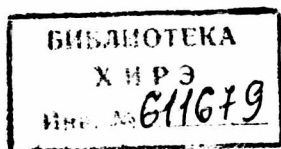


# ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский  
межведомственный  
тематический  
научно-технический  
сборник

ВЫПУСК 13

83



2001

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ВИЩА ШКОЛА»  
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
Харьков — 1974

Сборник посвящен математическому и физическому моделированию процессов переработки информации на разных уровнях нервной системы. Проблемный и дискуссионный характер носит рассмотрение активной перцептивной деятельности анализаторов мозга и их существенного отношения с объектами внешней среды. Описан метод многоуровневого анализа нелинейных динамических систем мозга. Сформулированы теоретические предпосылки преобразования и нормализации изображений. Представлены оптические и оптико-электронные модели нейронов, нейронных слоев и технические устройства для экспериментального исследования функций нервной системы и ее элементов.

Сборник предназначен для научных работников, инженеров и аспирантов — специалистов в области кибернетики и вычислительной техники.

#### Редакционная коллегия:

проф. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (отв. редактор), доц. В. Г. Червов (зам. отв. редактора), доц. Ю. П. Бугай (отв. секретарь), проф. А. В. Дабагян, чл.-кор. АМН СССР Н. М. Амосов, проф. А. А. Волков, доц. Е. П. Пуятин, д-р биол. наук К. А. Иванов-Муромский, доц. В. А. Грабина, доц. А. Г. Мурашко.

Адрес редакционной коллегии: Харьков, ГСП-218, пр. Ленина, 14, Институт радиоэлектроники.

### ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский межведомственный тематический научно-технический сборник

Выпуск 13

Редактор Э. В. Ганичева

Обложка художника И. Ф. Криворучко

Технический редактор Г. П. Александрова

Корректор Н. С. Калинина

---

Сдано в набор 4/XII 1973 г. Подписано в печать 2/IV 1974 г. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 3. Усл.-печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 1000. Заказ 3-419. БЦ 50099. Цена 1 руб. 10 коп.

---

Издательство издательского объединения «Вища школа» при Харьковском государственном университете, 310003, Харьков, 3, Университетская, 16.

---

Отпечатано с матриц книжной фабрики им. М. В. Фрунзе в Харьковской городской типографии № 16 Областного управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Харьков-3, Университетская, 16. Зак. 723.

П 30501—158  
М 226 (04) — 74 317 — 74

© Харьковский институт радиоэлектроники, 197..

### МЕТОД МНОГОУРОВНЕВОГО АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОЗГА

Точные аналитические методы абстрактной теории систем позволяют исследовать реальные объекты с помощью линейных и нелинейных математических моделей [1]. В результате введения обобщенных функций [2] расширились возможности применения линейных моделей для описания реальных объектов. В то же время нелинейные модели еще недостаточно разработаны, хотя существует общий подход к описанию нелинейных систем, основанный на использовании функциональных разложений [3, 4].

В данной работе обосновывается метод анализа нелинейных динамических систем посредством множества нестационарных линейных и статических нелинейных моделей. Благодаря этому методу достижения теории линейных систем можно применять для изучения реальных объектов с нелинейными свойствами, в частности для исследования мозга.

#### Связь между нелинейными и нестационарными линейными моделями динамических систем

Известно, что реакция  $P(\vec{x}, t)$ ,  $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3) \in R^3$ ,  $t \in R$  физически реализуемой динамической системы с распределенными параметрами на входной сигнал  $I(\vec{x}, t)$  описывается некоторым функционалом

$$P(\vec{x}, t) = F[I(\vec{x}, t)]. \quad (1)$$

Если  $F$  — непрерывный функционал, то для его представления используется функциональное разложение типа Вольтерра [3, 4] в виде

$$P(\vec{x}, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \dots \int_{R^3} \int_{-\infty}^t G_i(\vec{x}, \vec{x}', \dots, \vec{x}^i, t - t', \dots, t - t^i) \cdot I(\vec{x}', t') \dots I(\vec{x}^i, t^i) dt' d\vec{x}' \dots dt^i d\vec{x}^i. \quad (2)$$

Это соотношение можно распространить и на тот случай, когда функционал  $F$  не является непрерывным. Для этого равенство (2) необходимо рассматривать в обобщенном смысле, а все входящие в него функции погрузить в пространство обобщенных функций [2].

