

В.Н. Журавлёв, И.В. Жуковицкий

**ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПРИЕМНИКА РЕЧЕВЫХ
СООБЩЕНИЙ**

Аннотация. Рассматривается задача, суть которой состоит в раскрытии и анализе импульсного процесса психофизиологического анализа речевых сигналов. Разработан метод анализа связи управляющих параметров центральной нервной системы с физиологическими органами рецептора слуха.

Ключевые слова: Импульсный речеслуховой процесс, синергетика, импульсная модель рецептора слуха.

Ведение. Постановка задачи.

Настоящая статья является продолжением публикации [1], в которой рассматривается дискретная модель речевого источника сообщений. Слуховая система является приемником информации звуковых сигналов, как первой, так и второй сигнальных систем, т.е. формы и информационного содержания звуков речи. Наиболее доступны и хорошо изучены [2,3] физиологические органы и процессы обработки звуковых сигналов в периферической части слуховой системы, которая, в соответствии с современными теориями, выполняет функции:

– двух разнесенных акустических антенн (наружное ухо), которые принимают, локализируют и субъективно частотно-избирательно усиливают речевые сигналы (РС);

– амплитудно-адаптивного акустомеханического усилителя (среднее ухо), который, под управлением центральной нервной системы (ЦНС) нелинейно изменяет свой субъективный комплексный коэффициент $\dot{k}^{su}(\omega, t)$ передачи;

– психофизиологического анализатора параметров речевых сигналов (РС) и механико-электрического преобразователя (внутреннее ухо), который осуществляет идентификацию информационных

признаков РС, преобразует их в дискретные двоичные электрические импульсы центральной нервной системы (ЦНС).

Информационному анализу природного слухового процесса посвящено большое количество публикаций о научных исследованиях [2,3] и монографий [4 – 6], что свидетельствует о незавершенности современных теорий речеобразования и слуха [7].

Современная теория идентификации РС основана на методах спектрального анализа идентификации амплитуды гармонических составляющих сложного звука. Какого-либо экспериментального доказательства и формализованного представления данная теория не имеет, она не поясняет процессы: восприятия высоты тона и громкости РС а также аналого-цифрового преобразования параметров РС в двоичные импульсы нейронов рецептора слуха. Можно отметить, что управляющие функции ЦНС в слуховом процессе исследованы не достаточно полно [10].

Целью исследований настоящей статьи является решение задачи, суть которой состоит в раскрытии и анализе противоречия дискретного характера психофизиологической информационной самоорганизации природного слухового процесса и спектральными методами его анализа, базирующимися на гипотезе о локальном постоянстве параметров речевого тракта.

Основы синергетической методологии синтеза и анализа РС изложены в работах [11,12], однако в них не раскрыт метод восприятия высоты тона и громкости РС, не раскрыты процессы аналого-цифрового преобразования речевых сигналов в дискретные импульсы центральной нервной системы, а также связь скорости передачи речевой информации в канале связи с быстродействием слуховых нейронов.

Основная часть

На основании анализа [2–6] и выводов работы по исследованию слуховой системы [7] психофизиологический комплекс органов наружного и среднего уха можно представить как подсистему, управляемую ЦНС по коэффициенту передачи скорости изменения звукового давления РС. Линейность системы для первой производной сохраняется в частотном диапазоне $\Delta\Omega \approx (0 - 4000)\text{Гц}$. Слуховой рецептор внутреннего уха управляется ЦНС сигналом отоакустической эмиссии (ОАЭ) [13]. Последний поступает с задержкой $\approx 10\text{ms}$, управ-

ляет внешними волосковыми клетками (ВНК) и представляет собой внутренний (для системы рецептор–ЦНС) образ идентифицируемого РС. Данный процесс можно представить как оптимальный (корреляционный) прием временной функции РС.

