УДК 62.506.2

А. В. ПАЛЬЧИК, Ю. И. ЗОЗУЛЯ, В. Г. ЧЕРВОВ, канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА

Слуховой анализатор — один из самых высокоразвитых дистан ных анализаторов нервной системы животных и человека. Эк периментально исследованы многие особенности структурно-фун циональной организации нейронной сети слухового анализатор которые не отражены в известных математических моделях [1 — 4

В данной работе предлагается обобщенная математическая м дель слухового анализатора и более подробно анализируются пр цессы преобразования звуковых сигналов в возбуждение слухов рецепторов, а также рассматриваются некоторые особенности филь рации, кодирования, запоминания и воспроизведения слухов сигналов.

Основные этапы преобразования сигналов слуховым анализатором

Внешний звуковой сигнал через систему среднего уха поступает в рецепторный аппарат и вызывает колебания мембран внутреннего уха. В процессе возбуждения рецепторных волосковых клеток основную роль играет базилярная мембрана, которая состоит из эластичных слабо связанных между собой волокон. Упругие свойства базилярной мембраны уменьшаются в направлении к геликотреме, поэтому положение точки максимального смещения мембраны зависит от скорости изменения давления звукового сигнала (от его частоты и интенсивности).

Слуховой сигнал, закодированный в импульсной форме, обрабатывается различными отделами подкорки и коры головного мозга. Предварительный анализ сигналов (рис. 1, где *1*, *1'* — рецепторы, *2*, *2'* — оливы, кохлеарные ядра, *3*, *3'* — медиальное коленчатое тело) осуществляет часть анализатора вплоть до слуховой коры (кохлеарные ядра, оливы, нижние бугры четверохолмия, медиальное коленчатое тело). Этот анализ заключается в выделении полезных сигналов на фоне шумов и в преобразовании сигналов к виду, удобному для последующего анализа слуховой корой (рис. 1). Под шумами подразумеваются все те сигналы, которые в данный момент времени не являются необходимыми для формирования поведения животного.

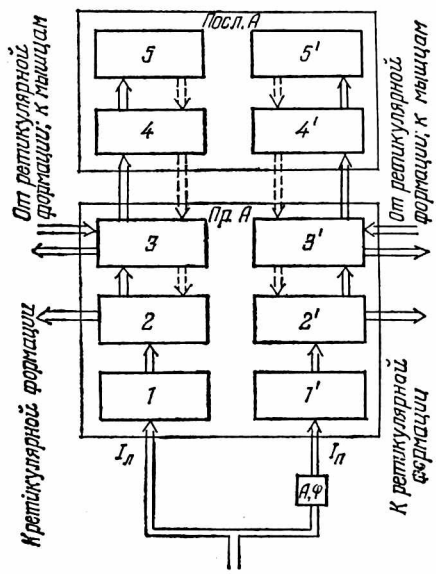

Рис. 1.

Полезный сигнал, на который животное или человек обратили свое внимание, проходит по оптимально настроенным по отношению к нему каналам связи и вызывает соответствующую реакцию в воспринимающих звездчатых клетках коры *4*, *4'* (рис. 1). В синапсах, соединяющих звездчатые клетки с пирамидными *5*, *5'*, происходит запоминание звукового сигнала. На основании сигналов, хранящихся в памяти, слуховая система может предсказывать характеристики оптимального входного сигнала, что позволяет эффективно бороться с шумами.

Математическая модель слухового анализатора

На подпороговом уровне нейроны обладают рядом линейнь свойств. Поэтому с учетом высокой плотности связей между нейр нами нейронные структуры можно представить в виде непрерывн нейронной среды и использовать интегральные уравнения для описания, а нелинейности преобразований подпороговых реакц нейронов описать с помощью дополнительных уравнений. В цел система уравнений многослойной нейронной сети слухового ан лизатора может быть представлена в виде [5]

$$\vec{P}(\vec{x}, t) = \varphi \iint\limits_{R^3} \int\limits_{-\infty}^{t} \vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')\, \vec{P}(\vec{x}', t')\, dt'\, d\vec{x}' + \int\limits_{-\infty}^{t} \vec{K}_p(\vec{x}, t, t')\, \vec{I}(t')\, dt';$$

$$\vec{Q}(\vec{x}, t) = \vec{P}(\vec{x}, t)\, 1\, [\vec{P}(\vec{x}, t) - \vec{c}(\vec{x}, t)];$$

$$\vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \vec{A}_{\vec{x}, t}\, [\vec{P}^T(x', t'), \vec{I}^T(t')];$$

$$\vec{K}_p(\vec{x}, t, t') = \vec{B}_t\, [\vec{P}^T(\vec{x}', t'), \vec{I}^T(t')],$$