Путем элементарных преобразований соотношение (2) заменим эквивалентной системой однопипных линейных интегральных уравнений

$$P(\vec{x}, t) = G_0(\vec{x}) + \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') I(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}'; \quad (3)$$

$$G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = G_1(\vec{x}, \vec{x}', t - t') + \\ + \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_1(\vec{x}, \vec{x}', t - t', t, t'') I(\vec{x}'', t'') dt'' d\vec{x}''; \quad (4)$$

$$\dots \dots \dots \\ G_{i-1}(\vec{x}, \vec{x}', \dots, \vec{x}^i, t - t', \dots, t, t^i) = G_i(\vec{x}, \vec{x}', \dots, \vec{x}^i, \\ t - t', \dots, t - t^i) + \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_i(\vec{x}, \vec{x}', \dots, \vec{x}^{i+1}, t - t', \dots, \\ t, t^{i+1}) I(\vec{x}^{i+1}, t^{i+1}) dt^{i+1} d\vec{x}^{i+1}; \quad (5)$$

Уравнение (3) описывает исходную нелинейную динамическую систему как нестационарную линейную, а каждое из последующих уравнений характеризует процесс перестройки структуры нестационарной системы, эквивалентной получаемой нелинейной системе. В дальнейшем для проведения аналитических исследований достаточно использовать сокращенную форму записи уравнений (3) — (5)

$$P(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') I(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}'; \quad (6)$$

$$G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = A_{x, t} [I(\vec{x}', t')], \quad (7)$$

где  $G(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$  — функция влияния динамической системы с распределенными параметрами;  $A_{x, t}$  — оператор.

Соотношения (6) — (7) позволяют разделить задачу об анализе динамической системы на две взаимно дополняющие друг друга задачи: задачу об описании преобразования входных сигналов системы в выходные с помощью линейной нестационарной модели (6) и задачу об изучении процессов перестройки структуры динамической системы, которые определяются видом оператора  $A_{x, t}$ .

В частном случае при изучении статических нелинейных систем функционал  $F$  вырождается в функцию  $\varphi$ , и соотношение (1) сводится к уравнению

$$P(\vec{x}, t) = \varphi[I(\vec{x}, t)]. \quad (8)$$

Поскольку функция  $\varphi$  определяется экспериментально, соотношение (8) можно использовать совместно с (6)—(7) для описания отдельных подсистем единой динамической системы в виде

$$P(\vec{x}, t) = \int \int \int_{R^3} \int_{-\infty}^t G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \varphi[I(\vec{x}', t')] dt' d\vec{x}'; \quad (9)$$

$$G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = A_{\vec{x}, t} [I(\vec{x}', t')], \quad (10)$$

где  $\varphi[\cdot]$  — статическая характеристика нелинейной системы;  $G(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$  — динамическая характеристика нелинейной системы.

