



выпуск 2

5700000

ИЗДАТЕЛЬСТВО ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Проблемы
бионики

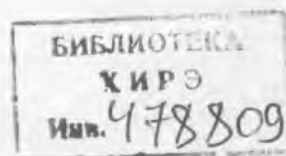
62-506.2
1778

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 2

83



КС

2001

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени А. М. ГОРЬКОГО
Харьков 1970

Настоящий сборник посвящен вопросам математического моделирования зрения и слуха человека, исследованию нейронов и биологической памяти, а также эвристическому моделированию поведения человека.

В сборнике рассмотрены вопросы моделирования некоторых программ переработки информации в коре головного мозга человека и высших животных. Изучаются математические модели, описывающие некоторые функциональные свойства зрения и слуха человека.

Исследуются законы функционирования нейронов и предлагаются модели нейронов на аналоговых элементах. Сборник затрагивает вопросы изучения функциональных свойств памяти и процессов обучения.

Сборник предназначен для научных работников, инженеров, аспирантов, работающих в области кибернетики, бионики, вычислительной техники и инженерной психологии.

Редакционная коллегия:

Чл.-корр. АН СССР Б. С. Сотсков (отв. редактор), доц. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (зам. ответственного редактора), [проф. П. И. Зипченко], проф. И. В. Кузьмин, проф. И. З. Вельвовский, проф. А. И. Плотицер, канд. биол. наук Ю. Г. Антомонов, доц. В. Г. Червов, доц. А. Н. Ефимов, доц. М. Ф. Деркач, канд. биол. наук К. А. Иванов-Муромский, доц. Э. В. Утеуш, В. А. Ловицкий (отв. секретарь).

Адрес редакционной коллегии:
г. Харьков, ГСП-218, пр. Ленина, 14,
Харьковский институт радиоэлектроники.

Ответственный за выпуск В. Я. Сердюченко

ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЧЕЛОВЕКА

В. К. Каган, Т. Я. Штейншнайдер

Как известно, зрение доставляет человеку большую часть всего объема информации о внешнем мире и, следовательно, играет в его жизни особо важную роль. Поэтому можно считать, что зрительный анализатор, прошедший длительное совершенствование в процессе эволюции, реализует наиболее целесообразные принципы приема информации в алгоритмы ее переработки.

Обширный экспериментальный материал, накопленный физиологической оптикой, позволил к настоящему времени существенно продвинуться в понимании алгоритмов переработки зрительной информации. Здесь следует в первую очередь отметить цикл работ по математическому моделированию функций зрения Ю. П. Шабанова-Кушнаренко и его сотрудников. Значительно меньше сделано для интерпретации экспериментального материала с точки зрения принципов приема информации, позволяющих понять, в каком смысле зрительный анализатор представляет собой оптимальную систему — иными словами, почему он реализует именно те, а не иные алгоритмы.

Настоящая работа и посвящена обсуждению этого вопроса.

В отличие от упомянутых работ по математическому моделированию, в которых используются аналитические зависимости между средними величинами, здесь зрение трактуется, прежде всего, как вероятностный процесс.

Отправным пунктом является, естественно, простейшая зрительная задача — обнаружение. Для нее удалось сформулировать принципы, объясняющие два фундаментальных закона биофизики зрения — закон Вебера — Фехнера и закон Блонделя — Рея [1].

Применительно к задачам различения и поиска сформулировать такие принципы пока невозможно. В этом направлении удалось сделать лишь первые шаги: наметить подход к классификации задач по сложности и выявить три фактора, которые определяют не количество, а лишь скорость передачи информации, содержащейся в зрительной картине.

1. Принцип постоянства порогового количества информации и закон Вебера — Фехнера

Увидеть тест — значит отличить его излучение от излучения фона. С этой точки зрения обнаружение теста можно рассматривать как прием сигнала при наличии шума и поставить вопрос об оценке получаемого при этом количества информации. Обнаружение теста полностью устраняет неопределенность, обусловленную вероятностью появления теста в поле зрения q , вероятностью обнаружения P_0 , вероятностью ложного сигнала P_f .

Будем характеризовать неопределенность исходной ситуации по К. Шеннону [2] и измерять энтропию для удобства выкладок не в двончных, а в пропорциональных им натуральных единицах. Тогда пороговое количество информации выразится через вероятности q , P и P_f формулой С. М. Манделъштама

$$I = q \ln q + (1 - q) \ln (1 - q) + q [P_0 \ln P_0 + (1 - P_0) \ln (1 - P_0)] + (1 - q) [P_f \ln P_f + (1 - P_f) \ln (1 - P_f)]. \quad (1)$$

Вероятность появления теста не зависит ни от наблюдателя, ни от условий освещения, но адаптация к условиям опыта может повлиять на вероятности P_0 и P_f . Характеристику самонастраивающегося приемника естественно считать оптимальной, если он адаптируется таким образом, что вероятности обнаружения и ложного сигнала всегда сохраняют первая — максимальное, вторая — минимальное возможное значение. Так мы устанавливаем принцип постоянства информационного порога как одно из условий оптимальности. Попробуем теперь применить его к истолкованию некоторых данных о работе глаза. Многочисленные экспериментальные исследования С. И. Вавилова и его учеников [3, 4] показали, что зрительное ощущение при воздействии света на глаз определяется случайной величиной, распределенной по закону Пуассона. При этом было также показано, что параметр распределения m пропорционален яркости светового стимула. В таком случае неопределенность в отношении значения случайной величины характеризуется энтропией пуассонова распределения

$$H(m) = \sum_{k=1}^{\infty} \ln k \sum_{r=k}^{\infty} \frac{m^r e^{-m}}{r!} - m (\ln m - 1). \quad (2)$$

Если сигнал и шум независимы, а принимаемый сигнал есть сумма передаваемого сигнала и шума, то, согласно теореме Шеннона [2, теорема 16], количество информации пропорционально разности энтропий принимаемого сигнала и шума. Поэтому минимальную величину Δm , определяющую разность яркостей теста и фона, можно найти из условия

$$H(m + \Delta m) - H(m) = \Delta H_{\min} = \text{const}. \quad (3)$$

При достаточно больших m распределение Пуассона можно аппроксимировать нормальным с такой же дисперсией. Как показал К. Шеннон, энтропия этого нормального распределения будет

$$H(m) = \frac{1}{2} \ln m + \ln \sqrt{2\pi e}.$$

Следовательно, при достаточно больших m

$$\Delta H \approx \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta m}{m} \right),$$

и условие $\Delta H = \Delta H_{\min} = \text{const}$ приводит к условию постоянства порогового контраста

$$K_{\text{пор}} = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta B}{B},$$

т. е. к закону Вебера — Фехнера. Как показывает непосредственное вычисление, при $\Delta H = \text{const}$ отношение $\frac{\Delta m}{m}$ с уменьшением m возрастает, что качественно согласуется с отклонениями от закона Вебера-Фехнера при малых яркостях.

На рис. 1 построены теоретические кривые $K_{\text{пор}}(m)$, рассчитанные при $\Delta H = 0,02$ и $\Delta H = 0,04$ нат. ед., и нанесены экспериментальные точки, полученные в работе Ж. Верье и М. Шмигельского [5]. Как видно из

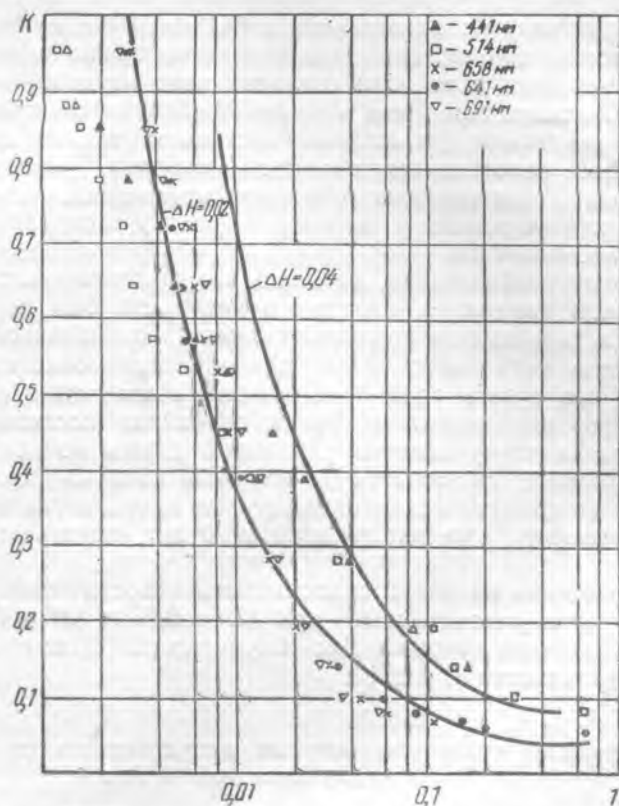


Рис. 1. Пороговый контраст. Теоретические кривые и экспериментальные данные для монохроматических излучений.

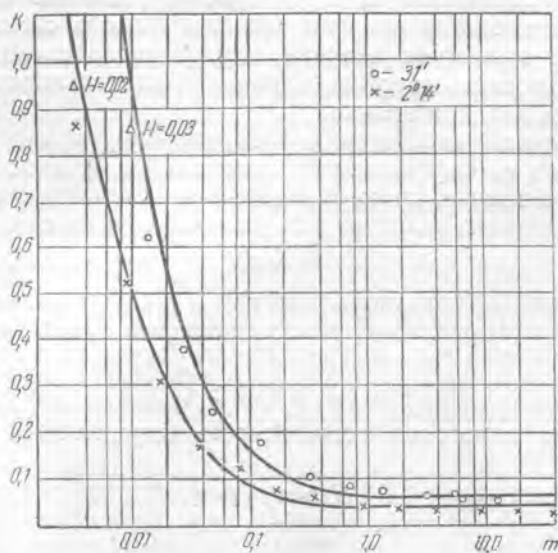


Рис. 2. Пороговый контраст. Теоретические кривые и экспериментальные данные для белого света.

рисунка, для излучения с длиной волны 641 нм и более теоретическая кривая достаточно хорошо согласуется количественно с результатами опытов. Для меньших длин волн согласие явно неудовлетворительное. Это можно объяснить тем, что в красной области спектра зрение по существу ахроматическое, и сигналы поступают только от одного из трех приемников, а именно от красного. Зеленый (514 нм) и синий (441 нм) свет возбуждает все три приемника, сигналы от них, по-видимому, коррелированы и поэтому характер распределения отклоняется от пуассоновского.

Высказанные соображения, казалось бы, противоречат известному факту, что закон изменения порогового контраста был первоначально установлен и в дальнейшем подтвержден для ахроматического зрения. Это противоречие устраняется, если принять достаточно правдоподобную гипотезу, что ответы трех приемников на излучения разных длин волн коррелированы различно. Тогда случайная последовательность воздействий на сетчатку квантов различной длины волны приведет к тому, что вторичные сигналы («эффективные кванты») окажутся распределенными во времени независимо друг от друга, а так как число их в среднем постоянно, то распределение будет описываться законом Пуассона.

В подтверждение на рис. 2 сопоставлены теоретические кривые порогового контраста, рассчитанные при $\Delta H = 0,03$ и $\Delta H = 0,02$ нат. ед., с экспериментальными данными Дж. Штейнгардта [6], полученными для угловых размеров тестов 31 и 2° 14.

2. Принцип минимума энергии непрерывного сигнала и закон Блонделя — Рея

Обнаружение означает какое-то изменение состояния приемника в результате воздействия сигнала. Оно всегда связано с поглощением энергии. Естественно полагать, что для обнаружения с помощью приемника, имеющего оптимальную характеристику, должна быть достаточна минимальная возможная энергия регистрируемого сигнала. Это условие — принцип минимума энергии непрерывного сигнала — позволяет установить взаимосвязь пороговых значений длительности наблюдения и освещенности на входном зрачке.

При визуальном наблюдении обнаружение связано с поглощением порогового числа n_0 «эффективных квантов» [3, 4], а потому пороговая освещенность на зрачке, пропорциональная математическому ожиданию числа N эффективных квантов, есть величина условная. Полагая

$$E = a\bar{N}$$

(a — коэффициент пропорциональности) и задавшись вероятностью P , принимают, что глаз реагирует на освещенность E , если выполнено неравенство

$$P\{N \geq n_0\} > \eta.$$

В таком случае пороговая освещенность определяется совокупностью равенств

$$\begin{aligned} P\{N \geq n_0\} &= \eta, \\ E_{\text{пор}} &= a\bar{N}. \end{aligned} \quad (4)$$

Величины n_0 , стало быть и $\bar{N}$ и $E_{\text{пор}}$, отличны от нуля, из чего следует существование бесчисленного множества значений освещенности E ($0 < E < E_{\text{пор}}$), которые нельзя отличить от нуля с принятой степенью до-

стоверности. Аналогичные рассуждения приводят к определению пороговой разности освещенностей. Таким образом оказывается возможным построить ряд

$$E_0 = 0 < E_1 = E_{\text{пор}} < E_2 < E_3 < \dots, \quad (5)$$

в котором величина E_i неотличима от E_{i-1} и E_{i+1} , но E_{i-1} и E_{i+1} достоверно отличаются друг от друга. Минимальному воспринимаемому различию освещенностей соответствует пороговое количество информации σ . Поэтому

$$H(E_{i+1}) - H(E_{i-1}) = \delta.$$

Освещенность E_i в равной мере неотличима от E_{i-1} и E_{i+1} , иначе мы могли бы, вопреки исходному предположению, различать величины, находящиеся в интервале $(E_{i-1} \text{ и } E_{i+1})$. Это обстоятельство выражается равенством

$$H(E_{i+1}) - H(E_i) = H(E_i) - H(E_{i-1}) = \frac{\delta}{2}.$$

Функция $H(E)$ непрерывна и

$$H(E + \Delta E) - H(E) = \Delta E \left(\frac{dH}{dE} \right)_{E+\Theta\Delta E} \quad (0 \leq \Theta \leq 1).$$

Если в интервале (E_{i-1}, E_{i+1}) производная $\frac{dH}{dE}$ практически постоянна, то

$$\begin{aligned} E_{i+1} - E_i &= E_i - E_{i-1}, \\ E_i &= \frac{E_{i-1} + E_{i+1}}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для распределения Пуассона уже при $m > 5$ $\frac{dH}{dm} \approx \frac{1}{2m}$ (для нормального распределения имеет место точное равенство). Если пороговый контраст мал, то приращение

$$\Delta \left(\frac{dH}{dm} \right) = - \frac{\Delta m}{2(m + \Theta \Delta m)^2} = \frac{1}{2m} \frac{K_{\text{пор}}}{(1 + \Theta K_{\text{пор}})^2} \quad (0 < \Theta < 1)$$

тоже будет малым по абсолютной величине. Иными словами, высокая контрастная чувствительность — достаточное условие, чтобы обеспечить выполнение равенства [5]. Нетрудно убедиться, что величина $\left| \Delta \left(\frac{dH}{dm} \right) \right|$ имеет максимум при

$$K_{\text{пор}} = \frac{1}{2 - \Theta}.$$

Если пороговая величина ΔH_{min} такова, что этому контрасту соответствует значение параметра Пуассона $m \gg 0,5$, то производная $\frac{dH}{dm}$ будет практически постоянной при всех не слишком малых m независимо от $K_{\text{пор}}$.

Для дальнейших рассуждений важно учесть, что для глаза, как и для всякого регистрирующего прибора, существует время инерции ϑ в течение которого сигнал накапливается и усредняется. Два сигнала, разделенные промежутком времени, меньшим ϑ , воспринимаются как одновременные.

Освещенность — величина, связанная с мощностью — может оцениваться не непосредственно, а только через энергетическую величину — количество освещения Q . Итак, по определению,

$$E = \begin{cases} \frac{Q}{\vartheta} & \text{при } t \leq \vartheta, \\ \frac{Q}{t} & \text{при } t > \vartheta. \end{cases}$$

Рассмотрим теперь сигнал длительности $t > \vartheta$, зависящий от времени τ ($0 \leq \tau \leq t$) таким образом, что

$$\int_0^{\vartheta} E(\xi) d\xi = E_2 \vartheta,$$

$$\int_{\tau}^{\tau+\vartheta} E(\xi) d\xi = E_1 \vartheta \quad (\vartheta < \tau \leq t - \vartheta).$$

Применяя теорему о среднем, мы можем вместо этих равенств записать

$$E(\tau) = \begin{cases} E_2 & (0 < \tau \leq \vartheta), \\ E_1 & (\vartheta < \tau \leq t). \end{cases}$$

Ясно, что

а) этот сигнал будет воспринят как непрерывный, имеющий длительность t ;

б) невозможно принять непрерывный сигнал такой же длительности, несущий меньшую энергию.

Действительно, $Q_2 = E_2 \vartheta$ есть минимальное количество освещения, вызывающее зрительное ощущение. При последующем уменьшении освещенности от E_2 до E_1 в силу неразличимости этих двух величин (см. выше) зрительное ощущение не исчезнет, причем E_1 — минимальная освещенность, при которой оно еще сохранится.

Следовательно, минимальное количество освещения при непрерывном сигнале

$$Q_{\min} = E_2 \vartheta + E_1 (t - \vartheta).$$

Но, согласно формуле (5),

$$E_1 = \frac{E_0 + E_2}{2} = \frac{E_2}{2},$$

откуда

$$Q_{\min} = E_1 (t + \vartheta),$$

т. е.

$$Et = E_{\text{пор}} (t + \vartheta). \quad (7)$$

Формула (7) выражает известный закон Блонделя — Рея, подтвержденный всеми без исключения экспериментальными исследованиями для длительностей наблюдения, превышающих 0,1 сек. При этом постоянная ϑ , входящая в формулу Блонделя — Рея, в точности совпадает со временем инерции, найденным из независимых опытов. Таким образом, формула (7) согласуется с экспериментальными данными не только качественно, но и количественно.

При наблюдении на светлом фоне ($E_0 > 0$) все освещенности в ряде (5) будут соответственно увеличены.

Обозначив

$$E_1 - E_0 = \Delta E_{\text{пор}}$$

и

$$E - E_0 = \Delta E,$$

получим, рассуждая, как и прежде,

$$\Delta Et = \Delta E_{\text{пор}} (t + \vartheta). \quad (8)$$

Формула (8) была также подтверждена тщательными экспериментальными исследованиями А. В. Луизова [7].

