

## МОДЕЛЬ СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ

В. П. БОНДАРЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедры вычислительной техники)

Исследование механизмов обработки сигналов в слуховой системе человека базируется, с одной стороны, на анатомических, электрофизиологических и психоакустических экспериментах, с другой — на изучении электронных моделей отдельных элементов органа слуха [1, 2]. Разработка и исследование таких моделей позволяют значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих в слуховой системе человека. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этом направлении, до сих пор не ясен до конца механизм кодирования и обработки слухового стимула, начиная с уровня слухового нерва [2, 3].

Рассматриваемая нами модель предназначена для исследования механизмов кодирования сигналов на уровне слухового нерва и включает в себя два блока: блок фильтров (модель основной мембраны) и блок чувствительных элементов (модель сенсорного поля).

Основой при построении модели служила гипотеза, заключающаяся в том, что в слуховой системе осуществляется измерение мгновенной частоты и амплитуды составляющих суммы [4, 5]

$$f(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t),$$

где  $f(t)$  — входной сигнал,  $f_i(t)$  — сигнал с выхода  $i$ -того фильтра.

Очевидно, что модель должна иметь одновременно и характеристики, совпадающие с известными данными по функциональному строению периферии слуховой системы человека, а именно: добротность фильтров модели должна быть порядка единицы [6], зависимость номера фильтра или некоторой координаты  $x$  от его резонансной частоты должна подчиняться закономерности [3, 6]

$$x = \ln \frac{1}{f}. \quad (1)$$

Чувствительные элементы при выполнении условия (1) должны быть равномерно распределены вдоль оси  $x$  и генерировать стандартный импульс напряжения или тока в момент перехода сигнала с выхода фильтра через нуль [3, 6].

В основу блока фильтров была положена многозвенная схема [2]. На рис. 1 представлена ее принципиальная схема. Модель строилась для области звуковых частот.

Катушки индуктивностей  $L$  намотаны на сердечниках СБ-3а. Величина  $L$  равна 60 мГн и подбиралась с точностью  $\pm 0,5\%$ . Емкости конденсаторов  $C_k$  выбраны из соотношения [2]

$$C_k = C_1 e^{\beta(k-1)},$$

где  $\beta = 0,07$ ,  $C_1 = 6250$  пФ — емкость первого звена и тоже подбирались с точностью  $\pm 0,5\%$ .

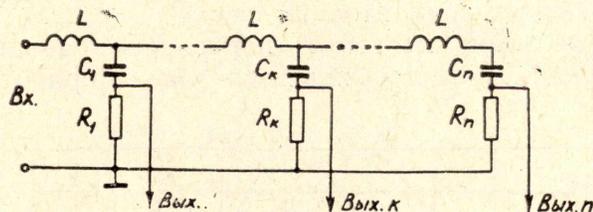


Рис. 1.

Сопротивления резисторов  $R_k$  в первом приближении выбирались из условий

$$R_k = R_1 e^{-\frac{\beta(k-1)}{2}}, \quad R_1 = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L}{C_1}} - r_L,$$

где  $Q$  — требуемая добротность первого звена,  $r_L$  — активное сопротивление катушки  $L$ .

Фильтры настраивались подбором сопротивлений  $R_k$ , для чего они были составлены из последовательно включенных переменного и посто-

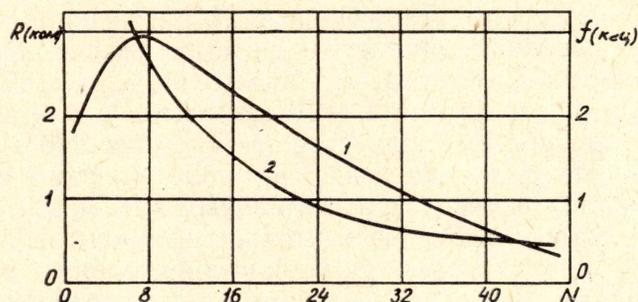


Рис. 2

янного резисторов. После настройки переменные резисторы были заменены на постоянные. Окончательная зависимость  $R_k(N)$  представлена на рис. 2 (кривая 1).