### Многоуровневый анализ

Реальный объект можно изучать на разных уровнях, с различным разрешением. Каждый уровень разрешения [5] характеризуется точностью, с которой изучается реальный объект. Точность зависит от разрешающей способности используемых приборов и методов усреднения их показаний. На основании этих усредненных показаний можно построить отдельную математическую модель, которая с соответствующей степенью приближения описывает реальный объект. Чем выше разрешающая способность приборов, тем точнее и сложнее математические модели и тем труднее их использовать для исследования целого объекта. Поэтому при всестороннем изучении любого реального объекта (явления) необходимо строить и совместно исследовать несколько математических моделей, соответствующих разным уровням разрешения. При этом из модели с более высоким разрешением можно теоретически вывести, а значит, глубже понять и объяснить те свойства объекта, которые на основании имеющихся экспериментальных данных постулируются в модели с меньшим разрешением. Естественно, что на модели с более высоким разрешением можно исследовать лишь наиболее существенные особенности отдельных частей реального объекта, в то время как на модели с меньшим разрешением допустимо значительно шире изучить взаимосвязи между частями целого объекта. Использование нескольких математических моделей, построенных на разных уровнях разрешения, позволяет одновременно разносторонне и глубоко исследовать реальный объект, что является признаком системности этих исследований [5]. Подобные системные исследования дают возможность проверять достоверность исходных положений любой математической модели объекта

и изучать эту модель в целях объяснения и предсказания поведения реального объекта как единого целого.

На каждом уровне разрешения для построения математических моделей можно использовать соотношения (6) — (8), которые включают в себя нестационарные линейные и статические нелинейные уравнения. При этом свойства операторов  $A_{\vec{x}, t}$  выводятся из модели с более высоким разрешением.

При изучении мозга как реального объекта живой природы в качестве основной можно использовать модель нейронной сети, которая описывает свойства мозга посредством свойств отдельных нейронов. Одновременно в процессе системных исследований нейронных сетей мозга необходимо учитывать результаты изучения мозга хотя бы на двух близлежащих уровнях разрешения: на уровне нервной ткани и уровне целого мозга. Из свойств нервной ткани можно вывести свойства отдельных нейронов и связей между ними, а с использованием данных о взаимоотношениях отдельных частей целого мозга — исследовать математическую модель нейронной сети в целях объяснения тех свойств, которыми обладает мозг как единое целое.

### Математические модели мозга

*Модель нервной ткани.* Нервная ткань представляет собой совокупность взаимодействующих клеточных мембран, связь между которыми осуществляется с помощью потоков химических веществ (медиаторов), выделяющихся из пресинаптических участков мембран нервных клеток под действием происходящих там электрических процессов. Электрической связью между отдельными клеточными мембранами в первом приближении можно пренебречь, поскольку межклеточное пространство, обладая малым сопротивлением, разделяет клеточные мембраны нервной ткани по току. Так как на любой участок мембраны нейрона может воздействовать только одна из нервных клеток, имеющая в этом месте синаптический контакт, общее распределение частоты квантов медиатора на поверхности мембраны  $k$ -й нервной клетки  $Q_{\text{КВ}}^k(\vec{x}, t)$  может быть представлено суммой неперекрывающихся распределений  $Q_{\text{КВ}}^{kj}(\vec{x}, t)$ , создаваемых каждым отдельным нейроном ткани:

$$Q_{\text{КВ}}^k(\vec{x}, t) = \sum_{j=1}^N Q_{\text{КВ}}^{kj}(\vec{x}, t) \text{ при } S_k(\vec{x}) = 0, \quad (11)$$

где  $N$  — общее количество нейронов в нервной ткани;  $S_k(\vec{x}) = 0$  — уравнение поверхности мембраны  $k$ -й нервной клетки.

Распределение  $Q_{\text{КВ}}^{kj}(\vec{x}, t)$  определяется амплитудой и скоростью изменения нормальной к поверхности клеточной мембраны составляющей напряженности электрического поля в пресинаптической

мембране  $j$ -го нейрона  $E_{n_s}^j(\vec{x}, t)$  и может быть описано интегральным соотношением

$$Q_{кв}^{kj}(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t K^{kj}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \varphi'_{пс} \left\{ \left[ \Theta^j(\vec{x}', t') \frac{\partial}{\partial t'} + 1 \right] \times \right. \\ \left. \times [E_{n_s}^j(\vec{x}', t') - E_n^j(\vec{x}', t')] \right\} dt' d\vec{x}', \quad (12)$$