где $\vec{P}(\vec{x}, t)$ — вектор-столбец подпороговых реакций нейронны слоев;

$\vec{Q}(\vec{x}, t)$ — вектор-столбец надпороговых реакций;

$\vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ — матрица функций влияния $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$, описы вающих влияние k-го слоя нейронов на j-й слоі

$\vec{K}_p(\vec{x}, t, t')$ — матрица динамических характеристик слуховых рецеп торов.

Согласно структурно-функциональной схеме (рис. 1) распишем мат рицу функций влияния для нейронной сети слухового анализатора

$$\vec{G} = \left\| \begin{array}{ccccc|ccccc}
\vec{G}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{\theta}_{12'} & 0 & 0 & 0 \\
\vec{G}_{21} & \vec{G}_{22} & \vec{\theta}_{23} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{22'} & 0 & 0 & 0 \\
0 & \vec{G}_{32} & \vec{G}_{33} & \vec{\theta}_{34} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{33'} & 0 & 0 \\
0 & 0 & \vec{G}_{43} & \vec{G}_{44} & \vec{\theta}_{45} & 0 & 0 & \vec{\theta}_{43'} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \vec{G}_{54} & \vec{G}_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{\theta}_{55'} \\
\hline
0 & \vec{\theta}_{1'2} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{1'1'} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \vec{G}_{2'2} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{2'1'} & \vec{G}_{2'2'} & \vec{\theta}_{2'3'} & 0 & 0 \\
0 & 0 & \vec{G}_{3'3} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{3'2'} & \vec{G}_{3'3'} & \vec{\theta}_{3'4'} & 0 \\
0 & 0 & \vec{\theta}_{4'3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{4'3'} & \vec{G}_{4'4'} & \vec{\theta}_{4'5'} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \vec{\theta}_{5'5} & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{5'4'} & \vec{G}_{5'5'}
\end{array} \right\|, \quad (6$$

где $\vec{G}_{pp}$ — подматрица функций влияния, характеризующих связи внутри отдельного блока схемы, $p = 1, 2, 3, 4$;

$\vec{G}_{pq}$ — подматрица функций влияния, характеризующих связи между блоками;

$\vec{\theta}_{pq}$ — подматрица функций влияния, характеризующих неспецифические связи q-го слоя с p-м слоем, $q = 1, 2, 3, 4$.

С учетом того, что звуковой сигнал $\vec{I}(t)$ в виде $I_л(t)$ поступает через левую и одновременно с некоторым фазовым и амплитудным различием в виде $I_п(t)$ — через правую стороны слухового анализатора, $\vec{K}_p(\vec{x}, t, t')$ можно выразить в виде

$$\vec{K}_p^т = \left\| \begin{array}{ccccc|ccccc} K_p^л & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_p^п & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|. \tag{6}$$

Обработка сигналов в слуховом анализаторе

Под обработкой сигналов понимаются операции фильтрации и кодирования, запоминания и воспроизведения, анализа и синтеза пространственно-временных сигналов. В блоке предварительного анализа *Пр. А* слухового анализатора (рис. 1) производится адаптивная фильтрация слуховых сигналов на фоне шумов, в основном сводящаяся к декорреляции последних. В блоке последующего анализа *Посл. А* осуществляется кодирование слуховых сигналов интегральными кодами, их запоминание и воспроизведение, анализ и синтез.