Формулировка гипотезы. Принято считать [5], что процессы синтеза и анализа речевого сигнала осуществляются центральной нервной системой человека дискретно двоичными импульсными сигналами нейронов. В настоящее время доказано [14,15], что функционирование эволюционирующих природных биологических объектов определяется нелинейными стохастическими пространственно-временными диссипативными процессами открытых систем. Информационное и энергетическое взаимодействие исследуемых процессов целесообразно анализировать, беря в основу методологию синергетики и открытых систем [14] которая позволяет сформулировать гипотезу слухового импульсного процесса энергоинформационного обмена информационных подсистем объекта исследований.

Синергетический энергоинформационный процесс психофизиологической самоорганизации слуховой подсистемы, осуществляющей анализ энергии $\Delta E[s(t, \Delta t)]$ и энтропии $\Delta H[s(t, \Delta t)]$ сигнала фонемы $s(t, \Delta t)$ на интервале времени Tp , состоит из двух, параллельных во времени, дополняющих друг друга, компонент:

энергетической, которая осуществляет анализ эффективной

$$E_{eff}(t) = f^E[s(t)], t \in [Tp] \quad (1)$$

и дифференциальной

$$\Delta E(t, \Delta t) = f^{\Delta E}[s(t, \Delta t)], t \in [\Delta t] \in [Tp] \quad (2)$$

энергии РС;

информационной, которая осуществляет анализа энтропии $\Delta H(t, \Delta t)$ – информационных интервалов времени Δt между соседними сигналами речевой подсистемы диктора

$$\Delta H(t, \Delta t) = f^H[s(t, \Delta t)]. \quad (3)$$

Энергетический процесс осуществляется физиологическими органами среднего и внутреннего уха. Системообразующим фактором процесса маскировки слуха среднего уха является факт стабилизации, осредненной на интервале времени Δt^{su} , энергии

$$E(t) = const, t \in [\Delta t^{su}] \in [Tp] \quad (4)$$

сигнала фонемы по функции эффективной энергии $E_{eff}[\xi(t)]$ сигналов внешних помех.

Системообразующей функцией рецептора слуха улитки внутреннего уха будет процесс идентификации приращений энергии диссипации сигнала турбулизации.

Информационный процесс анализа энтропии $\Delta H(t, \Delta t) = f^H[s(t, \Delta t)]$ сигнала фонемы $s(t, \Delta t)$ происходит в основной мембране улитки внутреннего уха под управлением ЦНС. Системообразующим фактором информационного процесса будет факт полного снятия энтропии с информации $I[s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)]$ сигнала обратной связи самоорганизации $s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)$ аллофона принимаемой фонемы

$$I[s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] = -\sum_j \Delta H_i(t, \Delta t_j), \quad (6)$$

который синтезирует ЦНС на основании предыдущего опыта успешной реализации её приема.

Системообразующим фактором слуховой подсистемы будет факт успешной идентификации сигнала фонемы $s_i(t, \Delta t)$, который включает в себя факт реализации энергетической функции адаптации среднего уха и равенства нулю разницы мгновенной скорости $\Delta c^H(t, \Delta t) = 0$, либо единице условной энтропии $H[s_i(t, \Delta t) / s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] = 1$ и энергии $\Delta E[s_i(t, \Delta t) / s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] = 1$ принимаемого сигнала $s_i(t, \Delta t)$ по сигналу обратной связи самоорганизации $s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)$.

$$\begin{aligned} E_{eff}(t) &= const, \\ I[s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] &= \sum_j \Delta H_i(t, \Delta t_j), \\ \Delta c^H(t, \Delta t) &= 0, \\ H[s_i(t, \Delta t) / s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] &= 1, \\ \Delta E[s_i(t, \Delta t) / s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)] &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Системообразующая функция слуховой подсистемы должна отображать последовательность психофизиологического процесса самоорганизации, осуществляющего анализ сигнала $s_i(t, \Delta t)$ в части снятия энтропии $\Delta H[s_{i-1}^{occ}(t, \Delta t)]$ с сигнала обратной связи ЦНС:

С учетом обобщения вышеизложенного, на основе синергетического подхода к анализу открытых систем, импульсную модель слуховую подсистему можно представить в виде следующей функциональной схемы (рис. 1).