где  $K^{kj}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$  — мембранная функция влияния, описывающая распределение частоты квантов медиатора на мембране  $k$ -го нейрона, которое формируется под действием электрохимических процессов в точке  $\vec{x}'$  пресинаптической мембраны  $j$ -го нейрона; эта функция учитывает явления диффузии, рассасывания, потенциации и депрессии;  $\varphi'_{пс} \{ \}$  — экспоненциально возрастающая функция, описывающая статические свойства пресинаптической мембраны  $j$ -го нейрона;  $\Theta^j(\vec{x}', t')$  — параметр, характеризующий соотношение между влияниями скорости изменения и амплитуды  $E_{n_s}^j(\vec{x}', t')$  на процессы выделения медиатора в  $j$ -м нейроне;  $E_n^j(\vec{x}', t')$  — напряженность покоя мембраны  $j$ -го нейрона (соответствует напряжению покоя клетки).

Отклонение напряженности электрического поля в мембране  $k$ -го нейрона  $E_{n_s}^k(\vec{x}, t)$  от напряженности покоя  $E_n^k(\vec{x}, t)$  полностью определяется изменением величины плотности сторонних токов  $j_{ст}^k(\vec{x}, t)$ , которые поддерживаются активными химическими процессами внутри мембран клеток нервной ткани и имеют направление, нормальное к поверхности этих мембран. Связь между  $E_{n_s}^k(\vec{x}, t)$  и  $j_{ст}^k(\vec{x}, t)$  является линейной стационарной:

$$E_{n_s}^k(\vec{x}, t) - E_n^k(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t K^k(\vec{x}, \vec{x}', t - t') j_{ст}^k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}'. \quad (13)$$

Здесь  $K^k(\vec{x}, \vec{x}', t - t')$  — мембранная функция влияния сторонних токов мембраны  $k$ -го нейрона на напряженность электрического поля в этой мембране; эта функция может быть найдена из анализа уравнений Максвелла, описывающих электродинамические процессы в нервной ткани.

Источники сторонних токов нервной ткани можно условно разделить на две группы: регулируемые внутриклеточно и регулируемые внеклеточно. К первой группе относятся импульсные источ-

ники  $j_n^k$ , формирующие потенциалы действия и пейсмейкерные потенциалы. Во вторую группу входят синаптические  $j_c^k$  и несинаптические  $j_{nc}^k$  рецепторные источники. Сторонние токи  $j_n^k$ ,  $j_c^k$  и  $j_{nc}^k$  протекают через разные поры мембраны  $k$ -го нейрона, поэтому общий сторонний ток мембраны является линейной комбинацией этих токов:

$$j_{ст}^k(\vec{x}, t) = j_n^k(\vec{x}, t) + j_c^k(\vec{x}, t) + j_{nc}^k(\vec{x}, t). \quad (14)$$

Используя нестационарные линейные и статические нелинейные модели, сторонние токи опишем соотношениями

$$j_n^k(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^t k_n^k(\vec{x}, t, t'') \varphi_n^k [E_{n_s}^k(\vec{x}, t'') - E_n^k(\vec{x}, t'')] dt''; \quad (15)$$

$$j_c^k(\vec{x}, t) = k_c^k(\vec{x}, t) Q_{кв}^k(\vec{x}, t) \varphi_c^k [E_{n_s}^k(\vec{x}, t) - E_c^k(\vec{x}, t)]; \quad (16)$$

$$j_{nc}^k(\vec{x}, t) = \sum_{r=1}^m k_p^{rk}(\vec{x}, t) j_r^k(\vec{x}, t) \varphi_p^{rk} [E_{n_s}^k(\vec{x}, t) - E_p^{rk}(\vec{x}, t)], \quad (17)$$