В заключение отметим, что при малых длительностях наблюдения результаты различных авторов не согласуются друг с другом. Некоторые авторы получили зависимость Et от t в виде кривой с минимумом, дру-

гие — в виде ломанной с горизонтальным участком. Анализируя данные авторов, оспаривающих закон Блонделя — Рея для малых экспозиций, А. В. Луизов указал, что полученные ими кривые и ломанные во многих случаях практически неотличимы от прямой, если строить весь график в едином масштабе. Изложенная теория позволяет выразить это соображение в количественной форме. Назовем, следуя А. В. Луизову, глубиной минимума выраженное в процентах отношение разности значений Et при минимальной экспозиции $t_{\min}$ и минимального значения Et к первой из названных величин:

$$\text{глубина минимума} = \frac{(Et)_{t=t_{\min}} - (Et)_{\min}}{(Et)_{t=t_{\min}}} 100\%.$$

Согласно изложенной теории, целесообразно противопоставлять прямой Блонделя — Рея лишь кривые с глубиной минимума свыше 50%. Ни в одной известной нам работе глубина минимума такой величины не достигала.

3. О расчленении и классификации сложных зрительных задач

Применение изложенных принципов к более сложным задачам наталкивается на трудности, которые до сих пор не удалось преодолеть. Основная трудность — это вопрос оценки количества информации, содержащегося в сложной зрительной картине. Естественная попытка свести восприятие сложного зрительного образа к обнаружению за ограниченное время некой совокупности простых элементов не приводит непосредственно к цели, поскольку неизвестно, как эти элементы определить. Однако нет сомнений, что зрительный анализатор осуществляет расчленение сложной задачи на более простые, — это подтверждается экспериментальными исследованиями и данными невропатологии. Следовательно, для дальнейшей разработки проблемы необходимо в первую очередь выработать обоснованную классификацию зрительных задач по степени их сложности.

Прежде всего, необходимо подчеркнуть, что сложность зрительной задачи и трудность ее выполнения — не одно и то же. Например, обнаружение — задача простая, хотя при плохом освещении выполнить ее не всегда легко. Различение сложных конфигураций — задача сложная, хотя при хорошем освещении она может оказаться легко выполнимой.

Зрительные задачи, решаемые с использованием различных функций зрения, качественно различны. В противоположность им задачи, решаемые с использованием одних и тех же функций, но в разное время, отличаются только количественно. Факторы, характеризующие трудность задачи лишь количественно, можно выделить, сопоставляя кривые вероятность — время. Кривые, построенные для зрительных задач одинаковой сложности, отличающихся лишь количественно, могут быть приведены к совпадению преобразованием масштаба по оси времени.

Что же касается задач различной сложности решаемых с использованием различных функций зрительного анализатора, то для них естественно ожидать существенных отличий формы кривых вероятность — время, не устранимых простым масштабным преобразованием. Эти соображения подтверждены опытами Н. Н. Гуревича и Т. Я. Штейншнайдер [8].

Зрительной задачей был поиск кольца Ландольта, расположенного среди 80 колец такого же размера и контраста и отличавшегося от них направлением разрыва на 90 или 180°. Полеом поиска являлся щит с белой матовой поверхностью размером 2×2 м. Угловые размеры поля

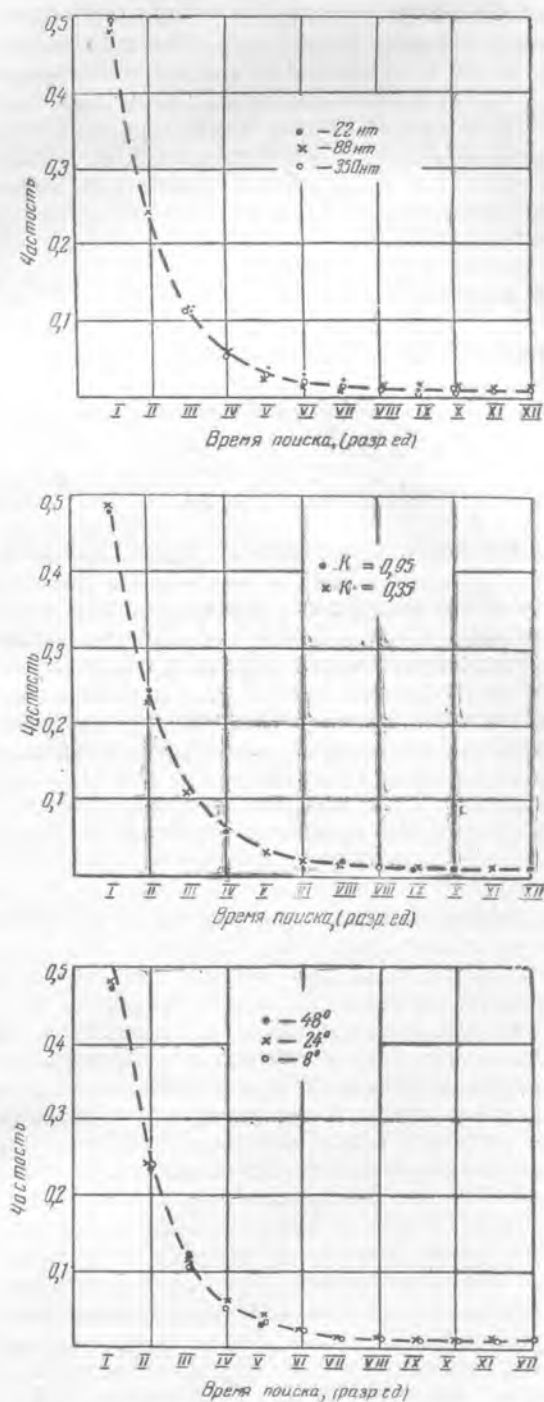


Рис. 3 Кривые распределения, усредненные по двум параметрам:

а) по контрасту и размеру поля, б) по яркости и размеру поля, в) по яркости и контрасту.

поиска такие 8,24 и 48° по диагонали. Кольца темнее фона распределялись по полю равномерно, разрыв всех колец (кроме разыскиваемого) был всегда направлен в одну сторону. Угловые размеры колец — 1,5 и 6,7. Контраст с фоном — 0,95; 0,35 и 0,15 ÷ 0,20; яркости фона были 22; 88 и 350 нт.

Наблюдатель, находясь на расстоянии 3 м, видел щит через отверстие другого щита, расположенного на расстоянии 0,5 м от глаз. Отверстие во втором щите закрывалось заслонкой, открывавшейся на время поиска. Яркости основного щита, адаптационного щита и заслонки уравнивались фотометрически.

Время поиска фиксировалось электросекундомером. Наблюдатель должен был найти кольцо на экране, назвать его положение (по укрупненным показателям) и направление разрыва.

Положение кольца задавалось по пяти программам, построенным при помощи таблицы случайных чисел, и не было известно наблюдателю. Поиск был свободным. В опытах участвовали четыре наблюдателя с нормальным зрением, прошедшие предварительную тренировку. При построении кривых распределения время откладывалось в относительных разрядных единицах:

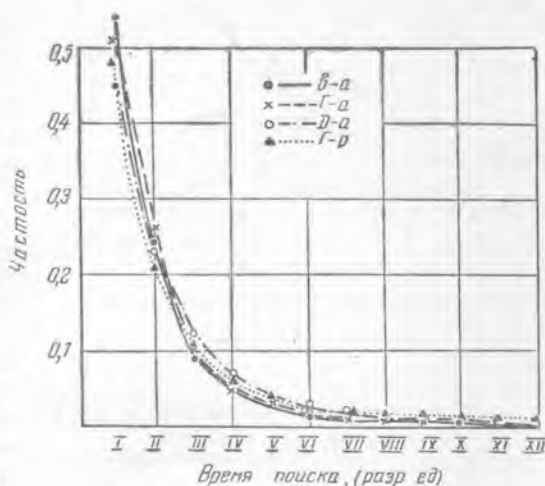


Рис. 4. Кривые распределения для четырех наблюдателей, усредненные по трем параметрам.

$$1 \text{ разрядная единица} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{12}.$$

Всего для колец 1,5 получены 24 кривые (при яркости 22 нт колец с контрастом 0,2 не различались). Каждая кривая построена на основании 200 измерений для каждого наблюдателя (всего 800 измерений на кривую). Характер всех кривых одинаков. Мы усреднили кривые, для которых значения любого из трех параметров (яркости, контраста, размера поля) одинаковы, а значения двух других различны (рис. 2). Все построенные таким образом кривые практически совпадают. На рис. 3 представлены кривые, усредненные по всем трем параметрам для каждого из четырех наблюдателей. Эти кривые мало отличаются друг от друга.

Таким образом доказано, что контраст, яркость и размер поля поиска характеризуют трудность зрительной задачи лишь количественно. Иными словами, зрительные задачи, условия которых отличаются только значениями этих трех величин, имеют одинаковую сложность. Естественно полагать, что сложность задачи связана с неопределенностью соответствующей зрительной картины. С такой точки зрения контраст, яркость и размер поля поиска определяют лишь скорость передачи информации, но не количество ее, необходимое для решения зрительной задачи.

Угловой размер кольца, мешающие кольца в поле зрения, поиск — все эти факторы характеризуют зрительную задачу не только количест-

венно, но и качественно. На рис. 4 сопоставлены кривые рис. 3 с построенными таким же способом кривыми для двух наблюдателей, полученными при выполнении других зрительных задач: поиск и различие кольца

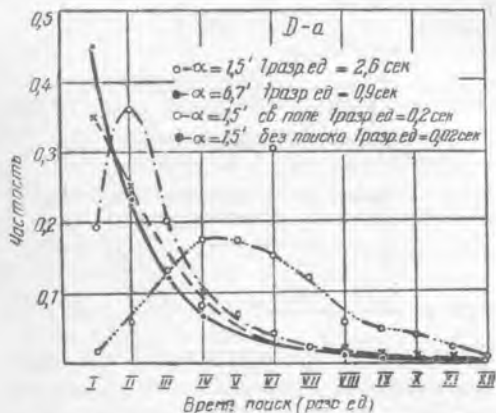
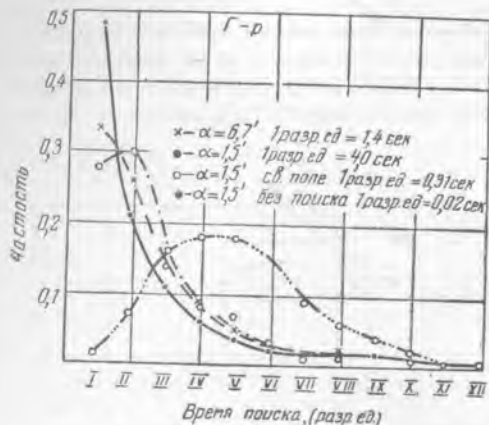


Рис. 5. Кривые распределения для зрительных задач различной сложности:

- а) наблюдатель Г.-р.
б) наблюдатель Д.-а.

6,7 на поле с мешающими кольцами, поиск и различие кольца 1,5 на свободном поле, различие (без поиска) кольца 1,5. Разумеется, для разных кривых разрядная единица времени означает разную длительность. Значения этой величины указаны на рис. 5.

Характерно, что по мере упрощения задачи форма кривой все более приближается к нормальной. Возможно, сравнение с кривой нормального распределения позволит выработать метод количественной оценки сложности зрительной задачи.

В заключение отметим еще одно обстоятельство. Как известно, нормальное распределение получается при действии многочисленных факторов, из которых каждый лишь незначительно влияет на результат. Поэтому возрастающее с усложнением задачи отклонение формы кривой вероятность — время от нормальной указывает на то, что чем сложнее задача тем меньшее число ф факторов определяет длительность ее решения.

Авторы выражают благодарность А. В. Луизову и Р. А. Сапожникову за обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Каган. О взаимосвязи пороговых значений мощности и длительности управляющего воздействия Труды ЛМИ. Сб. № 41. «Техническая кибернетика», 1964.
2. К. Шеннон. Математическая теория связи. Сб. «Работы по теории информации и кибернетике», Изд-во иностр. лит., 1963.
3. С. И. Вавилов. Микроструктура света. Изд-во АН СССР, 1950.
4. Н. И. Пинегин. Кванты света и зрение. Труды ГОИ, т. 32, вып. 161, 1963.
5. G. Verriest, M. Szmiegielski. Variation spectrale du seuil d'éclairement rétinien énergétique pour des contrastes positifs maculaires. *Peuvue d'Optique*, 45, N 7, 293—311 (1966).
6. J. Steinhardt. Intensity Discrimination in Human Eye. *Gen. Physiology*, 20, N 2, 185—209 (1936).
7. А. В. Луизов. Инерция зрения, Оборонгиз, 1961.
8. Н. Н. Гуревич, Т. Я. Штейншайдер. Работоспособность глаза при зрительном поиске. «Сб. Всесоюзного научно-исследовательского института охраны труда ВЦСПС в Ленинграде», Л., 1967.

О ПРИМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ОПИСАНИЮ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В. К. Каган

Повсеместное применение относительной спектральной чувствительности (в автоматике — амплитудно-частотной характеристики) к описанию свойств линейных систем основывается на двух обстоятельствах.

1) Произвольный сигнал на входе системы можно представить (с помощью ряда или интеграла Фурье) в виде суммы «монохроматических» составляющих, и тогда реакция на выходе системы определяется простой суперпозицией реакций, вызываемых этими составляющими.

2) Методы экспериментального определения характеристик такого рода в настоящее время достаточно хорошо разработаны. Последнее обстоятельство наводит на мысль, что относительную спектральную чувствительность можно применить и к характеристике более сложных нелинейных систем.

Чтобы разобраться в этом, нужно прежде всего выяснить, к каким системам применимо само понятие относительной спектральной чувствительности. Отправным пунктом наших рассуждений будут два возможных варианта экспериментальной методики определения этой величины.

Вариант I. На вход системы подаются синусоидальные сигналы одинаковой мощности P^1 , но различной частоты ω и измеряются реакции на выходе. Относительная спектральная чувствительность определяется как отношение реакции R при данной частоте ω к наибольшей реакции, соответствующей частоте ω_0 :

$$\varphi(\omega) = \frac{R(\omega, P_\omega)}{R(\omega_0, P_{\omega_0})}, \quad (1)$$
$$P_\omega = P_{\omega_0} = P.$$

Вариант II. На вход системы подаются синусоидальные сигналы различной частоты, но мощности подбираются так, чтобы реакции на выходе были одинаковыми. Реакции не измеряются — устанавливается только их равенство, — и относительная спектральная чувствительность определяется как отношение мощности P_ω сигнала данной частоты ω к наибольшей мощности P_{ω_0} сигнала частоты ω_0 , вызывающего такую же реакцию системы:

$$\nu(\omega) = \frac{P_\omega}{P_{\omega_0}}, \quad (2)$$
$$R(\omega, P_\omega) = R(\omega_0, P_{\omega_0}).$$

1. Либо одинаковой амплитуды, если снимается амплитудно-частотная характеристика.

По смыслу определения (1) функция $\varphi(\omega)$ не зависит от P : она сохраняет одно и то же значение при любой фиксированной для всех частот величине мощности. Чтобы это выполнялось, реакция системы на синусоидальный сигнал должна выражаться функцией вида

$$R(\omega, P_\omega) = \varphi(\omega) \Psi(P_\omega).$$

Достаточность условия (1) очевидна. Легко убедиться, что оно также и необходимо. Действительно,

$$R(\omega_0, P) = \Psi(P)$$

есть функция только одной переменной P , поскольку величина фиксирована. Независимость функции $\varphi(\omega)$ от P дает

$$\frac{\partial}{\partial P} \left[\frac{R(\omega, P)}{\Psi(P)} \right] = 0,$$

или

$$\frac{\partial R}{\partial P} \Psi - R \frac{\partial \Psi}{\partial P} = 0,$$

откуда

$$\ln R = \ln \psi + \ln \varphi,$$

т. е.

$$R = \varphi \psi,$$

где φ — произвольная функция переменной ω и есть относительная спектральная чувствительность.

Исходя из варианта II о реакции системы, можно сказать лишь, что она определяется некоторой комбинацией $f(\omega, P_\omega)$ величин ω и P_ω принимающей одинаковые значения для пар (ω, P_ω) и (ω_0, P_{ω_0}) . Реакция может выражаться любой однозначной функцией комбинации $f(\omega, P_{\omega_0})$ а может и не иметь количественного выражения (если система работает как нуль-прибор).

По смыслу определения (2) функция $U(\omega)$ определяется только отношением P_ω/P_{ω_0} но не самими этими величинами. Иными словами, так как при любом $z \neq 0$

$$\frac{P_\omega}{P_{\omega_0}} = \frac{zP_\omega}{zP_{\omega_0}},$$

из равенства

$$f(\omega, P_\omega) = f(\omega_0, P_{\omega_0})$$

должно следовать

$$f(\omega, zP_\omega) = f(\omega_0, zP_{\omega_0}).$$

Это условие и ограничивает выбор функций f . Прежде всего, при произвольных ω , ω_0 и z равенство

$$\frac{f(\omega, zP_\omega)}{f(\omega, P_\omega)} = \frac{f(\omega_0, zP_{\omega_0})}{f(\omega_0, P_{\omega_0})}$$

может выполняться только тогда, если функция $f(\omega, P_\omega)$ имеет вид

$$f(\omega, P_\omega) = v(\omega) w(P_\omega)$$

(доказательство аналогично приведенному выше).

Кроме того, функция $w(P_\omega)$ должна удовлетворять условию

$$\frac{w(zP_\omega)}{w(P_\omega)} = \frac{w(zP_{\omega_0})}{w(P_{\omega_0})},$$

из которого непосредственно следует, что она степенная (1).

Действительно, дифференцируя по z тождество

$$w(zx) = w(x) \frac{w(zy)}{w(y)},$$

имеем

$$x \frac{dw}{d(zx)} = w(x) \frac{y}{w(y)} \cdot \frac{dw(zy)}{d(zy)}.$$

Положив $z = 1$, приведем это равенство к виду

$$\frac{w'(x)}{w(x)} = \frac{1}{x} y \frac{w'(y)}{w(y)}.$$

Положив далее

$$y \frac{w'(y)}{w(y)} = r = \text{const}$$

и проинтегрировав уравнение

$$\frac{w'(x)}{w(x)} = \frac{r}{x},$$

получим

$$w(x) = \text{const } x^r.$$

Итак, функция $f(w, P_\omega)$ должна иметь вид

$$f(w, P_\omega) = \text{const } v(w) P_\omega^r. \quad (3)$$

Равенства (1) и (3) выражают необходимые и достаточные условия, при которых рассматриваемой системе можно приписывать — в том или ином смысле — относительную спектральную чувствительность. В связи с этим сделаем два замечания.