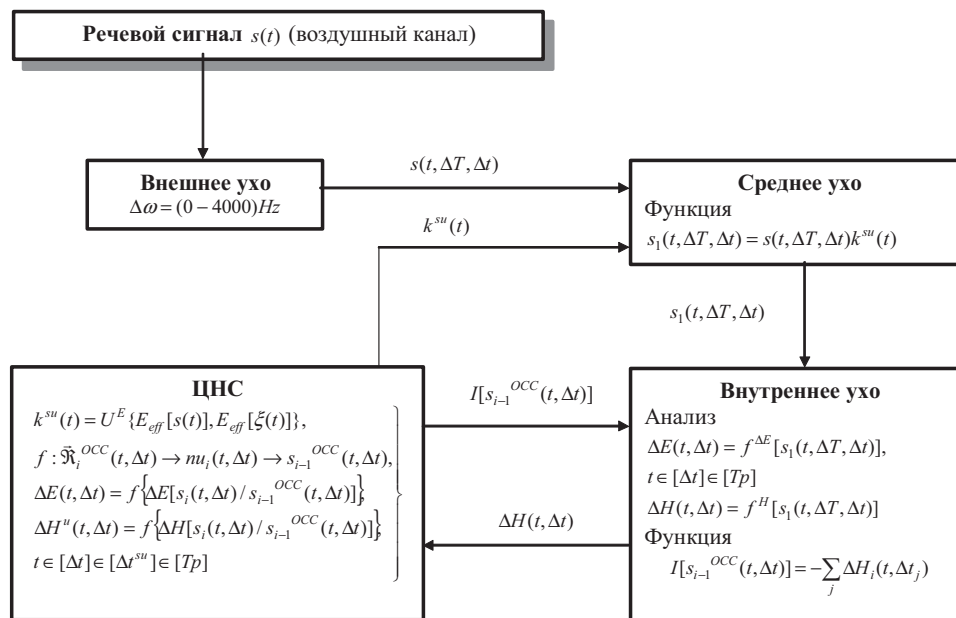


Рисунок 1 - Информационная психофизиологическая функциональная модель слуховой системы

Анализ модели слуховой системы

Проведем структурно – функциональный анализ гипотезы процесса самоорганизации системы слуха с позиции идентификации параметров сигналов турбулизации физиологическими органами слуха.

Энергетический анализ канала связи диктор – слуховой рецептор аудитора. На данном этапе не будем учитывать влияние помех канала связи, т.к. считаем, что анализ этого процесса является отдельной научно-технической задачей.

Кинетическая энергия РС $\Delta E_k(t, \Delta t)$ в канале связи определяется

выражением $\Delta E_k(t, \Delta t) = \frac{m(t, \Delta t)\vec{c}_0^2}{2}$, где $m(t, \Delta t)$ – масса воздуха,

пропорциональная звуковому давлению $P(t) = s(t)$, \vec{c}_0 – вектор скорости звука в канале связи. Часть энергии РС $\Delta E_{ku}(t, \Delta t)$, принятая мембраной среднего уха, перемещает механическую систему «косточки среднего уха – перилимфа внутреннего уха» с постоянной массой m_u . Пренебрегая на данном этапе потерями энергии в системе слуха, применяя закон сохранения энергии можно записать