где  $k_n^k(\vec{x}, t, t'')$  — динамическая характеристика импульсного источника;  $\varphi_n^k[\cdot]$  — статическая пороговая характеристика импульсного источника;  $E_n^k(\vec{x}, t'')$  — порог генерирования импульсов;  $k_c^k(\vec{x}, t)$   $k_p^{rk}(\vec{x}, t)$  — функции, учитывающие неоднородность и нестационарность чувствительности мембраны  $k$ -го нейрона по отношению к внешним воздействиям;  $J_r^k(\vec{x}, t)$  — распределение интенсивности не синаптического воздействия  $r$ -й модальности на поверхности  $k$ -го нейрона;  $\varphi_c^k[\cdot]$ ,  $\varphi_p^{rk}[\cdot]$  — статические характеристики рецепторных источников;  $E_c^k(\vec{x}, t)$ ,  $E_p^{rk}(\vec{x}, t)$  — величина напряженности электрического поля в мембране  $k$ -го нейрона, при которых отсутствует токовая реакция мембраны на рецепторные воздействия.

Путем подстановки систему (11) — (17) можно свести к системе однотипных уравнений, описывающих связь между напряженностями электрических полей в отдельных нейронах нервной ткани при изменении интенсивности внешних воздействий  $J_r^k(\vec{x}, t)$ :

$$E_{n_s}^k(\vec{x}, t) - E_n^k(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^N \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t K^k(\vec{x}, \vec{x}', t - t') k_c^k(\vec{x}', t') \times \\ \times \varphi_c^k [E_{n_s}^k(\vec{x}', t') - E_c^k(\vec{x}', t')] \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^{t'} K^{kl}(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') \times \\ \times \varphi_{nc}^k \left\{ \Theta^l(\vec{x}'', t'') \frac{\partial}{\partial t''} + 1 \right\} [E_{n_s}^l(\vec{x}'', t'') - E_n^l(\vec{x}'', t'')] dt'' dx'' dl' dx' +$$

$$\begin{aligned}
& + \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t K^k(\vec{x}, \vec{x}', t-t') \int_{-\infty}^{t'} k_n^k(\vec{x}', t', t'') \times \\
& \quad \times \varphi_n^k [E_{n_s}^k(\vec{x}', t'') - E_n^k(\vec{x}', t'')] dt'' dt' d\vec{x}' + \\
& + \sum_{r=1}^m \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t K^k(\vec{x}, \vec{x}', t-t') k_p^{rk}(\vec{x}', t') \times \\
& \quad \times \varphi_p^{rk} [E_{n_s}^k(\vec{x}', t') - E_p^{rk}(\vec{x}', t')] J_r^k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' \quad (18)
\end{aligned}$$

при  $S_k(\vec{x}) = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ .

Наличие нелинейных статических характеристик  $\varphi_c^k[\cdot]$ ,  $\varphi_{nc}^k[\cdot]$ ,  $\varphi_n^k[\cdot]$ ,  $\varphi_p^{rk}[\cdot]$  приводит к перестройке связей между нейронами под действием сигналов  $J_r^k(\vec{x}', t')$ . Длительные изменения во времени величин  $k_c^k(\vec{x}', t')$ ,  $k_p^{rk}(\vec{x}', t')$ ,  $k_n^k(\vec{x}', t', t'')$ ,  $\bar{K}^{kj}(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'')$ ,  $E_n^k(\vec{x}, t)$  лежат в основе долговременной памяти мозга.

*Модель нейронной сети.* Нейронная сеть — это множество нейронов, для которых указано, какие их входы и выходы отождествлены. Электрофизиологические данные позволяют считать, что подпороговая и надпороговая электрическая активность нейрона достаточно полно отражает сложные биохимические и биофизические процессы в нервной клетке. Поэтому за основную выходную величину каждого элемента нейронной сети принимается подпороговая или надпороговая активность аксонного холмика нервной клетки. Для других элементов нейронной сети она является входной величиной. Вся нейронная сеть разделяется на слои нейронов с идентичными функциональными характеристиками.