1) Для линейных и только линейных систем, у которых реакции на монохроматический поток P_ω

$$R_\omega = a_\omega P_\omega,$$

оба определения относительной спектральной чувствительности равносильны:

$$\varphi(\omega) = v(\omega) = \frac{a_\omega}{a_{\omega_0}}.$$

2) Вопреки нередко бытующему мнению существование относительной спектральной чувствительности отнюдь не связано со свойством аддитивности системы. Под аддитивностью в узком смысле понимают равенство реакции системы на сумму сигналов сумме реакций на каждый сигнал в отдельности [2]. Такая система будет просто линейной¹, а относительную спектральную чувствительность можно приписывать и нелинейным системам.

Более широкое определение аддитивности (принятое, например, в колориметрии) можно сформулировать так. Если сигнал P_1 вызывает такую же реакцию системы, как и P_1' , а P_2 такую же, как P_2' , то реакции системы на сигналы $P_1 + P_2$ и $P_1' + P_2'$ будут тоже одинаковыми.

Система, реакция которой выражается, например, функцией

$$R(\omega, P_\omega) = P_\omega + a\omega, \quad (*)$$

будет в этом смысле аддитивной. Действительно, если

$$P_1 + a\omega = P_1' + a\omega, \quad (**)$$

и

$$P_2 + a\omega = P_2' + a\omega,$$

то

$$P_1 + P_2 + a\omega = P_1' + P_2' + a\omega.$$

¹ Функциональное уравнение $f(x+y) = f(x) + f(y)$ имеет, как известно, единственное решение $f(x) = \text{const } x$.

Но такой системе нельзя приписать относительную спектральную чувствительность, поскольку равенство (*) не приводится ни к виду (1), ни к виду (3).

С другой стороны, система, реакция которой выражается, например, функцией

$$R(\omega, P_\omega) = \varphi(\omega) \sin aP_\omega,$$

очевидно, обладает относительной спектральной чувствительностью (определение 1). Но легко убедиться, что она неаддитивна. Действительно, пусть

$$aP_1 = \pi - aP'_1$$

и

$$aP_2 = \pi - aP'_2.$$

Тогда

$$\varphi(\omega) \sin aP_1 = \varphi(\omega) \sin aP'_1$$

и

$$\varphi(\omega) \sin aP_2 = \varphi(\omega) \sin aP'_2,$$

но

$$\varphi(\omega) \sin a(P_1 + P_2) = -\varphi(\omega) \sin a(P'_1 + P'_2) \neq \varphi(\omega) \sin a(P'_1 + P'_2).$$

Приступая теперь к основному вопросу о возможности применить относительную спектральную чувствительность к описанию свойств нелинейной системы, рассмотрим в качестве примера некоторые данные о работе глаза.

Применяя подход, развитый в цикле работ Ю. П. Шабанова-Кушнаренко по математическому моделированию функций зрения, будем рассматривать входной сигнал — световой поток как m -мерный вектор, компонентами которого, являются квазимонохроматические излучения в спектральных интервалах, в пределах каждого из которых глаз неселективен¹. Каждой компоненте P_ω входного сигнала соответствует трехмерный вектор $[r(\omega), P_\omega; q(\omega)P_\omega; b(\omega)P_\omega]$ и таким образом m -мерный вектор P преобразуется в матрицу из m строк и трех столбцов. Далее эта матрица вновь преобразуется в трехмерный цветовой вектор с компонентами

$$B_r = \Sigma r(\omega) P_\omega,$$

$$B_g = \Sigma g(\omega) P_\omega,$$

$$B_b = \Sigma b(\omega) P_\omega$$

(математическая модель цветового зрения согласно законам Грассмана). Основываясь на законе Вебера-Фехнера, можно предположить, что реакция на выходе — зрительное ощущение характеризуется трехмерным вектором S , компоненты которого пропорциональны логарифмам компонент вектора B .

Рассмотренный пример позволяет высказать некоторые общие соображения о применении характеристик типа относительной спектральной чувствительности к описанию свойств возможно более широкого класса систем.

Разбив полосу частот на интервалы, в пределах каждого из которых система неселективна, мы всегда можем представить сигнал в виде m -мерного вектора P . Пусть ω_k — частота, соответствующая интервалу неселективности $\Delta\omega_k$ и P_k — компонента вектора, где P — мощность

¹ Напомним, что излучения монохроматические в строгом смысле существовать не могут и мы должны исходить из определения, соответствующего реальным условиям физического эксперимента.

сигнала в этом интервале. Очевидно, свойства системы можно описать при помощи относительной спектральной чувствительности, если

1) система преобразует m -мерный вектор $\{P_k\}$ в матрицу $\{Q_{kl}\}$ из m строк и n столбцов, причем элемент Q_{kl} выражается через P_k функцией вида

$$Q_{ke} = \varphi_e(\omega_k) \Psi_e(P_k)$$

либо

$$Q_{ke} = F_e[v_e(\omega) P_k^r];$$

2) реакция R на выходе системы либо величина, ее определяющая, получается из элементов матрицы $\{Q_{ke}\}$ по известному закону (этот закон может быть и вероятностным).

Заметим, что множество реакций системы на всевозможные сигналы не обязательно должно быть упорядоченным: работая как пулл прибор, система будет устанавливать лишь «равенство» или «неравенство» двух сигналов.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ, ЗАДАННЫХ ПОЛНЫМ НАБОРОМ ПРИЗНАКОВ

В. А. Ловицкий

Одной из типовых задач, встречающихся при обработке больших объектов информации, представленной на естественном языке (машинный перевод, поиск научно-технической информации и т. п.), является нахождение слов в словаре.

При решении подобных задач применяются различные искусственные приемы и способы расположения информации в запоминающих устройствах машин [1, 2], повышающие эффективность ее поиска, а также различные методы представления самих процессов поиска и обработки материала. С целью получения наиболее эффективного механизма поиска данных в запоминающих устройствах вычислительных машин необходимо обратиться к изучению памяти человека.

Память человека можно рассматривать как кибернетическую систему, обрабатывающую информацию по определенным законам, строгое описание которых средствами современной науки в настоящее время вызывает значительные затруднения. В связи с этим особый интерес представляет метод эвристического моделирования [3] как способа исследования сложных форм психической деятельности на уровне информационных процессов.

Цель наших исследований заключается в выявлении законов переработки информации вербальной системой памяти и в применении этих законов для решения различных типов информационно-логических задач.

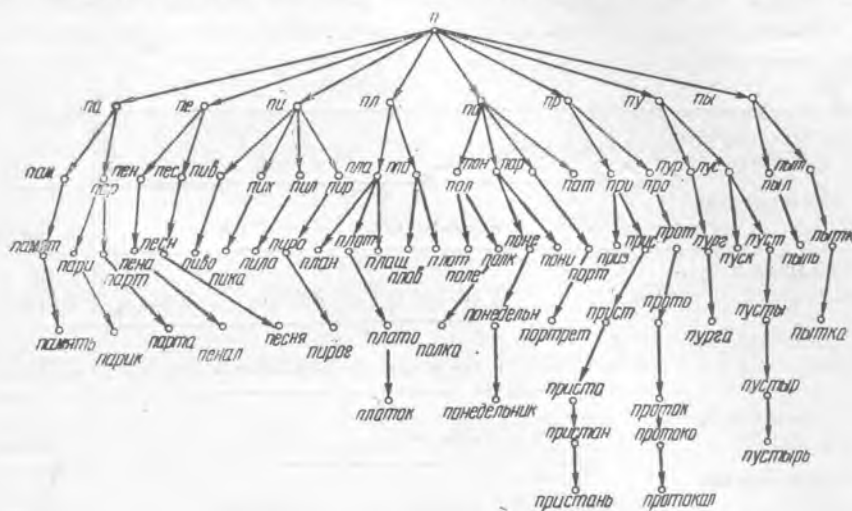
В данной работе исследуется алгоритм поиска информации человеком. Приводится пример, показывающий, что использование человеком особенностей поиска информации биологической системой позволяет существенно сократить время поиска за счет уменьшения числа сравнений, необходимых для нахождения искомого объекта. В примере алгоритм поиска описан на языке ассоциативного программирования [4], основанного на использовании АЛГОЛа и его расширения — АЛГЭМа. Основным отличием языка ассоциативного программирования (АП) от языков списковой обработки данных ЛИСП, ИПЛ-5, ФЛПЛ, АЛП и других является непосредственная связь языка АП с АЛГОЛом.

Для изучения алгоритма поиска информации человеком был проведен элементарный психологический эксперимент, заключающийся в том, что испытуемый в ответ на последовательное предъявление экспериментатором буквосочетаний, составленных из одной, двух, трех и т. д. букв должен был отвечать словом, начало которого представляет собой показанное буквосочетание. Буквосочетания получают из слова путем последовательного отделения сначала первой буквы, затем первых двух, первых трех и т. д. Результаты эксперимента сведены в табл. 1 и представлены в виде дерева на рисунке. Всего было проведено восемь опытов по предъявлению буквосочетаний, состоящих из одной, двух, трех и четы-

рых букв. По таблице строится дерево таким образом, что корнем его служит первая буква всех воспроизведенных слов; от нее ответвляются вершины, представляющие собой две первые буквы воспроизведенных слов, и т. д.

Анализ результатов, полученных в данном эксперименте, позволяет заключить следующее:

1) при поиске слова в памяти человека выделяется определенная древовидная структура, корнем которой служит начальная буква слова:



2) поиск слова, начинающегося на определенное буквосочетание, осуществляется по принципу воспроизведения недостающих букв, имеющих максимальный вес (под весом буквы понимается частота ее встречаемости на определенном месте и после определенного сочетания букв во входных словах). Воспроизведенные недостающие буквы дополняют предъявленное буквосочетание до слова, представляющего собой модель предъявляемого слова;

3) поиск слова — это активный процесс, который заключается в том, что при предъявлении первой буквы слова у испытуемого возникает модель предъявляемого слова, начинающегося с указанной буквы. По мере дальнейшего предъявления двух первых букв слова, трех первых букв и т. д. происходит коррекция модели до полного совпадения с предъявляемым словом. Возможны случаи (см. опыт I, табл. I), когда предъявленное слово не совпадает полностью с моделью, но обязательно входит в модель предъявленного слова.

Вернемся к задаче поиска слов в словаре. Покажем, что скорость поиска слов в древовидном словаре можно существенно увеличить, если учитывать вес букв. Опишем структуру древовидного словаря.

Все данные, хранящиеся в памяти машины, представлены в виде списков. Список — это группа последовательно расположенных данных. Последовательный способ построения списков выбран исключительно для простоты организации данных. Некоторые члены списка могут указывать на ответвления к другим спискам, называемых под списками. Любой список со всеми отходящими от него под списками называется списковой структурой. Списковая структура имеет древовидный характер. В вершине такой структуры располагается список 1-го слоя.

осуществляющий деление всех объектов по одному какому-либо признаку. От членов этого списка отходят подспики 2-го слоя, соответствующие делению объектов по другому признаку, и т. д. В нашем случае объектами являются слова естественного языка. Каждое слово характеризуется определенным количеством признаков: начальная буква слова, вторая буква и т. д., т. е. число признаков соответствует количеству букв в слове. Каждый признак способен принимать определенное число значений, например, первой буквой слова в русском языке может быть любая буква алфавита, кроме Ъ, Ь, Ы. Различные значения одного и того же признака несовместимы, в то время как различные признаки являются совместными.

Таблица 1

1	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПА	3 ПАР	4 ПАРИ
	Воспроизведенные слова	1 ПИКА	2 ПАМЯТЬ	3 ПАРТА	4 ПАРИК
2	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПЕ	3 ПЕН	4 ПЕНА
	Воспроизведенные слова	1 ПИРОГ	2 ПЕСНЯ	3 ПЕНАЛ	4 ПЕНА
3	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПИ	3 ПИЛ	4 ПИЛА
	Воспроизведенные слова	1 ПИЛА	2 ПИЛА	3 ПИЛА	4 ПИЛА
4	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПЛ	3 ПЛА	4 ПЛАЩ
	Воспроизведенные слова	1 ПИР	2 ПЛОВ	3 ПЛАТОК	4 ПЛАЩ
5	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПО	3 ПОН	4 ПОНИ
	Воспроизведенные слова	1 ПЛОТ	2 ПОРТРЕТ	3 ПОНЕДЕЛЬНИК	4 ПОНИ
6	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПУ	3 ПУС	4 ПУСК
	Воспроизведенные слова	1 ПОТ	2 ПУРГА	3 ПУСТЫРЬ	4 ПУСК
7	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПР	3 ПРИ	4 ПРИЗ
	Воспроизведенные слова	1 ПРЕСС	2 ПРЕСС	3 ПРИСТАНЬ	4 ПРИЗ
8	Предъявляемые буквосочетания	1 П	2 ПЫ	3 ПЫЛ	4 ПЫЛЬ
	Воспроизведенные слова	1 ПОЛЕ	2 ПЫТКА	3 ПЫЛ	4 ПЫЛЬ

Поиск слова, заданного полным набором признаков, начинается с просмотра списка первого слоя. В этом списке отыскивается буква,

имеющая значение, соответствующее значению первого признака (начальной буквы слова) в заданном наборе. По найденному значению признака вычисляется адрес подсписка, отходящего от найденной буквы. В этом подсписке находится буква, имеющая значение, соответствующее значению второго признака, и т. д.

Если число значений каждого признака равно k , то в любом подсписке i -го слоя для нахождения искомого значения признака необходимо выполнить $\mu_i k$ сравнений. Так как в подсписке может быть только одна буква с искомым значением признака, то просмотр каждого подсписка нужно вести до встречи с буквой, имеющей заданное значение проверяемого признака, и поэтому $\mu_i \leq 1$.

Общее количество сравнений S , которое необходимо выполнить для нахождения слова, заданного последовательностью из n признаков, равно

$$S = \sum_{i=1}^n \mu_i k.$$

Из описанного выше психологического эксперимента (пункт 2) видно, что для сведения μ_i , а следовательно, и S , к минимуму, необходимо располагать буквы в подсписках древовидной структуры в порядке убывания их веса.

Формат списка выбирается с таким расчетом, чтобы весь список помещался в полную ячейку машины «Урал-2», имеющую 40 двоичных разрядов. Каждый список состоит из членов списка (ЧС) и соответствующего каждому ЧС признака конечной буквы (КБ) слова. В свою очередь, ЧС состоит из кода буквы последовательного списка (БПС) и веса БПС (ВБПС). Величина ВБПС определяется частотой встречаемости этой буквы в словах входной информации.

Ниже показан формат последовательного списка.

ЧС1			ЧС2			ЧС3			ЧС4		
КБ1	БПС1	ВБПС1	БПС2	ВБПС2	БПС3	ВБПС3	БПС4	ВБПС4	КБ2	КБ3	КБ4

Рассмотрев структуру древовидного словаря, перейдем к описанию типовых процедур, используемых при составлении алгоритма поиска слов. Сам алгоритм представлен в виде описания типовой процедуры. Описания процедур приводятся не изолированно, а в виде перечня описаний процедур, входящих в состав описаний некоторого блока программы.

Идентификаторы НБ, ВНБ, ЗПБПС, ЗП, ПСДС, АНС, БВС, БВЫСЛ, СЧС, АПС, АРПС и БСМВ обозначают соответственно начальную букву, вес начальной буквы, значения признаков букв подсписка, значение признака, подсписк древовидного словаря, адрес начального списка, букву входного слова, букву выходного слова, счетчик числа сравнений, адрес последовательного списка, адрес рабочего последовательного списка и букву с максимальным весом, а идентификаторы n, k, v — рабочие переменные.

Начало целые f, r, t ; ввод (f); ввод (r); ввод (t);

начало список последовательный список;

составной ЧС; целые БПС вид 1(6), ВБПС вид 1(3) уровень: логический КБ уровень;

список ВХОДНОЕ СЛОВО; целые БВС вид 1(6) уровень;

список НАЧАЛЬНЫЕ БУКВЫ; составной ЧС; целые НБ вид 1(6),

ЕНБ вид 1 (3) уровень; логический КБ уровень;
 целые массивы ЗП [1:f], АНС [1:f], БВС [1:f], БПС [1:f]
 БВЫХСЛ [1:f], ЗПБПС [1:f],
 целые АПС вид 1(20), АРПС вид 1(20), АРПС вид 1(20),
 ПСДС вид 1(20), n вид 1(20), k вид 1(20), v вид 1(20),
 БСМВ вид 1(20), СЧС вид 1(20);
 — ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СПИСОК $\neg$ = АПС = АРПС1 = АРПС2 =
 ПСДС; процедура ДЛИНВХОДСЛОВ (l , b);
 примечание производится определение длины входного слова (ДЛИН-
 ВХОДСЛОВ). Число букв входного слова (ВС) присваивается
 величине n ;
 значения l , b ; целые l , b ;
 ВХОДНОЕ СЛОВО $\neg$ = АПС;
 начало целые i , m ;
 $m := l + b$;
 для $i := 1$ шаг 1 до f цикл
 начало если $(l:m) \sqsubset$ АПС $\neg$ = 0 то
 $n := i - 1$ перейти к M конец;
 $l := m + 1$; $m := l + b$ конец
 M : конец
 процедура РАЗДЕЛЕНИЕ (p , l , b , c , РЯ);
 примечание производится разделение последовательного списка
 на БПС или на ВБПС. Значение БПС или ВБПС присваивается
 величинам массива РЯ;
 значения p , l , b , c , целые p , l , b , c ; массив РЯ;
 начало целые i , m ;
 $m := l + b$;
 для $i := 1$ шаг 1 до p цикл
 начало РЯ [i] := $(l:m) \sqsubset$ АПС $\neg$; $l := m + c$;
 $m := l + b$ конец
 конец;
 процедура УЗНАВАНИЕ (p , РЯ);
 примечание производится поиск буквы входного слова (БВГ) в списке
 буквы которого расположены в ячейках массива РЯ;
 значение p ; целое p ; массив РЯ;
 начало целое i ;
 для $i := 1$ шаг 1 до p цикл
 если РЯ [i] = БВС [v] то
 $k := i$; перейти к C конец;
 перейти к B ;
 конец;
 процедура ВЫЧАД (h , A);
 примечание производится вычисление адреса (ВЫЧАД) подписка в $h + 1$
 слое поискового дерева по h значениям признаков. Значения при-
 знаков расположены в ячейках массива ЗП;
 значения h , целые h , A ;
 начало целые i , a ;
 $a := 0$;
 для $i := 1$ шаг 1 до h цикл
 $a := a \times r + \text{ЗП}[i]$;
 $A := \text{АНС}[v] + 2 \times a$
 конец;
 процедура МАКСВЕГ (p , МВ);
 примечание производится выделение в последовательном списке с ад-
 ресом АПГ буквы с максимальным весом (МАКСВЕС). Список пред-

