ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 266 1976

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПЕРИФЕРИИ СИСТЕМЫ ВОСПРИЯТИЯ

В. П. БОНДАРЕНКО, В. М. РАЗИН

Условие оптимальности структуры периферии системы восприятия можно записать в виде [1]:

$$\min\delta, \text{ при } S=\text{const},$$

где δ — ошибка преобразования сигнала на этом уровне,

S — сложность данного уровня системы.

Оператор L_2, описывающий преобразование сигнала на этом уровне, характеризуется параметром α [2], что позволяет свести данную задачу к поиску оптимального значения α. По построению оператора L_2 измерительный блок разбивается на l-параллельно работающих звеньев. Энергетический порог любого измерительного устройства равен [3]

$$C=\Upsilon^2 Pt,$$

где Υ^2 — квадрат погрешности,

P — потребляемая мощность от объекта измерения,

t — время измерения.

Величина $\tau=\Upsilon^2 t$ обычно является постоянной [3]. Считая, что в процессе измерения энергия сигнала используется полностью, можно записать [3]

$$D_i=\ln\frac{E_i}{C_i}=-\ln\tau=D_1, \tag{1}$$

где $Д_i$ — требуемый динамический диапазон i-го измерительного звена,

E_i — энергия i-й составляющей входного сигнала [2].

На основании (1) можно сделать вывод [1, 3], что

$$S_i=S_j=S_1,$$

где S_i — сложность i-го измерительного звена.

Общая сложность блока равна [1, 2]

$$S=\sum_{i=1}^{l}S_i=lS_1, \tag{2}$$

где

$$l=\frac{B}{\ln\alpha}, \quad B=\ln\omega_{\text{в}}-\ln\omega_{\text{н}}.$$

Предположим, что законы распределения моментов выхода из строя измерительных звеньев одинаковы и равны

$$a(t) = \frac{1}{T_0} \exp\left[-\frac{t}{T_0}\right],$$

где T_0 — средняя продолжительность безотказной работы звена, которая обратно пропорциональна его сложности.

$$T_0 = \frac{K_1}{S_1} = \frac{BK_1}{S \ln \alpha}, \tag{3}$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

Проведем оценку эффективности измерительного блока за промежуток времени $t_1 \ll T_0$, что значительно упростит решение без нарушения общей картины [4]. Тогда вероятность отказа звена за время $[0, t_1]$ с учетом (3) равна

$$g_1 = 1 - P_0^{\ln \alpha} = 1 - P_1, \tag{4}$$

где P_1 — вероятность безотказной работы звена за время t_1,

$$P_0 = \exp\left[-\frac{t_1 S}{K_1 B}\right].$$

Для такой системы при независимости отказов средняя ошибка будет равна [5]

$$\delta_1 = H_0 \delta_0 + \sum_{i=1}^{l} \delta_i H_i + \sum_{\substack{j,\, i=1 \\ j \neq i}}^{l} \delta_{i,j} H_{i,j} + \ldots + H_l \delta_l, \tag{5}$$

где H_0, $H_{i,j}$,..., — вероятности каждого из возможных состояний измерительного блока, $\delta_{i,j}$ — ошибка, возникающая за счет одновременного отказа i-го и j-го измерительных звеньев.

С учетом (4) можно записать

$$H_n = H_{i,j,\ldots,\kappa} = g_1^n P_1^{l-n}.$$

Рассмотрим выражение

$$\xi_n = \sum_{\substack{i,\, j,\, \ldots\, \kappa=1 \\ i \neq j \neq \ldots \neq \kappa}}^{l} \delta_{i,j,\ldots,\kappa}.$$

Ошибка $\delta_{i,j,\ldots,\kappa}$ равна [2]

$$\delta_{i,j,\ldots,\kappa} = \int_0^T (\varphi_i + \ldots + \varphi_\kappa)^2 \, dt.$$

Общее число таких составляющих суммы ξ_n равно

$$m = C_l^n.$$

Учитывая это, выражение для ξ_n можно преобразовать к виду

$$\xi_n = m\left[\frac{n}{l} \sum_{i=1}^{l} \langle \varphi_i^2 \rangle + \frac{n(n-1)}{l(l-1)} \sum_{i=1}^{l} \sum_{\substack{j-1 \\ j \neq i}}^{l} \langle \varphi_i, \varphi_j \rangle \right],$$

где

$$\langle \varphi_i \varphi_j \rangle = \int_0^T \varphi_i \varphi_j \, dt.$$

Подставляя полученные выражения для ξ_n и H_n в формулу (5), имеем

$$\delta_1 = \sum_{n=0}^{l} p_n \left[\frac{n}{l} \sum_{i=1}^{l} <\varphi_i^2> + \frac{n(n-1)}{l(l-1)} \sum_{i=1}^{l} \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{l} <\varphi_i, \varphi_j> \right],$$

где $p_n = C_l^n g_1^n p_1^{l-n}$ — вероятность одновременного отказа любых n измерительных звеньев.