Э. Р. Кайаниелло [6] показал, что нейронную сеть можно изучить как континуальную нейронную среду с помощью непрерывной математической модели. Основные уравнения непрерывной модели нейронной сети можно вывести из модели нервной ткани (18) и представить их в матричном виде

$$\begin{aligned}
\vec{P}(\vec{x}, t) = \varphi \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \vec{Q}(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' + \\
+ \int_{-\infty}^t \vec{K}_p(\vec{x}, t, t') I(\vec{x}, t') dt'; \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\vec{Q}(\vec{x}, t) = \vec{P}(\vec{x}, t) l [\vec{P}(\vec{x}, t) - \vec{c}(\vec{x}, t)]; \quad (20)$$

$$\vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = A_{x, t} [\vec{P}^T(\vec{x}', t'), \vec{I}^T(\vec{x}', t')]; \quad (21)$$

$$\vec{K}_p(\vec{x}, t, t') = \vec{B}_t [\vec{P}^T(\vec{x}, t'), \vec{I}^T(\vec{x}, t')], \quad (22)$$

где  $\vec{P}(\vec{x}, t)$  — вектор-столбец подпороговых реакций  $P_k(\vec{x}, t)$  нейронных слоев с индексами  $k = 1, 2, \dots, M$ ;  $\vec{Q}(\vec{x}, t)$  — вектор-столбец надпороговых реакций  $Q_k(\vec{x}, t)$ ;  $\vec{c}(\vec{x}, t)$  — вектор-столбец порогов срабатывания  $c_k(\vec{x}, t)$ ;  $\vec{I}(\vec{x}, t)$  — вектор-столбец входных сигналов  $I_r(\vec{x}, t)$  всей нейронной сети мозга, имеющих модальность  $r = 1, 2, \dots, m$ ;  $\vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$  — матрица функций влияния  $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ , описывающих влияние  $k$ -го слоя нейронов на  $j$ -й слой,  $j = 1, 2, \dots, M$ ;  $K_p(\vec{x}, t, t')$  — матрица динамических характеристик  $K_p^{jr}(\vec{x}, t, t')$ , описывающих влияние входного сигнала  $r$ -й модальности на величину подпороговой реакции  $j$ -го слоя нейронов  $P_j(\vec{x}, t)$ ;  $\vec{A}_{x,t}$ ,  $\vec{B}_t$  — матрицы нелинейных операторов  $A_i^{jk}$  и  $B_i^{jr}$ ;  $\varphi$  — коэффициент пропорциональности,  $[\varphi] = [x]^{-3}$ ;  $1[\cdot]$  — единичная функция Хевисайда;  $\tau$  — знак транспонирования;  $M$  — количество слоев в нейронной сети.

Операторы  $A_i^{jk}$ ,  $B_i^{jr}$  характеризуют процессы перестройки структуры связей между нейронами, процессы адаптации нейронной сети к сигналам  $\vec{P}(\vec{x}, t)$  и  $\vec{I}(\vec{x}, t)$ , а также процессы памяти. Свойства этих операторов выводятся из модели нервной ткани (18).

Уравнения (19)–(20) позволяют определить подпороговую  $\vec{P}(\vec{x}, t)$  и надпороговую  $\vec{Q}(\vec{x}, t)$  реакции нейронной сети мозга на воздействие  $\vec{I}(\vec{x}, t)$ . Решение этих уравнений упрощается после введения функции

$$\vec{G}^*(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') 1[\vec{P}(\vec{x}', t') - \vec{c}(\vec{x}', t')]. \quad (23)$$

Тогда вместо (19)–(20) можно записать линейное нестационарное интегральное уравнение

$$\vec{P}(\vec{x}, t) = \varphi \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \vec{G}^*(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \vec{P}(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' + \int_{-\infty}^t \vec{K}_p(\vec{x}, t, t') \vec{I}(\vec{x}, t') dt', \quad (24)$$

решение которого может быть представлено в виде

$$\vec{P}(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \vec{G}_{p.n}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \vec{I}(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' \quad (25)$$