варительно разделен на буквы, которые хранятся в ячейках массива БПС, и на их веса, которые размещены в ячейках массива ВБПС. Значение буквы с максимальным весом присваивается величине БСМВ, а место расположения этой буквы в последовательном списке-величине k ;

значение p ; целые p , МВ;

начало целое i ;

МВ: = 0;

для $i := 1$ шаг 1 до p цикл

если ВБПС [i] $\geq$ МВ то

начало МВ: = ВБПС [i]; $k := i$;

БСМВ: = БПС [i] конец

конец;

процедура РАСБУКВПОУБВЕС (p , d , b , c , q , РАЗДЕЛЕНИЕ, МАКСВЕС);

примечание производится распределение букв по убывающим весам (РАСБУКВПОУБВЕС). Буквы заданы в виде последовательного списка с адресом, равным АПС. Новой последовательности присваивается адрес АРПС1;

значения p , d , b , c , q ; целые p , d , b , c , q ; процедуры РАЗДЕЛЕНИЕ, МАКСВЕС;

начало целые i , l , m , j , $l1$, $l2$, $b1$, $b2$, $c1$, $c2$;

РАЗДЕЛЕНИЕ (p , $l1$, $b1$, $c1$, БПС);

РАЗДЕЛЕНИЕ (p , $l2$, $b2$, $c2$, ВБПС);

для $i := 1$ шаг 1 до p цикл

начало МАКСВЕС (p , МВ); $l := (i - 1) \times d + q$;

$m := l + b$; ($l : m$) $\lfloor$ АРПС1 $\rfloor :=$ БСМВ; $l := m + 1$;

$m := l + c$; ($l : m$) $\lfloor$ АРПС1 $\rfloor := k$;

для $j := 1$ шаг 1 до p цикл

если $j = k$ то

начало ВБПС [j] := 0 перейти к F конец;

F : конец

конец;

процедура ПОИСК 1 (ДЛИНВХОДСЛОВ, РАЗДЕЛЕНИЕ, УЗНАВАНИЕ, ВЫЧАД);

примечание производится поиск входного слова в словаре. Буквы в подписках словаря расположены без учета их веса. Количество сравнений, которое было выполнено для нахождения входного слова в словаре, присваивается величине СЧС;

процедуры ДЛИНВХОДСЛОВ, РАЗДЕЛЕНИЕ, УЗНАВАНИЕ, ВЫЧАД;

начало $\lfloor$ АПС $\rfloor :=$ ВХОДНОЕ СЛОВО; ДЛИНВХОДСЛОВ (1,5);

РАЗДЕЛЕНИЕ (n , 1, 5, 1, БВС); $\lfloor$ АПР $\rfloor :=$ НАЧАЛЬНЫЕ БУКВЫ; СЧС: = 0;

для $v := 1$ шаг 1 до n цикл

начало РАЗДЕЛЕНИЕ (r , 1, 5, 4, БПС); УЗНАВАНИЕ (r , БПС);

С: СЧС: = СЧС + k ; ЗП [v] := $k - 1$;

ВЫЧАД (v , АПС) конец; вывод (СЧС);

V : конец;

процедура САМООБУЧЕНИЕ (РАСБУКВПОУБВЕС);

примечание производится распределение букв в j -м ($j = 1, 2, \dots, r^{i-1}$) подписке i -го ($i = 1, 2, \dots, t$) слоя древовидного словаря в порядке убывания их веса;

процедура РАСБУКВПОУБВЕС;

начало целые i , j , z ;

$z := 0$;

для $i := 1$ шаг 1 до t цикл
 начало $z := z \times r + \text{entier}\left(\frac{1}{i}\right)$;
 для $j := 1$ шаг 1 до z цикл
 если $\lfloor \text{ПСДС}[i, j] \rfloor \neq 0$ то
 начало $\lfloor \text{АПС} \rfloor := \lfloor \text{ПСДС}[i, j] \rfloor$; РАСБУКВПОУБВЕС
 $(r, d, b, c, q, \text{РАЗДЕЛЕНИЕ}, \text{МАКСВЕС}), \lfloor \text{ПСДС}[i, j] \rfloor :=$
 $= \lfloor \text{АРПС1} \rfloor$
 конец
 конец
 конец;
 процедура ПОИСК2 (ДЛИВХОДСЛОВ, РАЗДЕЛЕНИЕ, УЗНАВАНИЕ,
 ВЫЧАД);
 примечание производится поиск входного слова в словаре после его
 «самообучения». Количество сравнений, которое было выполнено для
 нахождения входного слова в словаре, присваивается величине СЧС;
 процедуры ДЛИВХОДСЛОВ, РАЗДЕЛЕНИЕ, УЗНАВАНИЕ,
 ВЫЧАД;
 начало $\lfloor \text{АПС} \rfloor := \text{ВХОДНОЕ СЛОВО}$; ДЛИВХОДСЛОВ (1,5);
 РАЗДЕЛЕНИЕ ($n, 1, 5, 1, \text{БВС}$); $\lfloor \text{АПС} \rfloor := \text{НАЧАЛЬНЫЕ}$
 БУКВЫ; СЧС := 0;
 для $v := 1$ шаг 1 до n цикл
 начало РАЗДЕЛЕНИЕ ($r, 1, 5, 4, \text{БПС}$); РАЗДЕЛЕНИЕ ($r, 7, 2,$
 $7, \text{ЗПБПС}$);
 УЗНАВАНИЕ ($r, \text{БПС}$);
 $\text{СЧС} := \text{СЧС} + k$; $\text{ЗП}[v] := \text{ЗПБПС}[v] - 1$;
 ВЫЧАД ($v, \text{АПС}$) конец; вывод (СЧС)
 В : конец
 конец
 конец

Приведенные алгоритмы ПОИСК1 и ПОИСК2 были реализованы на ЭВМ «УРАЛ-2» в вычислительном центре Харьковского института радиозлектроники.

Древовидный словарь был построен путем распределения слов 40 предложений в памяти ЭВМ. Входные предложения составлены из 72 различных слов. Согласно описанным алгоритмам осуществлялся ПОИСК1 слов восьми предложений, состоящих из 31 (17) четырехбуквенного слова, семи (четыре) трехбуквенных и одного однобуквенного слова. В скобках указано число различных слов. При поиске слов без «самообучения» словаря было выполнено 306 сравнений, т. е. $S_1 = 306$. После «самообучения» словаря ПОИСК2 дал $S_2 = 263$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Лозинский. Внутренняя сортировка информации при ограниченной памяти. Ж. «Кибернетика», 1965, № 3.
2. А. Н. Лук, С. А. Талаев. Системы памяти с адресацией по содержанию. Сб. «Некоторые проблемы биоккибернетики и применение электроники в биологии и медицине», вып. 2, К., 1967.
3. Н. М. Амосов и др. Эвристические методы в моделировании психики. Сб. «Некоторые проблемы биоккибернетики и применение электроники в биологии и медицине», вып. 3, К., 1967.
4. А. И. Китов. Программирование информационно-логических задач. «Сов. радио», М., 1967.

О ЦЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

В. А. Ловицкий

Одной из наиболее сложных задач машинной обработки информации является автоматическое составление рефератов текстовых сообщений. Сложность формализации этого процесса обусловлена необходимостью выделять основное содержание текста, т.е. осуществлять его прагматический анализ. В настоящей статье рассматривается система, обладающая ограниченным объемом «знаний» и оценивающая входную информацию с точки зрения этих «знаний».

Ранее нами была предложена модель некоторых процессов переработки информации вербальной системой памяти и высказано предположение о структуре ее памяти [1]. Второй уровень памяти этой модели (память на последовательности слов) можно интерпретировать как систему, множество возможных состояний которой задано в виде конечного множества $\Xi = \{W_1, W_2, \dots, W_q\}$. В каждый момент времени система характеризуется одним и только одним из этих состояний.

Пусть $H = \{F_1, F_2, \dots, F_h\}$ есть конечное множество последовательностей состояний, определяющее в процессе обучения пути переходов системы из одного состояния в другое и вероятности этих переходов. Таким образом, обучение системы сводится к анализу последовательностей состояний, заданных множеством H , и к учету результатов этого анализа. В процессе обучения формируется тот объем знаний, который позволяет системе осуществлять оценку входной информации.

Последовательности состояний $F_i (F_i \in H, i = 1, 2, \dots, h)$ назовем **смысловыми**. Любая из этих последовательностей начинается с начального состояния. Задано конечное множество $\Psi (\Psi \subset \Xi)$ начальных состояний. Каждая последовательность заканчивается состоянием $W_k (W_k \in \Xi)$, называемым **конечным**, или **поглощающим**.

Функционирование системы заключается в последовательном переходе из одного состояния в другое, начиная с состояния $W_{i_0} (W_{i_0} \in \Psi)$. Каждый такой переход называется шагом процесса. Обозначим переход системы из состояния W_i в состояние W_j через $W_i \rightarrow W_j$. Начальное состояние задается посредством некоторого случайного выбора, дающего состояние W_{i_0} с вероятностью P_{j_0} . При переходе системы в состояние W_k ее функционирование заканчивается.

Рассмотрим функционирование системы при условии, что вероятность перехода системы из состояния W_i в состояние W_j зависит только от состояния W_i , из которого она исходит в процессе рассматриваемого перехода. Эта зависимость задается числами p_{ij} , представляющими вероятность того, что в данный момент времени система находится в состоянии W_j при условии, если предыдущий момент времени она находилась в состоянии W_i . Вероятности перехода p_{ij} могут быть расположены

в матрицу вероятностей перехода, у которой сумма элементов каждой строки равна единице, т.е.

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^q p_{ij} = q,$$

где первый индекс означает номер строки, а второй — номер столбца.

Обозначим вероятность перехода системы из состояния W_{i_s} ($W_{i_s} \in \Psi$) в состояние W_k за m шагов через $p_{i_s k}^{(m)}$. Вероятность того, что переход свершился за m шагов по некоторому фиксированному пути, равна

$$p_{i_s k}^{(m)} = p_{i_s} \prod_{i=0}^{m-1} p_{i i_{i+1}}, \quad (1)$$

где

$$p_{i_{m-1} i_m} = p_{i_{m-1} k}.$$

Будем считать, что состояние W_k достижимо из состояния W_{i_s} если существует такое $m \geq 0$, что $p_{i_s k}^{(m)} > 0$.

Определение. Множество состояний G называется замкнутым, если никакое состояние вне G не может быть достигнуто ни из какого состояния, входящего в G . Наименьшее замкнутое множество, содержащее G , называется замыканием G .

Если некоторое состояние W_k образует замкнутое множество, то оно называется поглощающим состоянием, т.е. $p_{kk} = 1$. Мы будем рассматривать систему, имеющую только одно поглощающее состояние, равно W_k .

Таким образом, функционирование системы, при данном условии, можно рассматривать как марковский процесс с одним поглощающим состоянием.

Рассмотрим конкретную систему, множество возможных состояний которой задано в виде множества $\Xi = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$. Зададимся конечным множеством обучающих последовательностей $H = \{1 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow 11, 1 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 11, 1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 11, 10 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 11\}$. Для данной системы множество начальных состояний имеет вид $\Psi = \{1, 10\}$, а конечное состояние равно 11. Каждому элементу множества H соответствует вес, определяющий число предъявлений системе при обучении данной последовательности. В табл. 1 указаны два распределения весов A и B для каждой последовательности. Систему, обученную заданным последовательностям с A распределением весов, назовем системой A , соответственно систему B распределением весов — системой B . На рис. 1 изображена система A , представленная в виде сети, в которой связи между элементами указаны сплошными линиями. Элементами этой сети служат возможные состояния данной системы.

В результате обучения элементы сети и возникшие между элементами связи приобрели определенный вес, который обозначим соответственно через $P_{эл}$ и $P_{св}$. Если от какого-то элемента сети отходит n связей, то для этого элемента $P_{эл} = \sum_{i=1}^n P_{св_i}$. Зная вес элемента W_i и вес связи между элементами W_i и W_j определим вероятность перехода

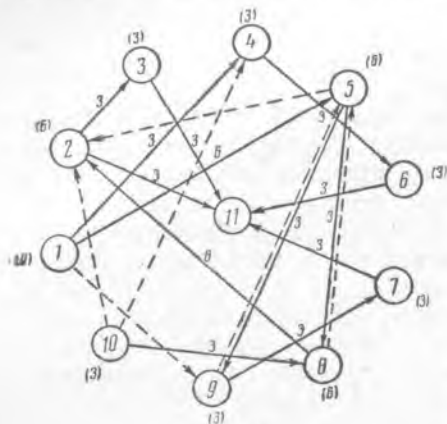


Рис. 1.

$W_i \rightarrow W_j$ следующим соотношением:

$$p_{ij} = \frac{P_{св_i \rightarrow j}}{P_{эл_i}}.$$

Матрицы вероятностей перехода систем A и B представлены в табл. 2.

Таблица 1

№ пп	Обучающие последо- вательности	Вес	
		A	B
1	1 → 5 → 8 → 2 → 11	3	5
2	1 → 5 → 9 → 7 → 11	3	3
3	1 → 4 → 6 → 11	3	2
4	10 → 8 → 2 → 3 → 11	3	2

Вероятности послед. I и II	Система	
	A	B
p_{01}	$\frac{1}{6}$	$\frac{5}{14}$
p_{011}	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{10}$

Таблица 2

Система A											
Состоя- ния Сос- тоя- ния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	0	0	0	0
2	0	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Система B											
Состоя- ния Сос- тоя- ния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	$\frac{1}{5}$	$\frac{4}{5}$	0	0	0	0	0	0
2	0	0	$\frac{2}{7}$	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{5}{7}$
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{8}$	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Будем считать, что объем «знаний» системы в какой-то определенной области задан в виде двух последовательностей: $(1 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow 11$ и

1→5→9→7→11). Эти последовательности обозначим соответственно через I и II.

На рис. 2 изображено дерево, позволяющее проследить все возможные пути переходов системы из начального состояния I в конечное состояние II. Жирными линиями очерчены последовательности состояний I и II. Дерево построено по данным табл. 2.

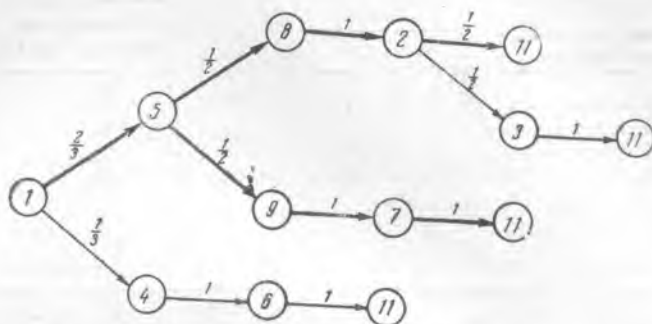


Рис. 2.

Задача обученной системы заключается в оценке предъявляемых последовательностей, т. е. в составлении «своего мнения». Мету ценности информации будем определять по Харкевичу [2] как двоичный логарифм отношения вероятностей достижения цели до и после получения информации, т. е.

$$\tilde{I} = \log_2 \frac{p_1}{p_0}, \quad (2)$$

где $\tilde{I}$ — мера ценности входной информации;

p_1 — вероятность достижения цели после получения информации;

p_0 — вероятность достижения цели до получения информации.

Для нашей модели значения p_1 и p_0 будем определять по формуле (1), в которой число шагов m известно заранее и $p_n = 1$, так как начальное состояние системы фиксировано.

Рассмотрим два варианта оценки системой входных последовательностей. При первом варианте как система A , так и система B поочередно оценивает каждую предъявляемую последовательность относительно последовательностей I и II, для которых значения p_{0I} и p_{0II} приведены в табл. 1. Предъявляемые последовательности будем считать смысловыми, т. е. принадлежащими некоторому конечному множеству смысловых последовательностей Θ , причем $N \subset \Theta$.

Системы A и B введены для того, чтобы показать зависимость возможностей системы от обучения. Суть обучения заключалась в том, что одним и тем же последовательностям уделялось различное внимание. Так, например, при обучении первой последовательности (см. табл. 1) система A повторила ее три раза, а система B — пять раз. Как сказались результаты обучения на возможностях систем, видно из табл. 3.

Первая предъявляемая последовательность (см. табл. 3) составлена из тех же элементов, что и последовательности I и II, но элементы в этой последовательности расположены в новом для I и II порядке. Каждая из последовательностей и система в целом оценивает эту последо-

вательность как отрицательную (см. табл. 3, значения $\tilde{I}_I$, $\tilde{I}_{II}$ и $\tilde{I}_Z$). Величина I_Z определяется как сумма $\tilde{I}_I$ и $\tilde{I}_{II}$, т. е. $\tilde{I}_Z = \tilde{I}_I + \tilde{I}_{II}$.

Таблица 3

№ п/п	Предъявляе- мые после- довательности	Система А					Система В				
		p_I	p_{II}	$\tilde{I}_I$	$\tilde{I}_{II}$	$\tilde{I}_Z$	p_I	p_{II}	$\tilde{I}_I$	$\tilde{I}_{II}$	$\tilde{I}_Z$
1	1 → 9 → 5 → → 2 → 11	$\frac{36}{245}$	$\frac{27}{140}$	-0,20	-0,60	-0,80	$\frac{10}{33}$	$\frac{2}{11}$	-0,24	-0,72	-0,96
2	10 → 4 → 6 → 11	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	$\frac{5}{14}$	$\frac{3}{10}$	0	0	0
3	10 → 8 → 5 → → 9 → 7 → 11	$\frac{6}{49}$	$\frac{8}{21}$	-0,45	+0,18	-0,27	$\frac{5}{16}$	$\frac{16}{45}$	-0,20	+0,26	+0,06
4	10 → 8 → 2 → 11	$\frac{4}{21}$	$\frac{1}{3}$	+0,18	0	+0,18	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{10}$	+0,08	0	+0,08
5	1 → 5 → 9 → → 7 → 11	$\frac{3}{20}$	$\frac{2}{5}$	-0,15	+0,26	+0,11	$\frac{25}{77}$	$\frac{4}{11}$	-0,15	+0,28	+0,13
6	10 → 2 → 3 → 11	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	-0,22	0	-0,22	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{10}$	-0,20	0	-0,20

Последовательность будем называть положительной, отрицательной или нулевой, если мера ценности, определенная для этой последовательности, будет иметь соответственно знак плюс или минус либо будет равна 0. Условимся трактовать отрицательную меру ценности как несогласие системы с предъявленной последовательностью, а положительную — как согласие. Система может оценить положительно такую последовательность, которая, во-первых, представляет собой одну из последовательностей I или II (см. табл. 3 пятую последовательность), во-вторых, является новой последовательностью, т. е. включающей в себя как новые элементы, отличающиеся от элементов, из которых составлены последовательности I и II, так и новые связи между элементами (см. табл. 3 третью последовательность, предъявленную системе В).

