

Использование этой формулы в случае пары прямоугольных ( $\lambda = \frac{1}{2}$ ) и синусоидальных мельканий приводит к условию, обеспечивающему равенство критических частот

$$\Delta B_{\text{пр}} = \frac{2}{\pi} \Delta B_{\text{син}}, \quad (23)$$

где  $\Delta B_{\text{син}}$  и  $\Delta B_{\text{пр}}$  — амплитуда соответственно синусоидальных и прямоугольных мельканий яркости. При выводе формулы (23) принято допущение, что амплитуда мельканий во много раз превосходит ее пороговое значение. Справедливость этой формулы может быть проверена экспериментально.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Луизов. Инерция зрения. Оборонгиз, 1961.
2. M. E. Allard. Memoire sur l'intensité et laportée des phares. Paris, 1876.
3. M. Plateau. Sur une loi de la persistance des impressions dans l'oeil. Bull. d. Acad. d. Belg., 2, N 46, 1878.
4. H. E. Ives. A Theory of intermittent vision. J. Opt. Soc. Amer., 1922, N 6.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗВУКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЛУХОВОМ АНАЛИЗАТОРЕ ЧЕЛОВЕКА

*Г. Ф. Дюбко, Г. С. Еремин*

Слуховой анализатор человека довольно глубоко изучен с физиологической точки зрения. Однако еще нет четких представлений о математических закономерностях, согласно которым происходит обработка входной информации.

Существует несколько теорий слуха: теория места, теория перекладывания и т. д., однако все они предположительны, не являются безукоризненными и недостаточно исследованы. Кроме того, ни одна из этих теорий не доведена до степени четкой математической модели.

Поскольку под математической моделью понимаются математические соотношения (алгоритмы), описывающие правила преобразования информации, то исследованием математических моделей можно считать реализацию этих алгоритмов на электронных вычислительных машинах с последующим получением реакций моделей на различные типы входных сигналов. Такое исследование предполагает большое количество экспериментов, которые помогут выявить неполноту или внутреннюю противоречивость модели с целью ее усовершенствования. Однако для исследования модели сначала необходимо ее получить.

Математическая модель, описывающая работу слухового анализатора человека, может быть получена методом кибернетического «черного ящика». Предполагается, что на «черный ящик» подаются входные сигналы, которыми управляют и которые измеряют физическими приборами. Можно также измерять выходные сигналы. Поскольку выходными сигналами слухового анализатора являются ощущения, их можно регистрировать с помощью сознания испытуемого, т. е. для регистрации и измерения выходных сигналов используются методы психофизики.

Входным сигналом слухового анализатора считается звуковое давление, т. е. закон изменения акустического давления во времени. Выходным сигналом служит слуховое ощущение. При построении модели преобразования звуковой информации в слуховое ощущение последнее можно характеризовать основным тоном, громкостью и тембром.

= 1/2)  
 методу  
 (23)  
 ямо-  
 огу-  
 овое  
 ери-  
 Bull.  
 N 6.  
 Д  
 голо-  
 тема-  
 вход-  
 екла-  
 уку-  
 этих-  
 ами  
 еские  
 инфор-  
 гали-  
 осле-  
 игна-  
 нтов,  
 модели  
 атора-  
 ности.  
 сего-  
 рами.  
 игна-  
 стри-  
 изме-  
 авле-  
 ыход-  
 пре-  
 ожно

В настоящей работе приводится математическая модель, построенная методом кибернетического «черного ящика». Класс входных величин ограничивается периодическими сигналами вида

$$p(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t.$$

как частный случай сюда же входят чистый гармонический тон и биения. Реакции математической модели должны совпадать с психофизическими реакциями слухового анализатора. Чистому тону должны соответствовать постоянная громкость, изменяющаяся только в связи с адаптацией, постоянная высота тона и тембр, определяемый появлением кратных гармоник. Биениям соответствуют постоянная высота основного тона, периодически изменяющаяся во времени громкость, тембр, определяемый комбинационными тонами и высшими гармониками. Появление в выходном сигнале гармонических составляющих, которые отсутствуют во входном, требует восприятия моделью

также и нелинейных эффектов слуха. Кроме того, модель должна обладать высокой разрешающей способностью к различению чистых тонов с близкими частотами. Заметим, что два чистых тона с близкими частотами ухо различает только при определенной разнице на слуховой анализатор сигналов, сдвинутых во времени. Если же оба тона звучат одновременно, человек их не различает и воспринимает как сложное колебание — биение.

Модель должна описывать адаптацию и степенной закон преобразования интенсивности в громкость.

