаточной амплитуды входного сигнала, совпадения его фазы с фазой накачки в соответствующем ИПУ возбуждятся колебания, амплитуда которых будет пропорциональна амплитуде входного сигнала. Разность витков резонансных обмоток приводит к разной величине индуктивности в соответствующих колебательных контурах, что вызывает возбуждение различных ИПУ на гармониках колебаний накачки. Величина индуктивности контуров подобрана таким образом, что частота возбуждения ИПУ, собранного на Тр 4, равна 100 кГц; частота возбуждения ИПУ, собранного на Тр 3, соответствует второй гармонике сигнала накачки; для ИПУ на Тр 2 и Тр1 – третьей и четвертой соответственно. Таким образом, на выходе различных ИПУ будут колебания различных частот.

Это связано с тем, что по обмотке накачки протекает ток, который периодически насыщает сердечники трансформаторов ИПУ и модулирует индуктивность в нелинейно-параметрической системе. Величина тока накачки определяет глубину модуляции индуктивности, которая изменяется с удвоенной частотой напряжения накачки. Внесение энергии от генератора накачки в различные ИПУ будет производиться каждый второй, третий и четвертый период собственных колебаний системы соответственно. Величина последовательного сопротивления в резонансном контуре подобрана так, чтобы без наличия входного сигнала (сигнала на обмотке управления) потери в системе были несколько больше количества энергии, передаваемой по цепи накачки, что переводит систему в устойчивый режим - отсутствие колебаний. При наличии входного сигнала с фазой, равной фазе питающего напряжения или отличной на 180°, в систему передается дополнительная энергия. Прирост энергии приведет к возникновению в контуре возрастающих параметрических колебаний, амплитуда которых будет ограничиваться нелинейностью системы. Следовательно, на выходе ИПУ будут колебания, промодулированные входным сигналом звукового диапазона, с амплитудой, пропорциональной величине входного сигнала.

В анализаторе происходит анализ частотных и амплитудных характеристик колебаний в ИПУ, сравнение фазы выходных колебаний относительно фазы опорных колебаний генератора накачки. По возбуждению ИПУ в любом канале можно судить о частоте подаваемого на вход схемы сигнала. Амплитуда колебаний в ИПУ будет зависеть от интенсивности воздействия на вход модели. При наличии на входе схемы полного электрического сигнала (сигнала, состоящего из различных синусоидальных колебаний разной частоты, с различными фазами частотных составляющих) вычленение определенного многочастотного сигнала (сигнала от одного источника) заключается в настройке с помощью ФСЦ фазы питающего напряжения ИПУ относительно фазы сигнала интересующего источника. Сиг-

налы от других источников не приведут к возбуждению ИПУ, так как их колебания не будут выгодны в энергетическом отношении.

Представленная модель на основе нелинейно-параметрических систем позволяет исследовать процесс слухового восприятия человека и моделирует функции восприятия звуковых колебаний от наружного уха до первичной слуховой коры головного мозга. С помощью моделирующей схемы удастся оценить амплитуду, частотный диапазон и фазу возбуждающего воздействия, то есть, в случае слухового восприятия – "идентифицировать" и "определить расстояние до источника звука". Использование двух аналогичных параллельных схем позволяет учитывать бинауральный эффект. При этом сдвиг фазы сигнала воздействия на входах модели позволяет определить "направление на источник звука". Реализации информационного канала слухового тракта и разработанной модели различны, несомненным является общий нелинейный характер взаимодействий в этих системах.

Построенная электрическая модель может быть применима для создания научно-исследовательских и экспертных систем в лечебных центрах и отделениях посттравматической реабилитации больных с нарушением слуха. Перспективным направлением использования модели является также разработка различных устройств звукового контроля и регистрации источников звука.

Список литературы: 1. Ремизов В.М. Медицинская и биологическая физика. М.: Наука, 1988. 584 с.

*Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники*

** Поступила в редколлегию: 30.10.2000*