Декорреляция шумов сводится к их дифференцированию. При этом функции влияния $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ отдельных слоев нейронной сети проявляют дифференциальные свойства различных порядков. Для оценки этих свойств можно использовать разложение функции влияния $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ по произвольной функции медленного роста $\omega_\varepsilon^{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ [6], аппроксимирующей δ-функцию Дирака:

$$G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \sum_{|\alpha|=0}^{\infty} (-1)^{|\alpha|} C_{\alpha\varepsilon}^{jk}(\vec{x}, t) \times$$
$$\times D^{\alpha}_{\vec{x}', t'} \omega_\varepsilon^{jk}(\vec{x}, \vec{x}_ц + \vec{x}', t, t_ц + t'), \tag{7}$$

где

$$C_{\alpha\varepsilon}^{jk}(\vec{x}, t) = \frac{(-1)^{|\alpha|}}{\alpha!} \iint\limits_{R^3} \int \int\limits_{-t_ц}^{\infty} (\vec{x}', t')^\alpha \left[G_{jk}(\vec{x}, \vec{x} - \vec{x}_ц - \vec{x}', t, t - t_ц - t') - \right.$$
$$\left. - \sum_{|\gamma|=0}^{|\alpha|-1} C_{\gamma\varepsilon}^{jk}(\vec{x}, t) D^{\gamma}_{\vec{x}', t'} \omega_\varepsilon^{jk}(\vec{x}, \vec{x} - \vec{x}', t, t - t') \right] dt' d\vec{x}'; \tag{8}$$

$$\iiint\limits_{R^3}\int\limits_{-t_ц}^{\infty} x_1' x_2' x_3' t' \,|\, G_{jk}(\vec{x}, \vec{x} - \vec{x}_ц - \vec{x}', t, t - t_ц - t') \,|\, dt' d\vec{x}' = 0;$$

$$D^{\alpha}_{\vec{x},\, t} = \partial^{|\alpha|} / \partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \partial x_3^{\alpha_3} \partial t^{\alpha_4},$$

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4); \quad |\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4;$$

$$(\vec{x}, t)^{\alpha} = x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} x_3^{\alpha_3} t^{\alpha_4}; \quad \alpha! = \alpha_1!\, \alpha_2!\, \alpha_3!\, \alpha_4!$$

Это разложение является обобщением разложения по момента выполненного применительно к функциям влияния нейронной се зрительного анализатора [7, с. 30]. Связь между коэффициента разложения по моментам $C_{\alpha}(\vec{x}, t)$ и коэффициентами $C^{jk}_{\gamma\varepsilon}(\vec{x}, t)$ им вид

$$C^{jk}_{\gamma\varepsilon}(\vec{x}, t) = C_{\alpha}(\vec{x}, t) + \sum_{|\gamma|=0}^{|\alpha|-1} \frac{\gamma!}{\alpha!} C^{jk}_{\gamma\varepsilon}(\vec{x}, t) \times$$

$$\times \iiint\limits_{R^3}\int\limits_{-t_ц}^{\infty} (\vec{x}', t')^{\alpha-\gamma}\, \omega^{jk}_{\varepsilon}(\vec{x}, \vec{x} - \vec{x}', t, t - t')\, dt' d\vec{x}'.$$

По мере увеличения старших моментов функции $\omega^{jk}_{\varepsilon}(\vec{x}, \vec{x}', t,$ коэффициенты $C^{jk}_{\alpha\varepsilon}(\vec{x}, t)$ при старших производных в (7) все силь отличаются от коэффициентов $C_{\alpha}(\vec{x}, t)$, характеризующих идеаль дифференциальные свойства функции влияния $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$. свидетельствует об усилении интегральных свойств функции вл ния. При $\varepsilon \to 0$ $\omega^{jk}_{\varepsilon}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \to \delta(\vec{x} - \vec{x}', t - t')$, $C^{jk}_{\alpha\varepsilon}(\vec{x}, t) \to C_{\alpha}(\vec{x}$ и интегральные свойства ослабевают.

Набор коэффициентов $C^{jk}_{\alpha\varepsilon}(\vec{x}, t)$ полностью характеризует д ференциальные свойства преобразования, осуществляемого j-м сл нейронной сети над выходными сигналами k-х слоев. Функ $\omega^{jk}_{\varepsilon}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ описывает интегральные свойства функции влия $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$.