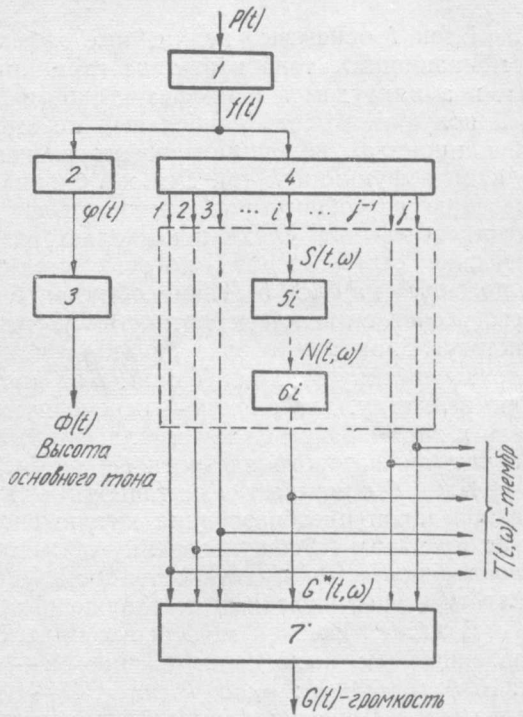
Всем предъявленным выше требованиям удовлетворяет модель, изображенная на рисунке и представленная в виде цепочки пронумерованных блоков, где стрелками показана последовательность прохождения информации. Приведем математические соотношения, описывающие работу каждого блока:

Блок 1 
$$m \frac{d^2 f}{dt^2} + af^2 + bf = p(t); \quad (1)$$

Блок 2 
$$\varphi(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(\tau) f(\tau + t) d\tau; \quad (2)$$

Блок 3 
$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\varphi_{\max}} \int_0^T |\varphi(\tau)| k_1(\tau) d\tau; \quad (3)$$

Блок 4 
$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \psi(x) \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} + \xi(x) \frac{\partial S}{\partial t} + \delta S, \quad (4)$$



$$S(t, 0) = f(t); S(t, l) = 0; S(0, x) = 0; \frac{dS(0, x)}{dt} = 0;$$

$$\text{Блок 5} \quad N(t, \omega) = \frac{1}{T_i} \int_t^{t+T_i} S^2(\tau, \omega) d\tau; \quad (5)$$

$$\text{Блок 6} \quad G^*(t, \omega) = r \cdot 10^{c \lg dN - \frac{k}{m} \int_{-\infty}^t c \lg dN e^{-\frac{t-\tau}{m}} d\tau} + S; \quad (6)$$

$$\text{Блок 7} \quad G(t) = \frac{1}{T_i} \int_{\omega_1}^{\omega_i} G^*(t, \omega) d\omega. \quad (7)$$

Блок 1 описывает нелинейные эффекты слуха и позволяет получать комбинационные тона и высшие гармоники с амплитудами, соответствующими амплитудам в психофизическом эксперименте. С помощью блоков 2 и 3 получаем высоту наибольшей по амплитуде гармоники в виде числа (функционала), величина которого зависит только от частоты колебания  $\omega$  и вида функции  $k_1(\tau)$ . Эти же блоки придают модели высокую разрешающую способность по частоте. Блок 4 удовлетворяет акустическому закону Ома для слуха и позволяет разложить функцию  $f(t)$  на периодические составляющие, которые снимаются с  $j$ -х выходов блока 4 и подаются на блок 5. Таким образом, блок 4 представляет собой систему резонаторов с низкой добротностью, каждый из которых настроен на свою частоту. Блок 5 преобразует акустические колебания в энергетическую характеристику этих колебаний. Для чистого тона этот блок дает постоянную величину, для биений — переменную. Величина  $T_i$ , входящая в делитель и верхний предел интеграла, должна быть равна периоду колебаний, на частоту которого настроен  $i$ -й резонансный выход.

Блок 6 описывает адаптационные преобразования громкости и степенной закон преобразования интенсивности в громкость. Блок 7 позволяет производить общую оценку громкости. Анализ выходных сигналов блока 6 позволяет судить о тембре звука, который, как известно, определяется гармоническими составляющими входного сигнала.

В математической модели входным сигналом является акустическое давление  $p(t)$ , выходными сигналами —  $\Phi(\omega)$ ;  $G(t)$ ;  $T(t, \omega)$ . Величины  $m$ ;  $a$ ;  $b$ ;  $T$ ;  $T_i$ ;  $\omega_1$ ;  $\omega_i$ ;  $c$ ;  $k$ ;  $m$ ;  $r$ ;  $S$  — некоторые константы, определяемые из психоакустического эксперимента;  $\psi(x)$ ,  $\xi(x)$  — нелинейные функции своего аргумента;  $\omega$  — функция, линейно связанная с  $x$  и также находящаяся при помощи психоакустического эксперимента.

Более подробное исследование блоков 1, 2, 4 и 6 проведено в работах [1—3].

Заметим, что предлагаемая математическая модель — не самоцель, а лишь средство для постановки экспериментов и выявления степени соответствия модели слуховому рецептору человека. Модель может оказаться полезной при физиологических исследованиях органа слуха, так как позволяет проверить физиологические теории, на основании которых она построена, и указывает на слабо разработанные моменты теории слухового анализатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Г. Ф. Дюбко. О математическом моделировании слуховой адаптации. «Биофизика», т. XIII, вып. 4, 1968.
2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Г. Ф. Дюбко, М. Ф. Бондаренко, Е. П. Пуятин. Математическое моделирование адаптации зрения и слуха. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
3. Г. Ф. Дюбко. О преобразовании интенсивности в громкость. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.