Преобразуя выражение для δ_1, получаем

$$\delta_1 = g_1 p_1 \sum_{i=1}^{l} <\varphi_i^2> + g_1^2 \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} <\varphi_i, \varphi_j>. \qquad (6)$$

Заменим в выражении (6) составляющие суммы их верхними границами

$$\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} <\varphi_i, \varphi_j> = E,$$

где E — верхняя граница энергии сигнала [2].

$$<\varphi_i^2> = \int_{-\infty}^{\infty} Y_i(j\omega)\, Y_i^*(j\omega)\, d\omega,$$

где $Y_i(j\omega)$ — коэффициент передачи i-го фильтра [2], $Y_i^*(j\omega)$ — комплексно-сопряженная функция с $Y_i(j\omega)$.

После подстановки значения $Y(j\omega)$, интегрирования и преобразований выражение (6) запишется в виде

$$\xi_1 = \frac{\delta_1}{E} = p_0^{\ln\alpha}(1 - p_0^{\ln\alpha}) A + (1 - p_0^{\ln\alpha})^2,$$

где ξ_1 — относительная ошибка.

Кроме ошибки δ_1 будет иметь место и ошибка δ_2, связанная с конечной точностью измерения одним звеном. Предположим, что ошибка δ_2 определяется в основном собственными шумами измерительного звена и фильтра, тогда

$$\delta_2 = l E_ш,$$

где $E_ш$ — энергия шума одного канала.

Тогда общая относительная ошибка будет равна

$$\xi = \xi_1 + l \frac{E_ш}{E} = \xi_1 + \frac{B E_ш}{\ln \alpha E}.$$

Для анализа ξ проведем оценку $\frac{E_ш}{E}$ и B по данным слуховой системы человека [6]. Если полагать, что $E_ш$ соответствует порогу слышимости, то отношение

$$\frac{E_ш}{E} \approx 10^{-7},$$

и

$$B = \ln \omega_в - \ln \omega_н \approx 10.$$

Таким образом, приближенно можно записать

$$\xi = \xi_1 + \frac{10^{-6}}{\ln \alpha}.$$

На рис. 1 представлены зависимости ξ_1 от α для разных значений P_0. Второе слагаемое будет вносить существенное изменение в значение ξ только при α, достаточно близких к единице, устремляя величину ξ к бесконечности при $\alpha \to 1$. Следовательно, можно заключить, что значение α, соответствующее оптимальной структуре периферии системы восприятия, лежит в пределах

$$1 < \alpha < 2.$$

Таким образом, оператор L_2 оказывается полностью определенным и достаточно хорошо соответствует преобразованиям сигнала на периферии органа слуха человека.

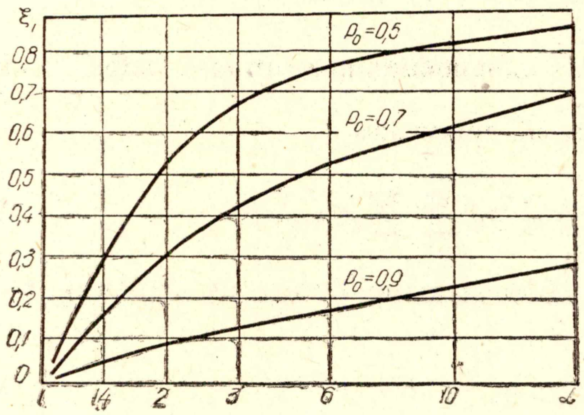

Рис. 1

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Бондаренко, В. М. Разин. К вопросу моделирования систем восприятия человека. Настоящий сборник.
2. В. П. Бондаренко, В. М. Разин. Моделирование периферии системы восприятия. Настоящий сборник.
3. П. В. Новицкий. Основы информационной теории измерительных устройств. «Энергия», 1968.
4. Б. В. Васильев. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. «Советское радио», 1970.
5. В. А. Луцкий. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. Изд. АН УССР, 1963.
6. Р. Фельдкеллер, Э. Цвикер. Ухо как приемник информации. «Связь», 1965.