В целом соотношение (7) имеет много общих черт с формул Родригеса для разложений по ортогональным функциям [8]. Г $\omega^{jk}_{\varepsilon}(\vec{x}, \vec{x}_ц + \vec{x}', t, t_ц + t') = A \exp[-\beta_1 (x_1 - x_{1ц} - x_1')^2 - \beta_2 (x_2 - x_{2ц} - x_2')^2 - \beta_3 (x_3 - x_{3ц} - x_3')^2 - \beta_4 (t - t_ц - t')]$ соотношение (7) с дится к разложениям по полиномам Эрмита и Лагерра относитель центра $(\vec{x}_ц, t_ц)$.

Нетрудно показать, что функции влияния слоев нейронов с хового анализатора, обладающих латеральным торможением [3], име дифференциальные свойства второго порядка, что способств

декорреляции звуковых шумов и обострению чувствительности слуховой системы.

Исследование дифференциальных свойств динамической характеристики слуховых рецепторов (рис. 2) [4]

$$K_p^{л}(\vec{x}, t) = K_p^{п}(-\vec{x}, t) = \left(\frac{2000\pi}{\beta + 2000\pi}\right)^{0,8} \beta^{-3} \times$$

$$\times \{0,58 + 0,36\beta(t-T)\, e^{-\frac{\beta(t-T)}{2}} \sin[\beta(t-T)] +$$

$$+ 0,58 - 0,32\beta(t-T)\, e^{-\frac{\beta(t-T)}{2}} \cos[\beta(t-T)] - 0,58 e^{-\beta(t-T)}\}, \quad (11)$$

где $t \geqslant T$, $T = \frac{3\pi}{4\beta}$ — время задержки,

$\beta = \frac{a}{b + \psi(\vec{x})}$ — резонансная угловая частота колебаний базилярной мембраны в точке $\vec{x}$

($\psi(\vec{x})$ — расстояние от стремечка до точки $\vec{x}$ базилярной мембраны;

a, b — константы), показывает, что рецепторный аппарат уха обладает во времени дифференциальными свойствами нулевого, первого, второго, третьего и четвертого порядков, а также изменяющимися вдоль базилярной мембраны интегральными свойствами. Это обеспечивает повышение избирательности отдельных рецепторов по отношению к частоте входного звукового сигнала,

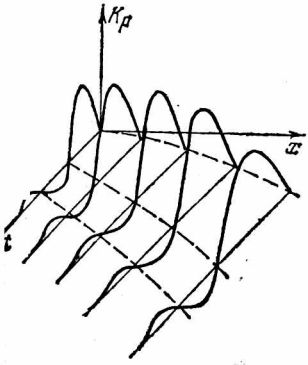

Рис. 2.

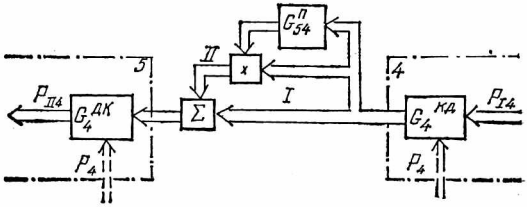

Рис. 3.

способствует реализации спектрального анализа звукового сигнала и преобразованию временного сигнала в пространственно-временной.

Преобразованный в пространственную форму и отфильтрованный от шумов слуховой сигнал поступает в кору головного мозга и ощущается звездчатыми клетками. Для запоминания этого сигнала путем изменения эффективности синапсов звездчатых клеток на мембранах пирамидных клеток необходимо предварительно закодировать его определенным кодом [6, 8]. Формально при исследовании процессов долговременной памяти связь между четвертым слоем звездчатых клеток и пятым слоем пирамидных клеток можно разделить на два

канала: постоянный I и модулируемый нервной активностью E (рис. 3). По каналу I сигнал проходит без изменения, а в канале II модулируется слуховым сигналом, проинтегрированным во времени с динамической характеристикой $G_{54}^{\text{п}}(t, t')$. Между незакодированным выходным сигналом четвертого слоя $P_{I4}(\vec{x}, t)$ и раскодированным входным сигналом пятого слоя $P_{II4}^{II}(\vec{x}, t)$ в канале II существует отношение

$$P_{II4}^{II}(\vec{x}, t) = \iint\limits_{R^2} \int\limits_{-\infty}^{t} G_{54}^{\text{п}}(t, t') \left\{ \iint\limits_{R^2} G_4^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}'', t)\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}''', t') \times \right.$$

$$\left. \times \left[\iint\limits_{R^2} G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}', t)\, P_{I4}(\vec{x}', t)\, d\vec{x}' \right] d\vec{x}'' \right\} P_{I4}(\vec{x}''', t)\, dt'\, d\vec{x}'''.$$