Вторая последовательность, предъявляемая системе, включает в себя новые элементы, чем последовательности I и II. Эта последовательность оценивается системой как нулевая, т. е. не имеющая ничего общего с той областью «знаний», относительно которой и оцениваются все входные последовательности.

Третья последовательность наглядно показывает, как обучение системы определяет ее возможности. Так, система А «считает», что мера ценности данной входной последовательности отрицательна, а система В — что она положительна.

Четвертая, пятая, шестая и описанная выше третья последовательности приведены с целью показать, что «мнение» системы составляется в результате разрешения внутренних противоречий между последовательностями I и II.

Второй вариант оценки системой входных последовательностей заключается в том, что независимо от того, согласна или несогласна система с предъявленной последовательностью, она запоминает ее. Оценка последующих входных последовательностей осуществляется относительно тех же последовательностей I и II, для которых значения p_{0I} , p_{0II} и p_{1II} меняются с запоминанием каждой новой входной последо-

вательности. Выражение (2) для определения, например, $\tilde{I}_1$ во втором варианте принимает следующий вид:

$$\tilde{I}_{i+1} = \log_2 \frac{p_{1i+1}}{p_{1i}},$$

где $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

На рис. 1 новые связи между элементами, возникшие в результате дообучения системы в процессе оценки входных последовательностей, изображены пунктирными линиями.

В табл. 4 приведены результаты второго варианта оценки входных последовательностей системами А и В. Обращает внимание тот факт, что система А, оценив первую последовательность как отрицательную, но затем запомнив ее, оценивает третью входную последовательность уже как положительную.

Таблица 4

№ п/п (i)	Предъявляе- мые последо- вательности	Система А					Система В				
		p_{11}	p_{111}	$\tilde{I}_1$	$\tilde{I}_{11}$	$\tilde{I}_2$	p_{11}	p_{111}	$\tilde{I}_1$	$\tilde{I}_{11}$	$\tilde{I}_2$
1	1 → 9 → 5 → → 2 → 11	$\frac{36}{245}$	$\frac{27}{140}$	-0,20	-0,60	-0,80	$\frac{10}{33}$	$\frac{2}{11}$	-0,24	-0,72	-0,96
2	10 → 4 → 6 → 11	$\frac{36}{245}$	$\frac{27}{140}$	0	0	0	$\frac{10}{33}$	$\frac{2}{11}$	0	0	0
3	10 → 8 → 5 → → 9 → 7 → 11	$\frac{27}{245}$	$\frac{6}{25}$	-0,42	+0,67	+0,25	$\frac{21}{88}$	$\frac{64}{275}$	-0,34	+0,37	+0,03
4	10 → 8 → 2 → 11	$\frac{63}{512}$	$\frac{6}{25}$	+0,15	0	+0,15	$\frac{224}{891}$	$\frac{64}{275}$	+0,07	0	+0,07
5	1 → 5 → 9 → → 7 → 11	$\frac{245}{2112}$	$\frac{175}{594}$	-0,10	+0,30	+0,20	$\frac{10}{297}$	$\frac{25}{88}$	-0,09	+0,28	+0,19
6	10 → 2 → 3 → 11	$\frac{245}{2376}$	$\frac{175}{594}$	-0,21	0	-0,21	$\frac{21}{99}$	$\frac{25}{88}$	-0,15	0	-0,15

В настоящее время на основе использования изложенной выше методики расчета меры ценности информации составляется программа для машины «Урал-2», которая позволит существующей системе ЭВИВС (Элементарное Восприятие и Воспроизведение Слов) [1] оценивать отдельные входные предложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Ловицкий. Алгоритм ассоциативного поиска информации в вербальной системе памяти. II Украинская конференция по бионике. Тезисы докладов, К., 1968.
2. А. А. Харкевич. О ценности информации. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 4, М., 1960.

НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗРЕНИЯ

Г. С. Грушко

В работе Ю. П. Шабанова-Кушнаренко, В. Л. Рвачева и А. Г. Мурашко «Математичні моделі зору» (вид-во «Техніка», К., 1966) рассматривается математическая модель зрения.

Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$a \frac{\partial B}{\partial t} = b^2 \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) - B + kE, \quad (1)$$

где E — яркость зрительной картины. B — яркость зрительного ощущения, a — коэффициент инерции зрения, b — коэффициент иррадиации зрения, k — коэффициент усиления. Коэффициенты a , b и k — постоянные.

Уравнение (1) представляет собой уравнение теплопроводности для однородной среды с постоянным коэффициентом теплопроводности.

Однако в той же работе [1] указывается, что параметр a модели зрения можно считать постоянным только при достаточно больших уровнях яркости. Если же яркость зрительной картины изменяется в больших интервалах, то a будет величиной переменной. Величина b также переменная.

Рассмотрим уравнение теплопроводности в случае, когда коэффициенты a , b и k в уравнении (1) являются переменными.

Тогда, как известно, уравнение теплопроводности запишется так:

$$\gamma(u) \rho(u) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + F(x, y, t). \quad (2)$$

Коэффициенты γ , ρ и k в каждом конкретном случае определяются экспериментально.

Если учесть теплообмен окружающей среды, то уравнение (2) будет иметь вид:

$$\gamma(u) \rho(u) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + f(x, y, t) - hu. \quad (3)$$

Пусть γ и ρ — постоянные, а k зависит от u , т. е. $k = k(u)$, тогда (3) можно представить в таком виде:

$$\gamma \rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - hu + f(x, y, t),$$

или

$$\gamma \rho \frac{\partial u}{\partial t} = k(u) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} - hu + f(x, y, t).$$

Но так как

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y},$$

то получим

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = k(u) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial k}{\partial u} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] - hu + f(x, y, t). \quad (4)$$

Очевидно, что уравнение (4) нелинейное. Если k — величина постоянная, то уравнение (4) принимает такой же вид, как и уравнение (1).

Таким образом, мы приходим к обобщенной математической модели зрения, описываемой нелинейным дифференциальным уравнением, частным случаем которой является модель (1), предложенная в работе [1].

Рассмотрим случай, когда $k(u)$ меняется очень медленно с изменением температуры, т. е. $k(u) = k_0(1 + \varepsilon u)$, где ε — малый параметр.

Тогда, подставляя $k(u)$ в (4), получим

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} = & k_0 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f(x, y, t) - hu + \\ & + k_0 \varepsilon \left[u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) нелинейное и при $\varepsilon = 0$ обращается в линейное, которое в точности совпадает с уравнением (1).

Решение уравнения (5) представим в таком виде:

$$u(x, y, t) = u_0 + \varepsilon u_1 + \varepsilon^2 u_2 + \dots \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и приравнявая коэффициенты в правой и левой части при ε , получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_0}{\partial t} &= k_0 \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} \right); \\ \rho \frac{\partial u_1}{\partial t} &= k_0 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + \rho \frac{\partial u_0}{\partial t} + k_0 u_0 \left[\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^2 \right]; \\ \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} &= k_0 \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) + k_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (u_0 u_1) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (u_0 u_1) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, уравнение (5) заменено системой (7). Это система линейных неоднородных уравнений, которая может быть решена с любой заданной точностью.

ИЗБЫТОЧНОСТЬ И ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПАМЯТИ

П. Б. Невельский, В. Л. Фланчик

Для создания запоминающих устройств на бионических принципах и моделирования такой сложной деятельности человека, как процессы памяти, важно знать характеристики запоминаемого материала, которые оказывают влияние на запоминание, и описать эти характеристики и их воздействие на память человека в терминах вычислительных машин и систем связи.

Одной из характеристик материала, предъявляемого для запоминания, является степень его организации. Как меру организации мы избрали избыточность в смысле К. Шеннона [2], которая на определенном уровне абстракции позволяет сравнивать сообщения, совершенно различные по своей форме и содержанию.

Как известно, избыточность в технических системах связи увеличивает помехоустойчивость и надежность передачи и хранения информации, но уменьшает пропускную способность (емкость) этих систем, в частности, запоминающих устройств.

Под пропускной способностью человеческой памяти мы будем понимать скорость запоминания в единицах информации в единицу времени и рассматривать при этом память как канал связи с символами-сигналами на входе при запоминании и символами-ответами на выходе при воспроизведении.

Цель настоящего исследования — установить, как изменяется пропускная способность долговременной памяти человека в зависимости от избыточности предъявляемого материала при неизменном количестве запоминаемой информации и неизменном числе предъявляемых символов. Причиной избыточности в данном случае были разные вероятности независимо друг от друга появляющихся символов.

Были проведены две серии опытов. В первой серии сообщения, предъявляемые для запоминания, составлялись из символов АБВГ, которые появлялись случайно, независимо и с равной вероятностью 0,25. Информация на символ при этом составляла 2 дв. ед, а избыточность сообщения равнялась нулю. Сообщения во второй серии составлялись из символов восьмибуквенного алфавита, появлявшихся с разной вероятностью:

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
0,60	0,13	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02

Эти вероятности были подобраны так, что среднее количество информации, или энтропия множества вероятностей, вычисленная по известной формуле К. Шеннона [2], составляла также 2 дв. ед, а избыточность равнялась 33%. Буквы в соответствии с принятыми вероятностями кодировались цифрами и отбирались по таблице случайных чисел. Подсчет показал, что частоты появления букв оказались очень близкими к принятым нами вероятностям и среднее количество информации на одну букву, вычисленное при замене вероятностей частотами, в обеих сериях

также равнялось 2 дв. ед. Из полученных таким образом сообщений составлялись 25-буквенные матрицы (5 × 5).

Таблица 1

Образцы предъявлявшихся матриц

Первая серия. Избыточность 0%

А	А	Г	А	В
Г	В	А	А	Б
А	Г	Г	В	Г
Г	Г	Б	Б	Г
А	Б	Б	Б	А

А	Б	Б	Г	А
В	А	Б	Г	В
Б	Г	А	А	В
А	А	В	В	А
Г	В	Б	В	Г

В	Б	Б	А	А
В	Г	А	Б	А
В	А	Г	Б	Б
А	В	А	Г	Г
Г	А	Г	Г	А

В	А	Г	В	Б
А	Б	Г	В	А
Б	В	Г	Б	Б
В	Б	В	А	Г
В	Б	В	В	В

Вторая серия. Избыточность 33%

А	В	А	А	Е
Б	А	Д	А	Б
Д	А	А	Г	В
А	Б	А	Ж	А
А	А	А	Е	Д

Д	Б	А	В	А
А	В	Д	А	А
В	Б	А	А	А
А	А	Б	А	А
А	А	Д	Б	А

А	З	В	А	Г
А	А	Г	А	Г
А	Б	А	А	А
А	А	В	А	Ж
А	А	А	Б	Г

А	Б	А	А	Б
Б	Ж	Д	В	А
А	А	А	Г	А
В	Е	А	А	Б
А	З	Б	А	А

Таким образом мы получили возможность предъявлять для запоминания 25 случайных и 25 избыточных символов, содержащих по 50 дв. ед. информации, т. е. проверить влияние на запоминание избыточности, не сопровождавшейся изменением среднего количества информации на символ и числа предъявлявшихся символов.

В опытах участвовало 10 студентов университета; с каждым из них было проведено по четыре опыта в каждой серии. Чтобы исключить влияние на запоминание про- и ретроактивного торможения, интерференции и утомления, опыты проводились по одному в день в одно и то же время. При этом опыты первой и второй серии чередовались. Матрица, отпечатанная машинописным шрифтом, предъявлялась для запоминания на 50 сек, после чего сразу же следовало письменное воспроизведение. Испытуемые заранее предупреждались о том, символы какого алфавита и с какой вероятностью будут появляться; но специальная тренировка для усвоения избыточности не проводилась, и основное знакомство с характером избыточности происходило в процессе запоминания. Это значит, что субъективная избыточность сообщений была несколько меньше, чем объективная (33%). Объем воспроизведения измерялся числом символов с поправкой на вероятность случайного угадывания и количеством переданной информации, которое подсчитывалось при помощи информационного анализа. Применение этого метода для исследования памяти с примерами из настоящего эксперимента описано нами в работе [1].

Опыты показали, что с увеличением избыточности сообщения от нуля до 33% объем воспроизведения, выраженный числом символов, увеличился на 35%, а выраженный в единицах количества информации, — на 56%. Настолько же увеличивалась и пропускная способность долговременной памяти, так как время запоминания случайных и избыточных матриц было одинаковым. Установлено также, что ненадежность и неоднозначность передачи информации при запоминании избыточных матриц на 90—110% меньше, чем при запоминании случайных; число ошибочных ответов было меньше на 130%. Это значит, что даже такой простой компонент организации, как неравенство вероятностей, приводит к значительному улучшению продуктивности запоминания.

Неизбежным следствием избыточности, вызванной различной вероятностью появления символов, является увеличение числа повторяю-

шихся символов, которые (как в прочем, и при любом другом виде избыточности) в процессе запоминания могут группироваться в более крупные субъективные символы. Это значит, что избыточность позволяет применять эффективные логически обоснованные способы мнемической деятельности, которые являются необходимым условием продуктивности запоминания. Интересно отметить, что для запоминания строк матриц первой серии, состоящих из большого числа согласных, испытуемые использовали следующий прием: при запоминании между согласными вставлялись гласные, чтобы получилось созвучие, похожее на слово. При воспроизведении эти гласные опускались. Сущность данного приема заключается в том, что испытуемые в процессе запоминания непреднамеренно вводили избыточность, которую использовали для образования более крупных оперативных единиц памяти.

Таблица 2

Скорость запоминания случайных и избыточных матриц в символах в секунду и в двоичных единицах в секунду

Испытуемые	Символ/сек при избыточности		Дв. ед./сек при избыточности	
	0%	33%	0%	33%
1. Б-ук	0,22	0,33	0,24	0,66
2. Г-ер	0,27	0,41	0,43	0,67
3. Г-на	0,34	0,42	0,63	0,66
4. Ж-ва	0,33	0,50	0,54	0,99
5. О-ка	0,17	0,40	0,19	0,58
6. П-ая	0,37	0,42	0,57	0,77
7. С-ко	0,35	0,44	0,50	0,66
8. С-ов	0,39	0,47	0,49	1,01
9. У-ва	0,27	0,37	0,49	0,74
10. Ф-нк	0,39	0,39	0,77	0,74
Среднее значение	0,31	0,42	0,48	0,75

Примечание. Статистическая значимость различий оценивалась по критерию Вилкоксона; вероятность нулевой гипотезы $p < 0,01$.

Таким образом, опыты показали, что пропускная способность памяти человека, в отличие от пропускной способности технических систем, в значительной степени увеличивается с увеличением избыточности запоминаемых сообщений. Аналогичные результаты получены нами в опытах с другими видами избыточности (они будут описаны в последующих сообщениях). Поэтому можно предположить, что исследование механизма влияния избыточности на запоминание может оказаться весьма полезным для конструирования запоминающих устройств, увеличение емкости которых связано с уменьшением скорости выборки информации. Для увеличения этой скорости полезно использовать не только человеческий способ воспроизведения, но и связанный с ним человеческий способ запоминания, при котором избыточность не понижает, а наоборот, повышает пропускную способность памяти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невельський П. Б. і Фланчик В. Л. Інформаційний аналіз та його застосування при дослідженні пам'яті. «Психологія», вип. 9. республіканський науково-методичний збірник», вид-во «Радянська школа», К. 1969.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике, изд-во иностр. лит., М., 1963.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕРВНЫХ И МЫШЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Ю. П. Бугай, В. Г. Червов, Ю. И. Нефедов

При рассмотрении электрофизиологических фактов, относящихся к различным функциональным отделам нервной системы, возникает необходимость учета процессов переработки информации на аналоговом и дискретном уровне. Вероятно, только совместное рассмотрение аналоговых и дискретных свойств различных нервных элементов и систем поможет раскрыть принципы переработки информации, используемые в живых организмах.

В настоящей работе описана модель надпороговых явлений в различных возбудимых элементах, однако эти явления рассмотрены в тесной связи с тем подпороговым фоном, на котором возникают потенциалы действия. Приведенные результаты аналитического описания некоторых надпороговых эффектов и экспериментальный материал, полученный на аналоговой модели, относятся к процессам, протекающим в возбудимых элементах при прямом внутриэлектродном раздражении. Однако во многих случаях полученные данные могут быть использованы и для объяснения явлений, протекающих в естественных условиях возбуждения, например, при моносинаптическом, полисинаптическом и антидромном раздражении.

Указанное ограничение применимости описываемой модели связано с необходимостью детального рассмотрения достаточно сложных процессов синаптической передачи возбуждений, изученных только для некоторых типов синапса.

Одна из попыток некоторого обобщения фактов, относящихся к особенностям синаптической передачи возбуждения при учете эффекта пре- и постсинаптического торможения, предпринята в работе [1].

Особенности подпороговых реакций в различных возбудимых элементах и их связь с подпороговыми реакциями

Детальный анализ электрофизиологических фактов, относящихся к подпороговым и надпороговым процессам в нервных и мышечных элементах в естественных и искусственных условиях раздражения, позволяет выделить несколько типов реакций для различных возбудимых элементов. Подробное рассмотрение подпороговых реакций в отдельных нервных волокнах, в нервных и мышечных клетках и в некоторых рецепторах проведено в работе [2], в которой показано, что наиболее характерным отличием в указанных элементах является степень и скорость компенсации постоянно действующих раздражителей по мере их перехода в равновесное состояние после окончания переходного процесса. Чем сильнее и дольше возбудимый элемент способен к аккомодации, тем более быстро и полно ликвидируется влияние постоянно действующего раздражителя, вплоть до полной его компенсации. Наибольшая способность к аккомодации характерна

тации обладают проводящие пути и различные типы мотонейронов, что, вероятно, связано с их функциональным назначением в нервной системе [3, 4]. Аналогичной способностью обладают и элементы сетчатки глаза, реагирующие на включение и выключение светового раздражителя [5].