Общее число фильтров равно 60. Первые два и последние семь фильтров не используются, так как имеют характеристики, сильно отличающиеся от требуемых.

На выходе фильтров стоят согласующие эмиттерные повторители (ЭП). Сигнал с выходов всех ЭП нормирован и составляет 200 мВ на резонансной частоте фильтра.

Амплитудно-частотные характеристики фильтров приведены на рис. 3. Добротность фильтров составляет величину порядка  $0,8 \div 1,2$ . На рис. 2 (кривая 2) приведена зависимость резонансной частоты фильтра от его номера. Данная зависимость достаточно хорошо аппроксимируется выражением

$$f = \frac{33,8}{N+3} - 0,26$$

и с точностью  $\pm 10\%$

$$N = 9 \ln \frac{7}{f - 0,3},$$

где  $f$  — в кГц.

Таким образом, грубо можно считать  $N$  за ось  $x$ , более точное исследование потребует, очевидно, другой, неравномерной плотности распределения чувствительных элементов по оси  $N$ .

Чувствительные элементы имеют порог срабатывания около 2 мВ, то есть обеспечивают динамический диапазон в обработке сигнала по-

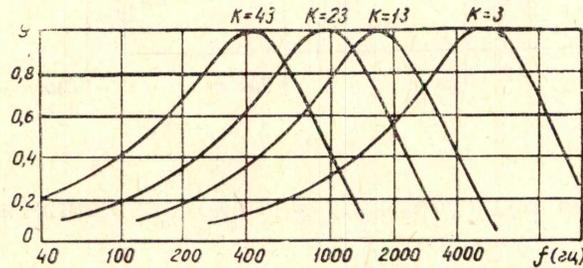


Рис. 3

рядка 40 дБ. Общее число чувствительных элементов равно числу используемых фильтров. Каждый элемент состоит из усилителя, триггера Шмидта и мультивибратора. Длительность выходного импульса составляет 0,1 мсек и амплитуда — 15 в.

Данная модель в комбинации с сумматором [5] позволяет реализовать алгоритм измерения мгновенной частоты сигнала.

Измерение мгновенной амплитуды сигнала связано с усложнением блока чувствительных элементов. На выходе каждого фильтра в этом случае необходимо поставить по 4 ÷ 10 элементов с разными порогами срабатывания, тогда общее количество их составит 200 ÷ 500 шт. Для сравнения можно отметить, что сенсорное поле слуховой системы человека включает около 30 тысяч чувствительных клеток [2, 3, 6].

Несмотря на малое число чувствительных элементов (50), в модели удалось довольно просто получить удовлетворительную разрешающую способность по частоте и быстродействию, что в некоторой степени подтверждает выдвинутую гипотезу о механизмах преобразования сигнала в слуховой системе человека и позволяет провести исследование на модели некоторых закономерностей кодирования слухового стимула.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Бондарко и др. Модель восприятия речи человеком. М., «Наука», 1968.
2. В. К. Лабутин, А. П. Молчанов. Слух и анализ сигналов. М., «Энергия», 1967.
3. У. Сиберт. Преобразование стимула в периферической слуховой системе. — В сб.: «Распознавание образов». М., «Мир», 1970.
4. В. П. Бондаренко, В. А. Бондарь. Измерение некоторых характеристик гласных звуков. Известия ТПИ. Т. 246 (в печати).
5. В. П. Бондаренко. Алгоритм предварительной обработки одномерного сигнала. — В сб.: «Тонкие магнитные пленки, радиотехника, вычислительная техника». Т. 1, Красноярск, ИФ СО АН СССР, 1971.
6. Георг Бекеш, Вальтер А. Розенбит. Механические свойства уха. — В сб.: «Экспериментальная психология». ИЛ. Т. 2, 1963.