Из выходного сигнала четвертого слоя может быть выделена постоянная составляющая a:

$$P_4(\vec{x}'', t) = \iint\limits_{R^2} G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}', t)\, P_{I4}(\vec{x}', t)\, d\vec{x}' = a + \Delta a(\vec{x}'', t).$$

Величина $\Delta a(\vec{x}'', t)$ может рассматриваться как помеха $\eta_{54}(\vec{x}'', t)$ в канале связи II. При использовании шумоподобных голографических кодов помехи ослабляются [9], поэтому далее учитывается только постоянная составляющая реакции четвертого слоя

$$P_4(\vec{x}'', t) = a.$$

Тогда

$$P_{II4}^{II}(\vec{x}, t) = a \iint\limits_{R^2} \int\limits_{-\infty}^{t} G_{54}^{\text{п}}(t, t') \left[G_4^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}'', t) \times \right.$$

$$\left. \times\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}''', t')\, d\vec{x}'' \right] P_{I4}(\vec{x}''', t')\, dt'\, d\vec{x}'''.$$

Для голографических кодов [9]

$$\iint\limits_{R^2} G_4^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}'', t)\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}''', t')\, d\vec{x}'' =$$

$$= \iint\limits_{R^2} G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')} \times$$

$$\times\, e^{2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} [\nu_m^4(x_m''', t') - \nu_m^4(x_m, t)]} \times e^{-2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} x_m''(x_m - x_m''')}\, d\vec{x}'' =$$

$$= e^{2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} [\nu_m^4(x_m''' t') - \nu_m^4(x_m t)]} \times$$

$$\times\, F_{\vec{x} - \vec{x}'''} \{ G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t') G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t)\, e^{i[\mu_4(\vec{x}'', t') - \mu_4(\vec{x}'', t)]} \}.$$

Если в некоторый момент времени $t = t' + T(t)$ ядра кодирующей и декодирующей операций согласованы, т. е.

$$G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t) = G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')]^{-1};$$
$$\mu_4(\vec{x}'', t) = \mu_4(\vec{x}'', t'); \tag{17}$$
$$\nu_m^4(x_m, t) = \nu_m^4(x_m, t'), \quad m = 1, 2,$$

то (16) равно δ-функции. При рассогласовании этих ядер пространственный спектр отличен от δ-функции. Это отличие тем сильнее, чем ближе функции $G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}$ и $G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')}$ к выборкам белого шума. Спектр произведения таких функций является широкополосным и стремится к константе $\alpha e^{i\beta}$. Резкий переход пространственного спектра от константы $\alpha e^{i\beta}$ к δ-функции в момент времени $t = t' + T(t)$ может быть аппроксимирован функцией $\gamma(t)\,\delta[t' - t + T(t)]$. Тогда

$$\iint\limits_{R^2} G_4^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}'', t)\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}''', t')\, d\vec{x}'' = \gamma(t)\,\delta(\vec{x} - \vec{x}''') \boxtimes$$
$$\times\, \delta[t' - t + T(t)] + \alpha e^{i\beta + 2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} [\nu_m^4(x_m''', t') - \nu_m^4(x_m, t)]}; \tag{18}$$

$$P_{\text{II}4}^{\text{II}}(\vec{x}, t) = a\gamma(t)\, G_{54}^{\text{п}}[t, t - T(t)]\, P_{\text{I}4}[\vec{x}, t - T(t)] +$$
$$+ a\alpha e^{\beta i - 2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} \nu_m^4(x_m, t)} \iint\limits_{R^2} \int\limits_{-\infty}^{t'} G_{54}^{\text{п}}(t, t') \boxtimes$$
$$\times\, e^{2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} \nu_m^4(x_m''', t')}\, P_{\text{I}4}(\vec{x}''', t')\, dt\, d\vec{x}'''. \tag{19}$$