Функциональное назначение различной компенсационной способности возбудимых элементов весьма разнообразно. В отдельных нервных волокнах, предназначенных для передачи импульсного кода, необходимо быстрое восстановление исходного состояния волокна для неискаженной передачи следующих в серии импульсов.

Мотонейроны, управляющие группами мышц, выполняющих тонко дифференцированные функции, должны обладать способностью быстро возвращаться в исходное состояние при минимальной длительности следовых процессов возбуждения.

Элементы сетчатки глаза благодаря компенсационной способности обеспечивают в соответствующих детекторах сетчатки возможность выделения наиболее информационных пространственно-временных изменений в предъявляемых изображениях.

Отсутствие компенсационной способности, с другой стороны, свойственно возбудимым элементам, предназначенным для суммирования импульсов (см., например, [3, стр. 162]).

Различные компенсационные возможности заложены уже в подпороговых реакциях возбудимых элементов, которые в значительной мере сохраняются и при надпороговых реакциях в виде более или менее выраженных следовых процессов после возникновения потенциалов действия.

Дальнейшее рассмотрение особенностей реакций нервных элементов при надпороговых и подпороговых процессах представляется более рациональным при проведении сравнительной характеристики соответствующих электрофизиологических фактов и результатов, полученных на модели.

Укажем только, что при возникновении потенциала действия в различных нервных элементах происходит более или менее полная импульсная компенсация раздражителя, вызвавшего надпороговую реакцию. При этом элементы с сильно выраженной способностью к адаптации сохраняют в значительной мере эту способность и в процессе надпорогового возбуждения — в виде специфических следовых поляризационных и пороговых изменений.

Функциональная и структурная схемы модели

Необходимость совместного рассмотрения надпороговых и подпороговых процессов в возбудимых элементах с учетом взаимного влияния этих процессов выдвигает соответствующие требования к выбору функциональной и структурной схемы модели.

Модель надпороговых явлений построена на базе модели подпороговых явлений, рассмотренной в работе [6], путем введения дополнительных положительной и отрицательной нелинейных обратных связей. Введение нелинейных обратных связей определяется существованием у возбудимых элементов пороговых свойств и особенностями возникновения потенциала действия.

Функциональная и структурная схемы модели представлены на рис. 1. Подпороговые эффекты имитируются линейным звеном прямой цепи функциональной схемы модели, имеющим передаточную функцию

$$W_o(p) = \frac{k(1 + T_2 p)}{(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)} \quad (1)$$

и представляющим собой систему второго порядка с введением производной, где k — статический коэффициент усиления звена,

$$T_3 = \frac{2T_1T_2}{(T_1 + T_2) - [(T_1 - T_2)^2 - 4T_1T_2k_1k_2]^{1/2}}, \quad (2)$$

$$T_4 = \frac{2T_1T_2}{(T_1 + T_2) + [(T_1 - T_2)^2 - 4T_1T_2k_1k_2]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$T_1 = R_2C_3, \quad T_2 = R_{10}C_{11}, \quad k_1 = \frac{R_2}{R_1}, \quad k_2 = \frac{R_{10}}{R_9}, \quad (4)$$

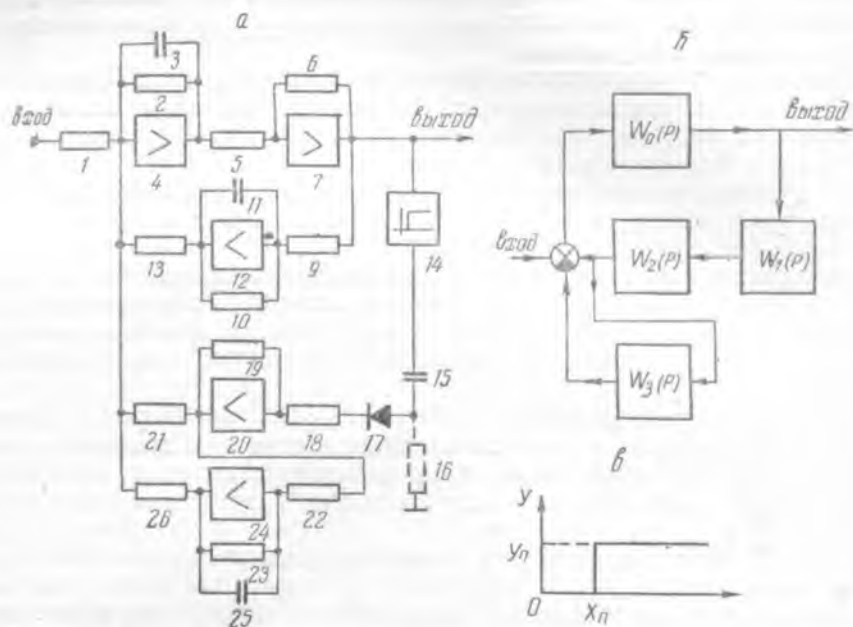


Рис. 1. Схемы модели процесса возбуждения в нервных и мышечных элементах:

а — структурная; б — функциональная; в — статическая характеристика релейного элемента.

где индексы у R и C элементов соответствуют нумерации на структурно-схеме модели (рис. 1, а). Выбранная реализация передаточной функции $W_0(p)$ удобна для перестройки модели на воспроизведение подпороговых реакций в различных нервных элементах.

Инерционные свойства нервных элементов в месте раздражения имитируются звеном первого порядка на операционном усилителе. Постоянная времени запаздывания определяется R_2C_3 — элементами в цепи обратной связи усилителя 4, где индексы у элементов соответствуют номеру детали в структурной схеме.

При действии на входе модели скачкообразного возмущения первоначальное инерционного нарастания имеет место либо сохранение постоянного уровня реакции, либо постепенное уменьшение величины реакции с постоянной времени $T_2 = R_{10}C_{11}$, соответствующей постоянной времени адаптации. Реакции системы на скачкообразное возмущение показаны на рис. 2, где установившийся уровень выходной

сигнала зависит от статического коэффициента усиления линейного звена, равного

$$k = \frac{k_1}{1 + k_1 k_2} \quad (5)$$

При достижении реакции на выходе линейного звена модели с передаточной функцией $W_0(p)$ в ответ на произвольное возмущение порогового значения происходит включение релейного элемента, передаточная функция которого условно обозначена через $W_1(p)$. Статическая характеристика несимметричного релейного элемента в цепи обратной связи (см. рис. 1, в) описывается соотношением

$$y_1 = \frac{y_n}{2} [1 - \text{sign}(x_1 - x_n)], \quad (6)$$

где x_n — пороговое значение входного сигнала релейного элемента, y_n — значение выходного сигнала релейного элемента при надпороговых значениях входного сигнала.

Скачкообразное возмущение с выхода релейного элемента через дифференцирующее звено попадает на вход системы в виде сигнала положительной обратной связи, время действия которого определяется постоянной времени $R_{18}C_{15}$. Передаточная функция дифференцирующего звена, реализованного в модели на операционном усилителе 20, имеет вид

$$W_2(p) = \frac{T_5 p}{(1 + T_5 p)}, \quad (7)$$

где

$$T_5 = R_{18}C_{15}, \quad T_6 = R_{19}C_{15}.$$

С выхода звена $W_2(p)$ (см. рис. 1, б) сигнал обратной связи попадает на вход инерционного элемента с передаточной функцией $W_3(p)$ (см. рис. 1, в):

$$W_3(p) = \frac{k_3}{(1 + T_7 p)}, \quad (8)$$

где

$$k_3 = \frac{R_{23}}{R_{22}}, \quad T_7 = R_{23}C_{25},$$

и поступает на вход модели в виде сигнала отрицательной обратной связи с запаздыванием первого порядка относительно сигнала положительной обратной связи.

Полная передаточная функция системы записывается в виде

$$W(p) = \frac{W_0(p)}{1 - W_0(p) W_1(p) W_2(p) [1 - W_3(p)]}, \quad (9)$$

где $W_0(p)$, $W_2(p)$ и $W_3(p)$ описываются соответственно соотношениями (1), (7) и (8).

При известной передаточной функции модели для различных возмущающих воздействий на входе модели в виде серии коротких импуль-



Рис. 2. Подпороговые реакции модели:

а — на прямоугольный входной сигнал; б — соответствующее полной компенсации входного возмущения; в — частичной; г — слабо выраженной.

сов, скачков напряжения или линейно нарастающих входных сигналов могут быть получены аналитические выражения для описания переходного процесса при надпороговом возмущении с учетом формы потенциала действия. При описании установившегося колебательного режима для «неадаптирующихся» элементов в условиях действия постоянного надпорогового возмущения могут быть использованы известные методы линеаризации релейного элемента. Ниже будут рассмотрены в качестве примера реакции модели на скачкообразное возмущение и некоторые частотные особенности системы при действии постоянного возмущения.

Как показано в работе [2], подпороговая реакция модели на скачок на начальном участке носит экспоненциальный характер. В первом приближении эта реакция может быть представлена как линейно нарастающий сигнал с постоянной скоростью нарастания при фиксированной амплитуде скачка на входе модели. Для линейно нарастающего входного сигнала при нулевых начальных условиях релейный элемент может быть рассмотрен как устройство, формирующее скачок напряжения на выходе с задержкой, равной времени достижения подпороговой реакцией порогового значения. Таким образом, переходный процесс всей системы в целом при действии скачка на входе с амплитудой U_0 может быть представлен в виде суммы реакций звена прямой цепи системы с передаточной функцией $W_0(p)$ на два последовательных скачкообразных возмущения, одно из которых является входным сигналом, другое — скачком на выходе релейного элемента, преобразованным в звеньях $W_2(p)$ и $W_3(p)$ (см. рис. 1, б) и поступающим на вход системы с задержкой, зависящей от амплитуды входного сигнала.

Как непосредственно видно из функциональной схемы модели, при использовании указанных упрощений изображение Лапласа выходного сигнала системы в ответ на скачкообразное возмущение может быть записано так:

$$Y(p) = W_0(p) \frac{U_0}{p} + W_0(p) \frac{y_n}{p} [W_2(p) - W_3(p)] e^{-t_n p}, \quad (10)$$

где U_0 — амплитуда скачка на входе системы,

y_n — амплитуда скачка на выходе релейного элемента,

t_n — задержка запуска релейного элемента по отношению ко входному возмущению, зависящая от амплитуды входного сигнала U_0 и параметров звена с передаточной функцией $W_0(p)$.

Переходя в пространство оригиналов, получим следующее выражение для выходного сигнала при нулевых начальных условиях:

$$y(t) = y_0(t) + A e^{-\frac{t-t_n}{T_3}} + B e^{-\frac{t-t_n}{T_4}} + C e^{-\frac{t-t_n}{T_5}} + D, \quad (11)$$

где $y_0(t)$ — реакция звена с передаточной функцией $W_0(p)$ на скачок на входе с амплитудой U_0 ;

A, B, C, D — постоянные, зависящие от параметров системы.

В принятом приближении величина задержки t_n определяется из соотношения [2]

$$t_n = \frac{x_n T_2}{U_0 k_0}, \quad (12)$$

где x_n — величина порога релейного элемента,

U_0 — амплитуда входного скачка,

k — статический коэффициент усиления прямого звена функциональной схемы модели (см. рис. 1, б),

T_2 — то же, что и в соотношении (1).

Соотношение (11) описывает полный переходной процесс в системе для одиночного надпорогового возбуждения с учетом подпороговой реакции $y_0(t)$ для $t < t_n$:

$$I_0(t) = kU_0(1 + \alpha e^{-\frac{t}{T_3}} - \beta e^{-\frac{t}{T_4}}), \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_3}, \quad \beta = \frac{T_4 - T_2}{T_4 - T_3}, \quad (14)$$

а T_3 , T_4 , T_2 — те же, что и в (2), (3), (4) соответственно.

Различные нервные элементы, к которым, например, относятся мотонейроны в условиях моносинаптического раздражения, в период формирования потенциала действия полностью ликвидируют следы подпороговой деполяризации и после возбуждения деполяризация начинается фактически с исходного уровня нормальной поляризации [4]. В модели для таких нервных элементов при постоянном раздражении период следования отдельных потенциалов действия (если пренебречь длительностью самого потенциала действия) определяется соотношением (12). Итак, период ритмически возникающих импульсов определяется только величиной «латентного периода» подпорогового звена, или временем достижения реакцией системы на скачкообразное возмущение порогового значения x_n .

Соответственно частота «ритмики» линейно связана с амплитудой входного скачка U_0 :

$$f = U_0 \frac{kT_2}{x_n}, \quad (15)$$

что хорошо согласуется с известными экспериментальными фактами, устанавливающими линейный характер изменения частоты ритмики с увеличением уровня деполяризации нервных элементов [3].

Нижняя граница частоты ритмики определяется «реобазным» значением амплитуды входного скачка, определяемым точно в условиях модели по моменту достижения подпороговой реакцией наибольшего значения [2].

Сравнительная характеристика реакций модели на различные возмущения и реакций нервных элементов

Известны нервные элементы, реагирующие только на включение и выключение раздражителей. К таким элементам относятся мотонейроны, отдельные нервные волокна, некоторые вставочные нейроны, клетки сетчатки глаза типа *on* и *off* и т. д. Эффект на включение и выключение раздражителей наблюдается в пресинаптических окончаниях гигантских синапсов кальмара [4]. Вероятно, эффект включения — выключения является достаточно общей особенностью всех нервных элементов, обладающих способностью к адаптации, выражающейся, например, в частичной или полной компенсации деполяризующих и гиперполяризующих раздражителей при под- и надпороговых процессах.

Соответствующие эффектам включения — выключения реакции модели на возмущение прямоугольными импульсами противоположной полярности иллюстрируются осциллограммами рис. 3а, б.

Для нервных элементов, обладающих различной скоростью и степенью компенсации постоянного раздражителя, характер импульсации на включение и выключение может быть различным. Этот эффект наблюдается и на фоне постоянной ритмической активности нервных элементов. Общим остается более или менее быстрое исчезновение ритмики

или изменений в ритмике после окончания переходного процесса на включение — выключение раздражителя.

На рис. 4 представлены для сравнения реакции на выключение гиперполяризующих импульсов тока и на включение деполяризующего тока различной интенсивности для одного из видов вставочных нейронов [3]. При большой интенсивности деполяризующих токов импульса-

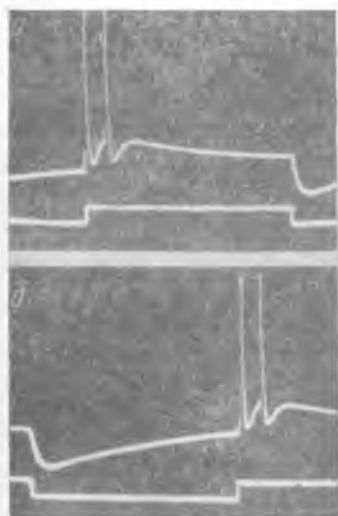


Рис. 3. Реакции модели:

a — на включение положительного входного сигнала; *b* — на выключение отрицательного входного сигнала.

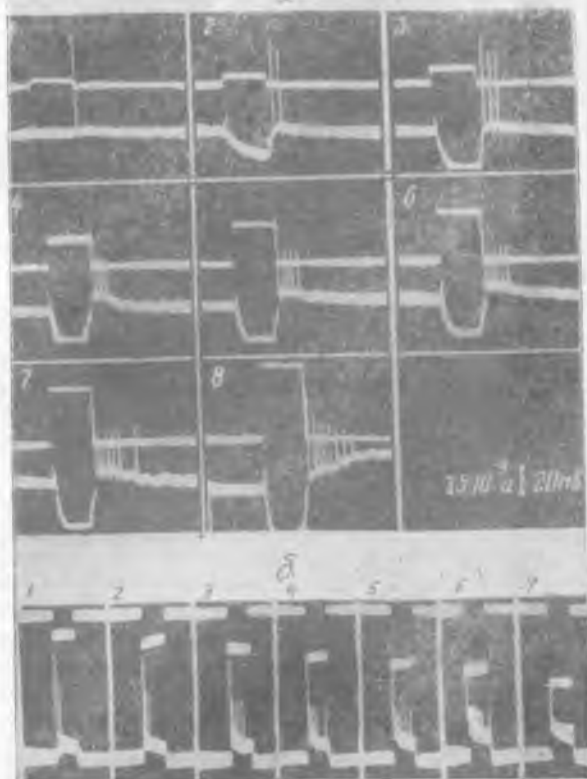


Рис. 4. Множественные разряды одной и той же промежуточной клетки при размыкании анода (*A*) и замыкании катода (*B*). Амплитуда толчков тока (верхняя кривая) последовательно (от 1 до 8) увеличивается [3].

ция резко ослабляется, что связано с уменьшением амплитуд потенциалов действия в период относительной рефрактерности. На рис. 4, *B* заметно частичное уменьшение уровня деполяризации, на котором возникают потенциалы действия, связанное с частичной адаптацией, ослаблением возбуждающего влияния входного деполяризующего импульса. Настоящая модель подпороговых процессов, как указано в работе [2], не учитывает нелинейных эффектов при подпороговых процессах в условиях кратковременной гиперполяризации, когда наблюдается насыщение реакции на гиперполяризацию типа диодного детектирования обратных напряжений. В связи с этим наблюдается расхождение в форме подпороговой реакции на сильную гиперполяризацию у реальных нервных элементов и в модели. При слабой гиперполяризации имеет место полное соответствие с моделью. Однако в транзисторном варианте подпороговой модели, рассмотренном в работе [6], при работе транзистора в области насыщения эта нелинейность была качественно воспроизведена.

Нелинейность в области гиперполяризации нервного элемента накладывает дополнительные особенности на суммирование гиперполяризации при раздражении серией коротких импульсов, имитирующих тормозящие входные импульсы раздражения.