$\frac{m(t, \Delta t) \bar{c}_0^2}{2} = \frac{m_u \bar{v}_s^2(t)}{2}$, где $\bar{v}_s^2(t)$ – квадрат вектора скорости перемещения перилимфы, пропорциональный информационному изменению звукового давления РС $\bar{v}_s^2(t) = f[s(t)]$. В результате приема РС масса m_u механической системы физиологических органов приобретает вектор момента количества движения $\bar{M}(t) = m_u \bar{v}_s(t)$. Образующая основной мембраны улитки может быть представлена логарифмической спиралью. Попадая овальное окно улитки момент количества движения $\bar{M}(t)$ воздействует под некоторым углом на мембрану Рейснера и раскладывается на нормальную и тангенциальную составляющие. Энергия нормальной составляющей возбуждает колебания базилярной мембраны, тангенциальная составляющая проходит дальше по внутреннему волноводу тела улитки, теряя свою энергию по закону логарифма. Этим процессом обеспечивается механизм чувствительности слуха к логарифму звукового давления, подтверждая закон Вебера-Фехнера [4]. Улитковый ход, суживаясь перпендикулярно образующей, по мере удаления от овального окна, расширяется по оси улитки, обеспечивая постоянство площади поперечного сечения и, тем самым, постоянство информационной скорости движения перилимфы по образующей мембраны Рейснера.

Гипотеза процесса идентификации информационных интервалов времени. В рецепторе улитки внутреннего уха выполняется анализ функции квадрата скорости движения перилимфы. В результате анализа должны идентифицироваться интервалы времени Δt_i между изменениями знака вектора скорости $\bar{v}_s^2(t)$. На данном этапе необходимо акцентировать внимание на фактах:

- складки на завитках основной мембраны улитки образуют «лестницу», которая инициирует пульсации скорости и предпосылки к синтезу процесса турбулизации при достижении скорости критического значения, определяемого числом Рейнольдса для перилимфы;

- завихрений перилимфы, наблюдаемых Бекеша [2] на участках основной мембраны при идентификации энергии входного сигнала улитки.

Выделим участок основной мембраны протяженностью $\Delta x_i \rightarrow 0$, содержащий один ряд ВНК и соответствующую ему ВВК,

которой соответствует субъективное значение скорости $\bar{v}_s^2(t)$ энергии $\Delta E_i(t, \Delta t)$ (11). В начальный момент времени t_0 (отсутствие РС $s(t)$) внутренние физиологические органы перегородки улитки флуктуируют под действием внутренних шумов $\xi^{ЦНС}(t)$ организма, которые не имеют информационной составляющей. Воздействие момента импульса движения $\bar{M}(t)$ РС вызывает процесс начала генерации вынужденных колебаний базилярной мембраны, которая выполняет функции генератора сигнала стохастической синхронизации процесса адаптации слуховой системы аудитора. Колебания мембраны уменьшают поперечное сечение улиткового хода, при этом на участке Δx_i в момент изменения знака скорости течения перилимфы, формируются условия синтеза процесса турбулизации её потока. Этот процесс увеличивает вязкость перилимфы на участке Δx_i и позволяет идентифицировать место на образующей покровной мембраны Δx_i , соответствующее энергии РС. Точка Δx_i фиксируется i – ой ВВК и передается в ЦНС.

ЦНС в течение интервала времени $\approx 10ms$ анализирует энергию и фазовые переходы функции скорости, выбирает из базы данных подходящий аллофон принимаемой фонемы и направляет его образ в цепь обратной связи самоорганизации – ВВК покровной мембраны. Основываясь на результатах исследований эффекта ОАЭ [13], в которых определено увеличение акустического импеданса внутреннего уха во время действия сигнала ОАЭ, можно предположить, что каждая из L ВВК выполняют функцию нуля – органа в информационной цепи обратной связи самоорганизации «слуховой рецептор – ЦНС». ЦНС анализирует значения параметров дифференциальной энергии $\Delta E(t, \Delta t)$ и интервала времени Δt_i её изменения. Энергия РС идентифицируется дискретно, количество её уровней соответствует количеству ВВК, максимум шкалы энергии расположен в начале улитки, возле овального окна, минимум возле вершины.