при

$$\vec{G}_{p.n}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \delta(\vec{x} - \vec{x}') \vec{K}_p(\vec{x}, t, t') + \varphi \int \int \int_{R^3} \int_{-\infty}^t \vec{G}^*(\vec{x}, \vec{x}'', t, t'') \vec{G}_{p.n}(\vec{x}'', \vec{x}', t'', t') dt'' d\vec{x}'', \quad (26)$$

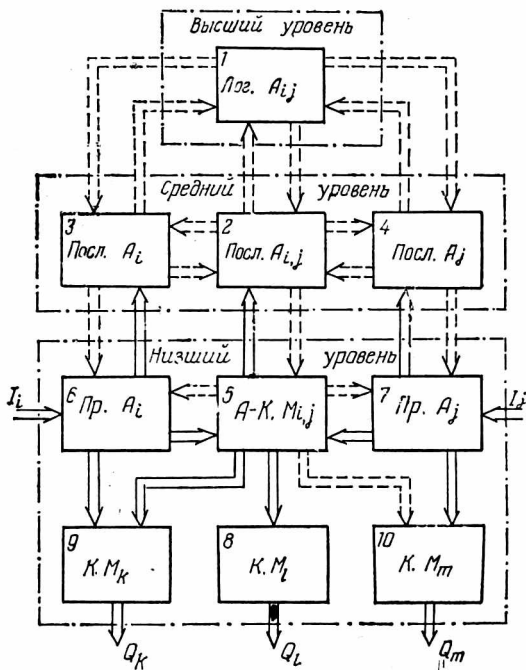
где  $\vec{G}_{p.n}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$  — матрица функций влияния рецептивных полей отдельных клеток в слоях нейронной сети мозга;  $\delta(\cdot)$  — функция Дирака.

Функции влияния рецептивных полей можно получить в результате обработки экспериментальных данных [7, 8], по которым определяется матрица функций влияния отдельных слоев  $\vec{G}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ .

#### Модель целого мозга.

В мозге можно выделить три уровня структурно-функциональной организации: низший (рефлекторный), средний (образный) и высший (логический). Эти уровни соответствуют трем этапам филогенетического развития нейронной сети мозга путем последовательного наслоения новых нейронных образований на более древние. В мозге человека рефлекторная деятельность осуществляется спинным мозгом, подкорковыми ядрами и частично — корой головного мозга. Образная деятельность управляется корой головного мозга, а логическая деятельность формируется новейшими областями ассоциативной коры.

Анализаторы мозга формируются в результате специализации отдельных областей нейронной сети. При этом каждый анализатор охватывает два уровня структурно-функциональной организации и состоит из блока предварительного анализа *Пр. А* и блока последующего анализа *Посл. А* сигналов (рисунок). Связи между отдельными специфическими анализаторами, обрабатывающими входные сигналы определенной модальности, осуществляются с помощью анализаторно-координационных механизмов *А-К.М.*



примерами которых являются мозжечок, таламус, гипоталаму и ретикулярная формация. Деятельность различных анализаторов мозга контролируется блоком логического анализа *Лог. А.* Для формирования управляющих сигналов, поступающих на отдельные исполнительные органы, служат координационные механизмы *К. М* [9]. Анализаторы и эффекторы целого мозга постоянно объединяются в функциональные системы, обеспечивающие получение некоторого полезного для организма результата [10].