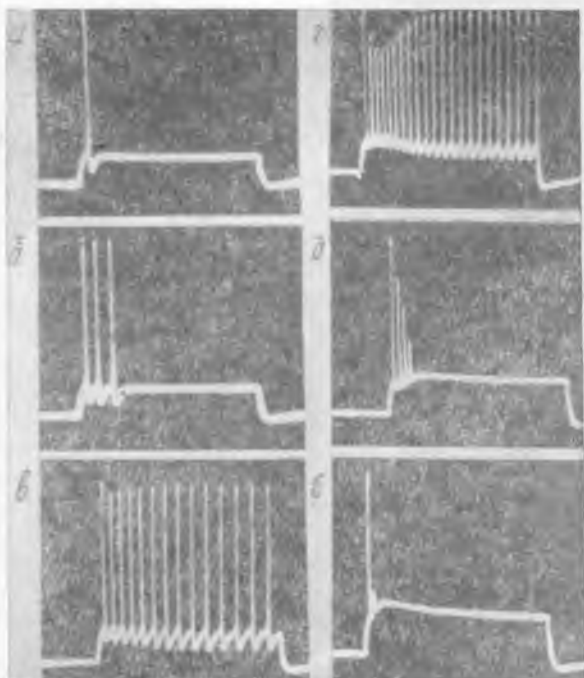


Рис. 5. Изменение частоты и величины «надпороговых» реакций модели при последовательном (от *a* до *e*) увеличении амплитуды входного прямоугольного сигнала.

Уменьшение величины реакции при действии прямоугольного импульса возмущения имеет место и в модели (см. рис. 3 и 5), в которой регулировкой коэффициента усиления в цепи жесткой отрицательной обратной связи (см. звено на операционном усилителе *I2* на рис. 1, *a*) и изменением постоянной времени запаздывания $T_2 = R_{10}C_{11}$ может быть получена любая степень компенсации вплоть до полной и задано любое время переходного процесса, соответствующее времени адаптации.

Для мотонейронов подробно изучены реакции при различных способах раздражения: моносинаптическом, полисинаптическом, антидромном и прямом внутриэлектродном раздражении. На рис. 6 и 7 представлены соответствующие реакции мотонейронов [3]. На рис. 5 показана осциллограмма реакций модели при настройке, соответствующей свойствам мотонейрона.

На осциллограммах, приведенных на рис. 8, показана реакция модели на возмущение короткими прямоугольными импульсами минимальной амплитуды при различной частоте их следования. При малой частоте входных импульсов возбуждение возникает в ответ на каждый входной импульс (см. рис. 8, *a*), при большей частоте входных сигналов минимальная амплитуда входных импульсов недостаточна для возбуждения в период «относительной рефрактерности» и наблюдается деление частоты (см. рис. 8, *б*, *в*, *г*). Приведенные реакции модели на серию корот-

ких импульсов минимальной надпороговой амплитуды наилучшим образом соответствуют условиям моносинаптического раздражения мотонейрона (при соответствующей настройке модели) ритмической серии импульсов (см. рис. 6, А) и условиям прямого тетанического раздражения импульсами постоянной силы, по возрастающей частоты (см. рис. 7, а).

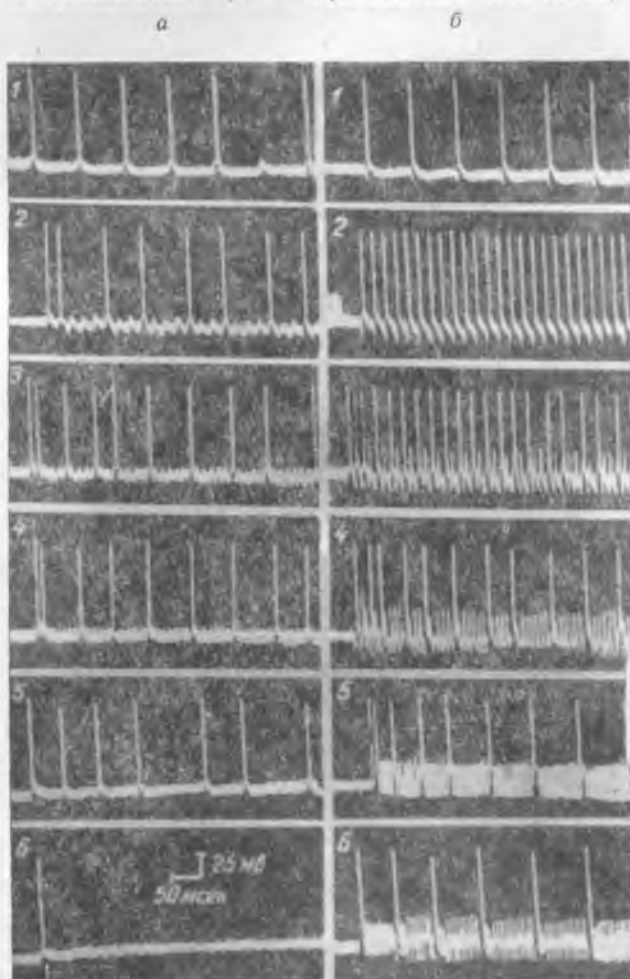


Рис. 6. Ответы мотонейрона на моносинаптическое (А) и антидромное (Б) ритмическое раздражение при последовательном (от 1 до 6) увеличении частоты стимуляции икрожного нерва и переднего корешка [3].

Особенности антидромного раздражения могут быть воспроизведены в модели при введении в функциональную схему дополнительного порогового устройства с меньшим порогом, имитирующим свойства низкопороговой зоны нейрона — аксонного холмика. Однако в настоящей работе полная модель мотонейрона не рассматривается.

Особенности возбуждения в модели при использовании линейно нарастающих входных сигналов с различной скоростью нарастания иллюстрируются осциллограммами рис. 9. Для сравнения на рис. 10 показаны реакции мотонейрона при использовании аналогичных входных сигналов с плавным нарастанием фронта. При достаточной крутизне

нарастания входного сигнала наблюдается учащение ритмики, вплоть до полного исчезновения ее.

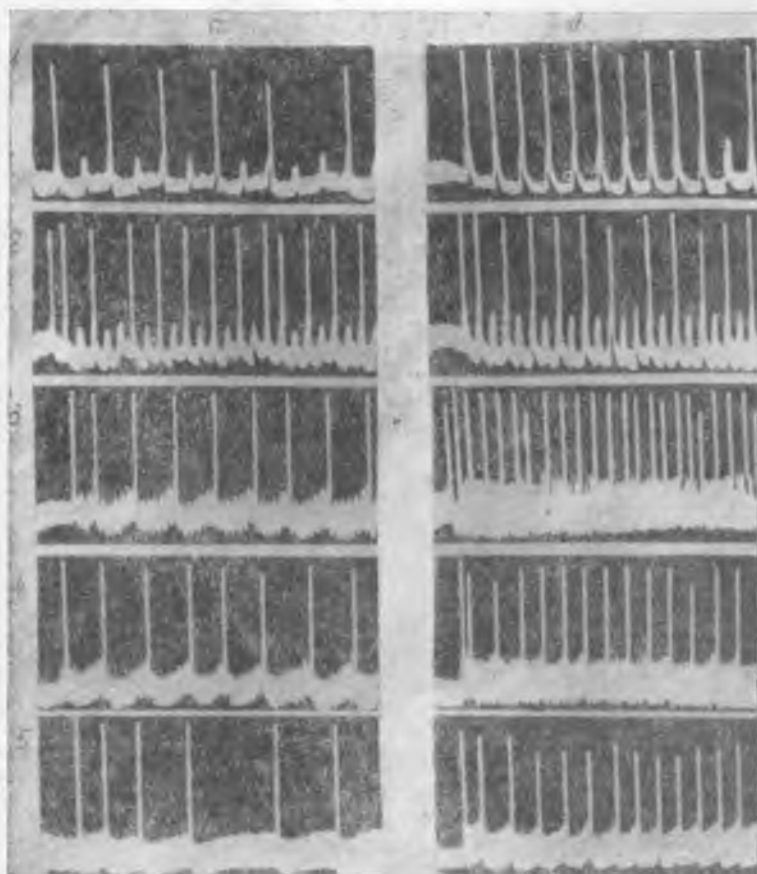


Рис. 7. Ответы мотонейрона на прямое тетаническое раздражение постоянной силы, но возрастающей (от 1 до 5) частоты. Осциллограммы (б) соответствуют большей силе раздражающего тока [3].

При малой скорости нарастания входного сигнала возбуждение не происходит, так как модель обладает способностью, аналогичной аккомодационной способности нервных элементов. Связь явлений аккомодации и адаптации, особенно наглядна в модели, подробно описанной в работах [6, 7].

Различные возбудимые элементы по характеру подпороговой реакции на включение — выключение постоянных раздражителей могут быть условно разделены на три группы.

К первой группе относятся элементы, полностью компенсирующие постоянно действующий раздражитель после окончания переходного процесса на включение — выключение раздражителя. К таким элементам относятся, например, отдельные нервные волокна и элементы сетчатки глаза, реагирующие только на включение — выключение света. Способность к полной компенсации раздражителя, вероятно, соответствует наибольшей способности нервных элементов к адаптации (см. рис. 2, б).

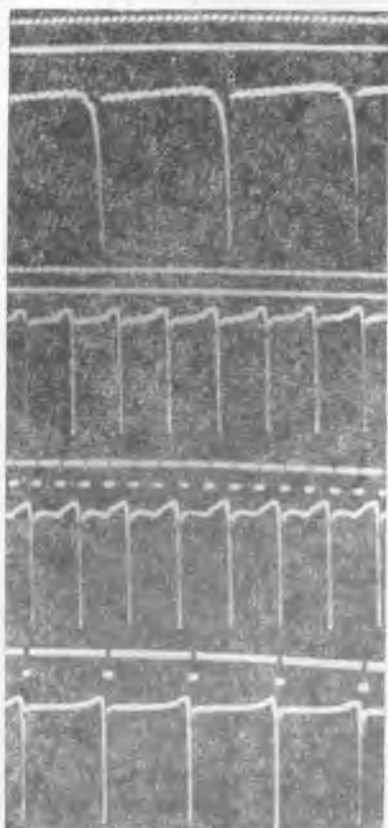


Рис. 8. Изменение частоты ответов модели при последовательном (от *a* до *e*) увеличении частоты входных коротких сигналов постоянной амплитуды.

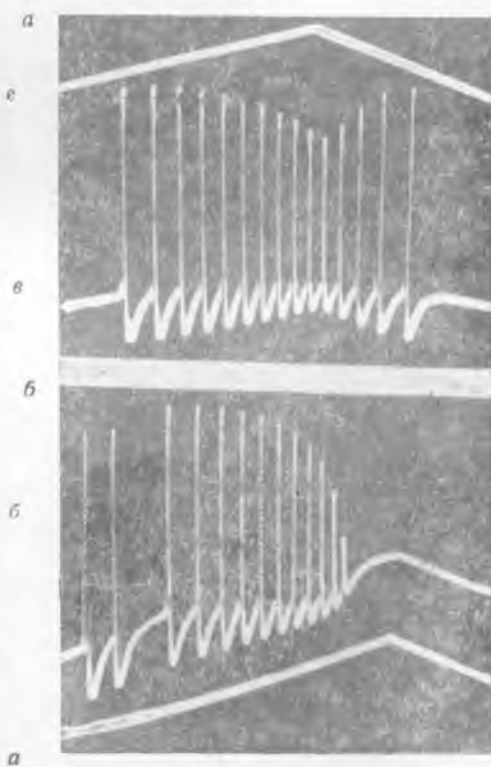


Рис. 9. Реакции модели на треугольные импульсы с разной крутизной. На осциллограмме *б* крутизна входного сигнала больше.

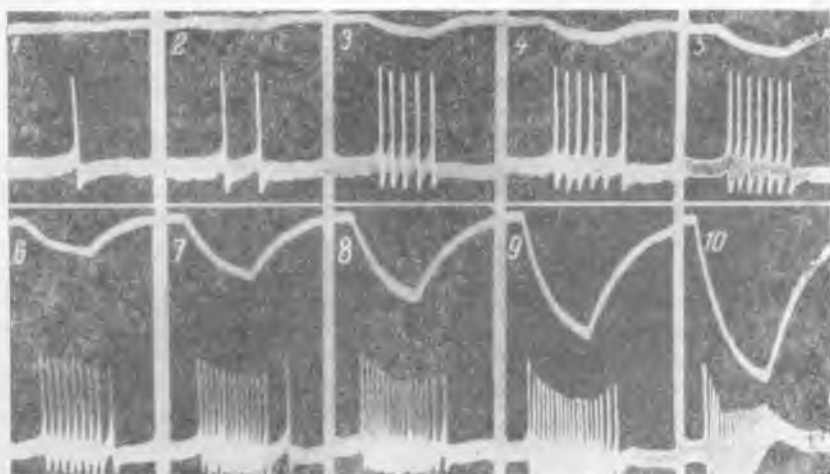


Рис. 10. Множественные разряды промежуточного нейрона при стимуляции постепенно нарастающими толчками тока. Верхняя кривая — запись раздражающего тока с последовательно (от 1 до 10) возрастающей крутизной [3].

Ко второй группе относятся нервные элементы, частично компенсирующие постоянный раздражитель (см. рис. 2, в). К таким элементам принадлежит сома мотонейронов и некоторых вставочных нейронов. Элементы второй группы обладают меньшей способностью к адаптации и могут проявлять длительную ритмическую активность при действии постоянного раздражителя после начальной более интенсивной ритмики в максимуме реакции на включение (см. рис. 2, в).

И, наконец, к третьей группе относятся возбудимые элементы, не обладающие компенсационной способностью к действию постоянного подпорогового раздражителя и соответственно способностью к адаптации. В эту группу входят мышечные элементы и некоторые типы вставочных нейронов.

В соответствии с особенностями реакции на включение различные нервные элементы имеют специфические фазы реакции на короткий подпороговый и надпороговый импульс. Наиболее выраженную фазу гиперполяризации при подпороговом возбуждении имеют нервные элементы первой группы, наименее выраженную — элементы третьей группы.

При ритмическом раздражении короткими подпороговыми импульсами элементов третьей группы отдельные подпороговые реакции деполяризации и при достаточно большой частоте стимуляции могут суммироваться. При достижении уровня деполяризации возникает ритмическая активность, протекающая на фоне деполяризации, не разрушаемой потенциалами действия (см. рис. 11). Более подробно процессы суммирования реакций нервных элементов на различные возмущения рассмотрены в работе [7].

Воспроизведение подпороговых компенсационных процессов, как показано выше, в модели обеспечивается цепью инерционной жесткой отрицательной обратной связи, выполненной на операционном усилителе 12 (см. рис. 1, а). Кратковременная компенсация после возникновения надпорогового импульса на выходе модели обеспечивается нелинейной гибкой отрицательной обратной связью, постоянная времени запаздывания которой определяется произведением $R_{23}C_{25}$, а величина компенсации зависит от статического коэффициента усиления звена на операционном усилителе 24 и определяется соотношением R_{23}/R_{26} .

В модели без изменения структурной схемы при соответствующей настройке можно воспроизводить все перечисленные выше особенности надпороговых и подпороговых реакций различных возбудимых элементов.

ВЫВОДЫ

Рассмотренная в работе функциональная модель возбудимых элементов позволяет оценить с общей точки зрения особенности поведения различных в функциональном и структурном отношении элементов.

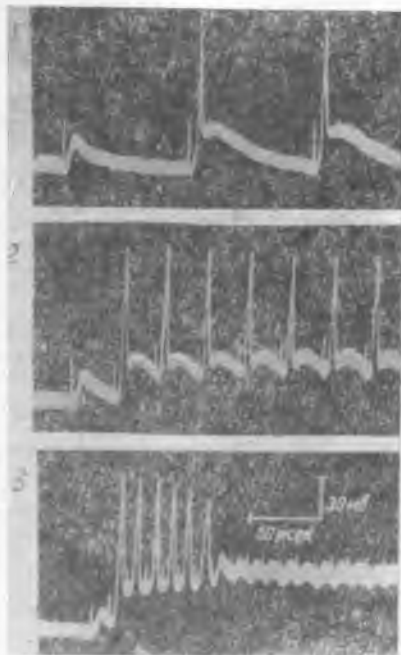


Рис. 11. Ответы мышечного волокна на стимуляцию двигательного нерва током с последовательно (от 1 до 3) возрастающей частотой [3].

Показана роль компенсационного механизма при надпороговых и подпороговых процессах и связь этого механизма со способностью нервных элементов к адаптации.

При достоверных сведениях о передаточных функциях нервных элементов возникает возможность количественной оценки оптимальности функционирования живых систем связи и переработки информации.

С другой стороны, описанная модель может быть рассмотрена как универсальный нейрноподобный элемент, включающий свойства многих изученных элементов нервной системы.

Такого рода модель при соответствующей настройке и более простой реализации может быть использована в качестве базового элемента различных нейрноподобных систем переработки информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Моделирование процессов возбуждения в некоторых синаптических образованиях. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4, Харьков, 1969.
 2. Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Модель подпороговых явлений в возбудимых элементах. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1, Харьков, 1968.
 3. А. И. Шаповалов. Клеточные механизмы синаптической передачи, изд-во «Медицина», М., 1966.
 4. Дж. Экклз. Физиология синапсов, изд-во «Мир», М., 1966.
 5. В. Д. Глезер. Механизмы опознания зрительных образов, изд-во «Наука», М. — Л., 1966.
 6. Ю. П. Бугай, В. Г. Червов, Ю. И. Нефедов. Исследование подпороговых явлений в возбудимых элементах на аналоговой модели. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1, Харьков, 1968.
 7. Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Моделирование электротонических изменений возбудимости при подпороговых раздражителях. (Статья в настоящем сборнике).
-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТОНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОЗБУДИМОСТИ ПРИ ПОДПороГОВЫХ РАЗДРАЖИТЕЛЯХ

Ю. П. Бугай, В. Г. Червов

Рассмотренная в работе [1] модель подпороговых явлений в возбудимых элементах воспроизводит особенности их поведения при прямом внутриэлектродном раздражении импульсами произвольной формы. В модели исключено рассмотрение эффектов, связанных с особенностями синаптического возбуждения и возбуждения с помощью внешнего микроэлектрода. Это упрощение позволило использовать единую функциональную схему для воспроизведения особенностей местного возбуждения в совершенно различных в функциональном и структурном отношении нервных элементах. Как показано в работе [1], подпороговые явления при указанных ограничениях в способе раздражения с достаточной точностью можно воспроизвести, используя в качестве модели системы второго порядка с введением производной, передаточная функция которой имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{k(1 + T_2 p)}{(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)}, \quad (1)$$

где T_2, T_3, T_4 — постоянные времени системы,
 k — статический коэффициент усиления.

Используя эту модель, можно многим словесным характеристикам эффектов изменения возбудимости придать сравнительно точную математическую форму. В настоящей работе описаны электротонические изменения возбудимости для конкретных условий раздражения. Однако предварительно необходимо рассмотреть некоторые электрофизиологические данные и определения.