Амплитуды колебаний физиологических органов слухового рецептора и линейность преобразований всех сигналов ограничена динамическим диапазоном линейности слуховой системы. При изменении энергии сигнала $\Delta E(t, \Delta t)$ она поддерживается в динамическом диапазоне рецептора слуха путем адаптации коэффициента передачи

среднего уха. Интервал времени адаптации определяет протяженность протекания процессов предмаскировки и постмаскировки слуха, в течение которых органы рецептора находятся вне их рабочего динамического диапазона и не способны идентифицировать сигнал. Анализ переходных процессов в улитке выходит за рамки объекта исследований и представляет собой самостоятельную научно-техническую задачу.

Результаты экспериментальных исследований (планируется отдельно опубликовать их результаты) подтвердили справедливость предложенных гипотез.

Выводы

Проведенный теоретический и экспериментальный анализ импульсной модели приемника речевых сообщений позволяет сделать следующие выводы.

Аналитически решена проблема, заключающаяся в противоречии дискретного характера психофизиологического информационного управления природным речеслуховым процессом и аналоговыми методами его анализа.

Разработана импульсная модель психофизиологического анализа РС, адекватность которой экспериментально подтверждена методами временного, статистического и спектрального анализа фонем РС.

Предлагаемая модель является расширением и объединением существующих моделей слуха на основе методологий синергетики и биологических функциональных систем. Современные модели речеобразования и слуха, базирующиеся на методе интегральной обработки параметров и характеристик процесса речевого обмена и основанные на ограничениях гипотезы о локальном постоянстве параметров речевого тракта, представляют частный случай предлагаемой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёв В.Н., Жуковицкий И.В., Жуковицкий В.И. Импульсная модель речевого источника сообщений. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Днепропетровск, – 2010. – № 14. – С. (в печати).
2. Бекеши Г., Розенлит В.А. Механические свойства уха. В кн. Экспериментальная психология (том 2). – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 1035с.

3. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. /Пер. с нем. под ред. Б.Г. Белкина. – М.: Связь, 1971. – 225с.
4. Психоакустические аспекты восприятия речи. Механизмы деятельности мозга / Под. ред. Н.П. Бехтеревой. – М.: Наука, 1988.–504 с.
5. Физиология речи. Восприятие речи человеком. (Чистович Л.А., Венцов А.В., Гранстрем М.П. и др.) В серии «руководство по физиологии» – Л: «Наука», 1976. – 388 с.
6. Фланаган Дж. Анализ, синтез и восприятие речи: Пер. с англ./ Под ред. А.А. Пирогова. – М.: Связь, 1968. – 396 с.
7. Галунов В.И. Акустические проблемы речевой акустики. Труды XIII сессии РАО, т.3, 2003. С.16.
8. Helmholtz H. von, Die Lehe von Tonempfindungen. Brannschweig, Vieweg, 1863.
9. Фант Г. Акустическая теория речеобразования: Пер. с англ./Под ред. В.С. Григорьева. – М.: Наука, 1964. – 284 с.
10. Галунов В.И. Современные речевые технологии (обзорная статья). [Электронный ресурс] – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.auditech.ru/article/SpecomRus.doc> свободный. – Загл. с экрана.
11. Журавлёв В.Н., Архипов А.Е. Системный анализ энергоинформационного обмена на ОИД. Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. 2008. – № 16. – С. 26 – 34.
12. Журавлёв В.Н. Синергетическая концепция энергоинформационного обмена речеслуховой системы. Адаптивні системи автоматичного управління//Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Дніпропетровськ: Системні технології, – Випуск 11 (31) 2007. ISSN 1562-9945. – С. 128–135.
13. Найда С.А. Объективная аудиометрия на основе формулы среднего уха – новый метод исследования и дифференциальной диагностики слуха. Электроника и связь. – 2004. – №23 – С. 66–70.
14. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир. 1965. – 512 с.
15. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. – М: Ком. книга, 2007. – 328 с.