Основой для разделения нейронной сети целого мозга на отдельные структурно-функциональные уровни и блоки являются не только морфологические особенности нервной ткани, но и различия свойств специфических и неспецифических связей между нейронными слоями. Так, между низшим и средним уровнями организации анализаторов мозга существуют встречно направленные специфические (стрелки со сплошными линиями на рисунке) и неспецифические (стрелки с пунктирными линиями) связи, а встречные неспецифические связи отделяют высший уровень организации мозга от среднего. Различия между специфическими и неспецифическими связями в отдельном нейроне проявляются в том, что синапсы, соответствующие неспецифическим связям, настолько удалены от аксонного холмика, что их прямое влияние на реакцию нейрона ничтожно мало и проявляется лишь в виде фоновой активности. Вместе с тем изменяя напряженность электрического поля в соседних участках постсинаптической мембраны нейрона в соответствии с (13) — (16) они управляют коэффициентом усиления рядом расположенных синапсов, которые либо непосредственно влияют на импульсную активность аксонного холмика, либо трансформируют сигнал на другие синапсы. Синапсы, расположенные вблизи аксонного холмика, соответствуют специфическим связям между нейронами и формируют выходные сигналы нервной клетки. Если между  $k$ -м и  $j$ -м слоями нейронной сети мозга существует неспецифическая связь, то ее функция влияния  $G_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \Theta_{jk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \approx 0$ . Сигналы, передаваемые по неспецифическим связям, лишь перестраивают структуру специфических связей.

В структурной схеме целого мозга (см. рисунок) каждый блок является многослойной нейронной сетью и характеризуется подматрицей функций влияния внутренних связей  $\vec{G}_{pp}$ , подматрицей функций влияния внешних связей  $\vec{G}_{pq}$  или  $\vec{\Theta}_{pq}$  и подматрицей динамических характеристик  $\vec{K}_p^{pr}$  по отношению к входным сигналам целого мозга  $I_r(\vec{x}, t)$ . Применительно к структурной схеме, изображенной на рисунке, матрицы функций влияния  $\vec{G}$  и динамических характеристик  $\vec{K}_p$  модели нейронной сети (19)—(22) можно представить в виде

$$\vec{G} = \begin{pmatrix} \vec{G}_{11} & \vec{\Theta}_{12} & \vec{\Theta}_{13} & \vec{\Theta}_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vec{\Theta}_{21} & \vec{G}_{22} & \vec{\Theta}_{23} & \vec{\Theta}_{24} & \vec{G}_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vec{\Theta}_{31} & \vec{\Theta}_{32} & \vec{G}_{33} & 0 & 0 & \vec{G}_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vec{\Theta}_{41} & \vec{\Theta}_{42} & 0 & \vec{G}_{44} & 0 & 0 & \vec{G}_{47} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vec{\Theta}_{52} & 0 & 0 & \vec{G}_{55} & \vec{G}_{56} & \vec{G}_{57} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vec{\Theta}_{63} & 0 & \vec{\Theta}_{65} & \vec{G}_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vec{\Theta}_{74} & \vec{\Theta}_{75} & 0 & \vec{G}_{77} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{85} & 0 & 0 & \vec{G}_{88} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{G}_{95} & \vec{G}_{96} & 0 & 0 & \vec{G}_{99} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vec{\Theta}_{105} & 0 & \vec{G}_{107} & 0 & 0 & \vec{G}_{1010} \end{pmatrix};$$

$$\vec{K}_p = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vec{K}_p^{6i} & 0 \\ 0 & \vec{K}_p^{7i} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Для исследования структурно-функциональной организации нейронной сети целого мозга необходимо проводить дальнейшую конкретизацию подматриц функций влияния и динамических характеристик. Это исследование можно провести на примере нейронных сетей таких высокоразвитых анализаторов мозга, как зрительный и слуховой, поскольку высокоразвитый анализатор охватывает как подкорковые, так и корковые образования мозга, которые имеют разные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов и определяют все разнообразие свойств целого мозга.

#### ЛИТЕРАТУРА

- М е с а р о в и ч М. Теория систем и биология. Точка зрения теоретика. — В кн.: Теория систем и биология. М., 1971, с. 90—128.
- В л а д и м и р о в В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1971. 512 с.
- В а н-Т р и с Г. Синтез оптимальных нелинейных систем управления. М., «Мир», 1964. 167 с.
- Современные методы проектирования систем автоматического управления. Под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчеева. М., «Машиностроение», 1967. 703 с.