Второе слагаемое путем подбора знакопеременной функции $e^{2\pi i \sum\limits_{m=1}^{2} \nu_m^4(x_m''', t')}$ может быть уменьшено до малой величины и может рассматриваться как помеха в канале связи II. Окончательно имеем

$$P_{\text{II}4}^{\text{II}}(\vec{x}, t) = a\gamma(t)\, G_{54}^{\text{п}}[t, t - T(t)]\, P_{\text{I}4}[\vec{x}, t - T(t)]. \tag{20}$$

Величина $\gamma(t)$ характеризует степень приближения функции $G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}$ и $G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')}$ к выборкам белого шума. Чем выше степень приближения, тем меньше $\gamma(t)$. Для белого шума $\gamma(t) \to 0$. Таким образом, при увеличении точности воспроизведения уменьшается амплитуда воспроизводимого сигнала. Компромисс между точностью и амплитудой достигается путем многократной записи

сигнала. В этом случае уравнение $t' = t - T(t)$ заменяется системо $t' = t - T_1(t)$, $t' = t - T_2(t)$, ... , $t' = t - T_n(t)$ и

$$\iint\limits_{R^2} G_4^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}'', t)\, G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', \vec{x}''', t')\, d\vec{x}' =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \gamma_i(t)\, \delta[t' - t + T_i(t)]\, \delta(\vec{x} - \vec{x}''');$$

$$P_{\text{II}4}^{\text{II}}(\vec{x}, t) = a \sum_{i=1}^{n} \gamma_i(t)\, G_{54}^{\text{п}}[t, t - T(t)]\, P_{14}[\vec{x}, t - T_i(t)] =$$

$$= aP_{14}[\vec{x}, t - T_1(t)] \sum_{i=1}^{n} \gamma_i(t)\, G_{54}^{\text{п}}[t, t - T_i(t)].$$

Условие многократной записи выполняется при совмещен кратковременной и долговременной памяти в пирамидных клетк Длительная циркуляция некоторого слухового сигнала по кана связи между звездчатыми и пирамидными клетками (рис. 1) со ветствует многократной записи сигнала в долговременной памя

Вид функции $T(t)$ характеризует темп воспроизведения сиг лов из долговременной памяти и определяется видом функц $G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}$, которая является комплексным коэффициент усиления сигнала на входе пятого слоя. Эта функция должна бы обратной коэффициенту усиления сигнала на выходе четвертого с нейронной сети слухового анализатора $G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')}$. В прот ном случае не будет согласования между операциями кодирова и декодирования [8].

Таким образом, эффективность пресинаптических мембран ней нов четвертого слоя под действием проходящих по ним сигна должна изменяться обратно пропорционально изменению чувс тельности постсинаптических мембран нейронов пятого слоя: пр наптическим мембранам должна быть свойственна потенциа а постсинаптическим — депрессия.

Функции $G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}$ и $G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')}$ должны б близкими к выборкам белого шума. Поэтому сигналы, вызываю их изменение, также должны быть шумоподобными. Это усл легко выполняется при разделении $G_4^{\text{кд}}(\vec{x}'', t')\, e^{i\mu_4(\vec{x}'', t')}$ $G_4^{\text{дк}}(\vec{x}'', t)\, e^{-i\mu_4(\vec{x}'', t)}$ на шумоподобную статическую и динамичес компоненты. Последняя пропорциональна проходящему сигн

В целом система, использующая шумоподобные интеграл голографические коды при анализе сигналов, высоконадежна, вы избирательна и обладает широкими возможностями при запомин и воспроизведении сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радионова Е. А. Функциональная характеристика нейронов кохлеарных ядер и слуховая функция. Л., «Наука», 1971. 196 с.
2. Долятовский В. А. Информационные процессы в слуховом анализаторе.— В кн.: Современные проблемы нейрокибернетики. Л., с. 94—107.
3. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., «Наука», 1970. 260 с.
4. Фланаган Д. Л. Анализ, синтез и восприятие речи. М, «Связь». 1968. 396 с.
5. Зозуля Ю. И. Метод многоуровневого анализа нелинейных динамических систем мозга (см. статью в настоящем сборнике).
6. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1971. 512 с.
7. Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Модель нейронной сети зрительного анализатора.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 28—36.
8. Арфкен Г. Методы математической физики. М., Атомиздат, 1970. 712 с.
9. Зозуля Ю. И. Надежные вычисления при наличии шумов в зрительном анализаторе.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 12. Харьков, 1973, с. 3—10