Возбудимость нервных и мышечных тканей

Возбудимость относится к числу основных параметров, определяющих функциональное состояние нервных и мышечных тканей, способных в ответ на раздражение отвечать специфической реакцией — местной или распространяющейся в виде потенциала действия. В качестве меры возбудимости обычно используют пороговую величину тока или напряжения раздражающего стимула. Величина порога возбуждения меняется в зависимости от условий раздражения нервных тканей. Необходимо рассмотреть отдельно влияние различных факторов на возбудимость.

В опытах, проведенных на одиночных нервных и мышечных клетках и волокнах, а также на изолированных нервных волокнах, было показано, что величина порога раздражения определяется главным образом соотношением двух величин — исходной величины потенциала покоя E_0 и той критической величины $E_{кр}$, до которой этот потенциал должен быть доведен в месте раздражения для возникновения потенциала действия (см. рис. 1).

Чем ближе потенциал покоя к своей критической величине $E_{кр}$, тем

меньшую силу должен иметь раздражающий ток для того, чтобы получить необходимый сдвиг потенциала ΔV , тем, следовательно, выше возбудимость ткани и наоборот, чем дальше потенциал покоя E_0 находится от критического уровня E_K , тем большую силу тока надо применить для того, чтобы вызвать потенциал действия.

Минимальный сдвиг мембранного потенциала покоя, требующийся для того, чтобы E_0 достиг критической величины E_K , называют пороговым потенциалом, или порогом деполяризации.

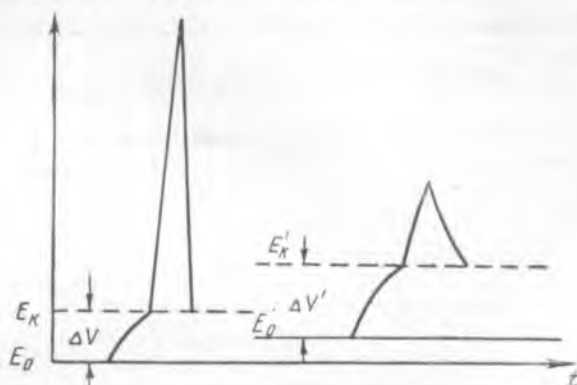


Рис. 1. Условное изображение потенциала действия, возникающего на фоне подпороговой деполяризации, достигающей критического уровня E_K : E_0 — нормальный исходный уровень поляризации, E_K — исходный критический уровень поляризации, E_0^I — смещенный уровень исходной поляризации при длительном действии деполяризующего тока, E_K^I — смещенный критический уровень деполяризации.

Установлено, что при прохождении через нерв или мышцу постоянного тока пороги раздражения в области катода понижаются — возбудимость возрастает, а в области анода, напротив, повышаются — возбудимость снижается.

Эти изменения возбудимости не связаны с изменением величины критического уровня поляризации E_K , а определяются изменением разности между установившимся после включения раздражителя новым потенциалом покоя E_0 и критическим уровнем поляризации.

Описанные изменения возбудимости получили название электротонических изменений возбудимости. Они тесно связаны с электротоническими изменениями мембранного потенциала.

При длительном действии постоянного тока электротонические изменения возбудимости извращаются: под катодом начальное повышение возбудимости сменяется ее понижением (катодическая депрессия), а под анодом сниженная возбудимость постепенно повышается. Эти изменения возбудимости, в отличие от электротонических, могут сопровождаться изменением критического уровня деполяризации E_K , который в области раздражения под катодом имеет тенденцию к увеличению, а в области анода — к уменьшению. Вследствие этого необходимый для возникновения возбуждения пороговый сдвиг мембранного потенциала ΔV меняется под катодом в сторону увеличения, а под анодом — в сторону уменьшения.

С рассмотренными механизмами изменения возбудимости связаны явления аккомодации и адаптации.

Различные нервные элементы отличаются характером электротонических изменений возбудимости. Эти различия будут рассмотрены в условиях, в которых можно пренебречь изменением критического уровня поляризации. Такие условия имеют место при небольших отклонениях поляризации по отношению к нормальному уровню поляризации и пороговому значению деполяризации, а также при не очень длинных, по сравнению со временем переходного процесса в нервном элементе, раздражающих токах.

Основные отличия электротонических изменений возбудимости в различных нервных и мышечных элементах наблюдаются во время переходного процесса в ответ на включение (или выключение) постоянного деполяризующего или гиперполяризующего раздражителя. На рис. 2, а приведены наиболее типичные реакции различных нервных элементов на включение и выключение раздражителей при внутриэлектродной стимуляции. Порог раздражения определяется минимальной величиной стимула, при котором деполяризация достигает критического уровня. Мгновенная величина порогового потенциала определяется значением разности между критическим и текущим значением поляризации для любой формы стимула:

$$\Delta V(t) = E_k - y(t), \quad (2)$$

где $\Delta V(t)$ — текущее значение порогового потенциала;

E_k — критический уровень деполяризации;

$y(t)$ — мгновенное значение поляризации.

Но мгновенное значение порога, пропорциональное мгновенному значению порогового потенциала, не может быть определено для произвольной формы пробного стимула. Единственными стимулами, для которых деполяризационная реакция в условиях внутриэлектродного раздражения достигает наибольшего значения практически мгновенно, являются очень короткие, по сравнению со временем переходного процесса, прямоугольные импульсы соответствующей минимальной амплитуды (см. рис. 2, б). Естественно такие прямоугольные импульсы использовать в качестве меры мгновенного значения порога возбудимости. Если устремить длительность импульса к нулю, пропорционально увеличивая его амплитуду, то в пределе можно заменить прямоугольный стимул δ -импульсом с той же площадью. При этом форма и амплитуда реакции деполяризации практически не изменится, зато все полученные соотношения станут более компактными и наглядными.

В рассматриваемой модели наибольшее значение импульсной реакции достигается в начальный момент времени. Для того чтобы получить

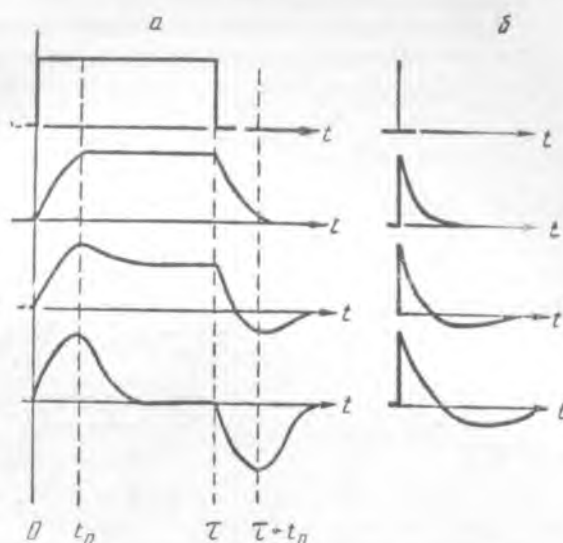


Рис. 2. Схематическое изображение подпороговых реакций различных возбудимых элементов:

а — при действии прямоугольного деполяризующего импульса тока, б — при действии короткого возбуждающего импульса.

это наибольшее значение непосредственно по изображению выходного сигнала реакции без вычисления оригинала, воспользуемся свойством преобразований Лапласа для асимптотических значений оригиналов и изображений функции:

$$\lim_{t \rightarrow 0} y(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pY(p), \quad (3)$$

где $Y(p)$ — изображение выходного сигнала системы в ответ на импульсное возмущение.

Если площадь δ -импульса имеет величину A , то предел в правой части соотношения (3) запишется через передаточную функцию системы (1) и изображение δ -импульса в следующей форме:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} pY(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} p \frac{k(1 + T_2 p)}{(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)} A, \quad (4)$$

где A — изображение δ -импульса, и после вычислений получим

$$y(0) = A \frac{kT_2}{T_3 T_4}. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$T_3 T_4 = \frac{T_1 T_2}{1 + k_1 k_2}, \quad (6)$$

$$k = \frac{k_1}{(1 + k_1 k_2)}, \quad (7)$$

получим

$$y(0) = A \frac{k_1}{T_1}, \quad (8)$$

где k_1 — статический коэффициент усиления прямой цепи,

T_1 — постоянная времени прямой цепи.

Поскольку соотношение (8) определяет величину выходного сигнала в ответ на импульсное возмущение с «площадью» A , то необходимая для возбуждения величина площади может быть получена из равенства:

$$A \frac{k_1}{T_1} = E_k - y(t), \quad (9)$$

где соотношение в правой части равенства определяет мгновенное значение порогового потенциала при действии на входе модели произвольного возмущения, вызывающего реакцию $y(t)$. Соответственно для «площади» δ -импульса получим

$$A = \frac{T_1}{k_1} [E_k - y(t)]. \quad (10)$$

На практике вместо δ -импульса можно использовать очень короткий, по сравнению со временем переходных процессов, прямоугольный импульс с той же площадью A . Если зафиксировать длину пробного импульса, то величина его амплитуды определяется из соотношения

$$x = \frac{A}{t_0}, \quad (11)$$

где x — амплитуда импульса,

A — площадь импульса,

t_0 — его длительность.

Соответственно соотношение (10) можно переписать в другой форме:

$$x = \frac{T_1}{k_1 t_0} [E_k - y(t)]. \quad (12)$$

Из соотношения (10) следует, что чем ближе величина мгновенного значения поляризации $y(t)$ к критическому уровню E_k , тем меньше необходимая для возбуждения амплитуда пробного возбуждающего импульса при одной и той же длительности импульса t_0 . Фактически соотношение (10) является законом изменения порога возбудимости при фиксированном критическом уровне деполяризации для любого входного возмущения, вызывающего реакцию $y(t)$. Выражение в квадратных скобках в правой части равенства (12) есть мгновенная величина порогового потенциала, т. е. величина порога связана с величиной порогового потенциала линейно и коэффициент пропорциональности равен $\frac{T_1}{k_1 t_0}$.

Постоянная времени T_1 соответствует постоянной времени мембраны нервных элементов, и коэффициент усиления k_1 близок к единице. Так что для практических целей соотношение (12) можно представить в виде:

$$x_n = T_m \Delta V \frac{1}{t_0}, \quad (13)$$

где x_n — величина порога,
 T_m — постоянная времени мембраны,
 ΔV — пороговый потенциал,
 t_0 — длительность пробного импульса.

Так как возбудимость есть величина, обратная порогу, то для мгновенного значения возбудимости получим:

$$B = \frac{1}{x_n} = \frac{t_0 k_1}{T_1 [E_k - y(t)]}. \quad (14)$$

Если дополнительно учесть, что величина критического уровня деполяризации изменяется со временем, то соотношения для порога и возбудимости могут быть представлены в виде:

$$x_n = \frac{T_1}{k_1 t_0} [E_k(t) - y(t)]. \quad (15)$$

$$B = \frac{t_0 k_1}{T_1 [E_k(t) - y(t)]}. \quad (16)$$

где $E_k(t)$ — функция, описывающая изменение критического уровня деполяризации во времени. Если критический уровень деполяризации $E_k(t)$ растет быстрее, чем величина деполяризации, то возбуждение невозможно.

Из общих соотношений для электротонических изменений порога возбудимости при действии импульсов произвольной формы можно получить соответствующие зависимости для конкретных деполяризующих и гиперполяризующих раздражителей.

Электротонические изменения порога для прямоугольных стимулов

Прямоугольные деполяризующие и гиперполяризующие стимулы различной длительности и частоты наиболее часто используются при электрофизиологических исследованиях нервных элементов. Поэтому для этих стимулов будут наиболее подробно рассмотрены эффекты на включение и выключение раздражителя. В других условиях раздражения

почти полным аналогом прямоугольных стимулов являются тетанические раздражения серией коротких импульсов, следующих с большой частотой. К этим же условиям приближаются любые случаи взаимной иннервации возбудимых элементов конечной серией импульсов достаточно высокой частоты. Известен возбуждающий эффект выключения гиперполяризующих прямоугольных раздражителей, который наблюдается во многих нервных элементах, и тормозящий эффект выключения деполяризующих импульсов. Все эти явления могут быть рассмотрены как частные случаи проявления свойств функциональной модели подпороговых процессов, описанной в работе [1].

Эффекты включения и выключения прямоугольных стимулов

Изображение Лапласа для реакции системы с передаточной функцией (1) на прямоугольное возмущение с амплитудой U_0 и длительностью τ описывается соотношением:

$$Y(p) = \pm W_0(p) \frac{U_0}{p} (1 - e^{-\tau p}), \quad (17)$$

где $W_0(p)$ — передаточная функция системы, а

$$\frac{U_0}{p} (1 - e^{-\tau p}) — \quad (18)$$

— изображение прямоугольного возмущения на входе системы, знак плюс соответствует деполяризации, минус-гиперполяризации.

Соответственно в пространстве оригиналов реакции системы на прямоугольные возмущения противоположных знаков запишутся в виде:

$$y_1 = +kU_0 [1 + \alpha e^{-\frac{t}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t}{T_s}} - (\alpha e^{-\frac{t-\tau}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t-\tau}{T_s}})] \quad (19)$$

для деполяризации;

$$y_2 = -kU_0 [1 + \alpha e^{-\frac{t}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t}{T_s}} - (\alpha e^{-\frac{t-\tau}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t-\tau}{T_s}})] \quad (20)$$

для гиперполяризации.

Подставив поочередно значение y_1 из (19) и y_2 из (20) в соотношение (12), получим формулы для изменения порога:

$$x_1(t) = \frac{T_1}{k_1 t_0} [E_k - y_1(t)] \quad (21)$$

для деполяризации;

$$x_2(t) = \frac{T_1}{k_1 t_0} [E_k + y_1(t)] \quad (22)$$

для гиперполяризации.

Или

$$x_1(t) = \frac{T_1}{k_1 t_0} \left\{ E_k - kU_0 \left[1 + \alpha e^{-\frac{t}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t}{T_s}} - (\alpha e^{-\frac{t-\tau}{T_s}} - \beta e^{-\frac{t-\tau}{T_s}}) \right] \right\}, \quad (23)$$

где второе слагаемое с коэффициентом α в квадратных скобках правой части равенства (23) определяет кратковременное уменьшение порога в промежутке времени $0 \div t_n$ (t_n — полезное время), третье слагаемое с коэффициентом β — увеличение порога по механизму адаптации для промежутка времени $t > t_n$, четвертое слагаемое с коэффициентом α при члене с запаздыванием на время действия импульса τ — эффект торможения при выключении деполяризующего импульса, пятое слагаемое

с коэффициентом β при члене с запаздыванием определяет процесс возврата к исходной величине порога после выключения раздражителя для моментов времени $t > (t_n + \tau)$ (см. рис. 2, а).

Аналогично соотношение

$$x_2(t) = \frac{T_1}{k_1 t_0} \left\{ E_k + kU_0 \left[1 + \alpha e^{-\frac{t}{T_1}} - \beta e^{-\frac{t}{T_1}} - (\alpha e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} - \beta e^{-\frac{t-\tau}{T_1}}) \right] \right\} \quad (24)$$

описывает все известные электротонические фазы изменения возбудимости при действии гиперполяризующего раздражителя, включая последнюю фазу временного повышения возбудимости в ответ на выключение гиперполяризации.

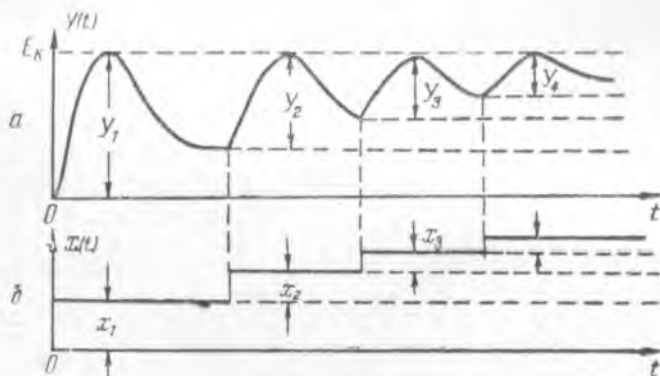


Рис. 3. Схематическое изображение подпороговых реакций возбудимого элемента на серию последовательных скачков деполаризующего тока:

а — реакция возбудимого элемента, б — форма деполаризующего тока.

Совершенно также могут быть получены формулы для электротонического изменения возбудимости во время переходного процесса для треугольных, синусоидальных и других импульсов, а также для серии таких импульсов и постоянно действующей последовательности импульсов любой выбранной формы. Практическая полезность подобного рода соотношений несомненна, так как с помощью их с любой необходимой степенью точности может быть оценена эффективность раздражителей произвольной формы, а при заданной форме может быть выбрана наилучшая частота следования импульсов, что, вероятно, окажется полезным в практике электростимуляции различных органов.

Другим интересным примером изменения порога возбудимости при подпороговых и надпороговых процессах является случай использования в качестве раздражающих стимулов серии прямоугольных скачков, накладывающихся друг на друга. Для этого случая можно получить соотношение, аналогичное закону Вебера, но применимое для малых интенсивностей раздражителя, где обычная форма закона Вебера оказывается неприменимой. На рис. 3 показана серия минимальных скачкообразных приращений раздражителя, достаточных для кратковременного возникновения ощущения на фоне устанавливающейся адаптации, и соответствующих реакций, достигающих критического уровня поляризации.

Величина реакции на скачок в максимуме линейно связана с амплитудой скачка, так как положение максимума во времени фиксировано и определяется только параметрами системы, как показано в работе [1]

при рассмотрении «полезного времени» в модели. Таким образом, из соотношения (8) следует, что

$$y_{i \max} = Mx_i, \quad (25)$$

где $y_{i \max}$ — максимальное значение реакции системы,

M — коэффициент усиления для скачка в максимуме.

По аналогии с законом Вебера находим для минимальных надпороговых раздражителей отношение приращения раздражителя к силе действующего раздражителя:

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{x_i}{\sum_{k=1}^{i-1} x_k}, \quad (26)$$

где $\Delta X = x_i$ — приращение раздражителя,

$X = \sum_{k=1}^{i-1} x_k$ — суммарная величина действующего раздражителя. С другой стороны,

$$x_i = \frac{y_{i \max}}{M} = \Delta X, \quad (27)$$

где

$$y_{i \max} = \frac{E_k - kX}{M}. \quad (28)$$

Теперь соотношение (26) можно записать в виде

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{E_k - kX}{MX}. \quad (29)$$

Из последнего соотношения видно, что величина $\frac{\Delta X}{X}$ не остается постоянной при увеличении X , как это следовало бы из закона Вебера, но убывает по мере роста интенсивности раздражителя X . Соотношение (29) получено в предположении, что критический уровень поляризации E_k не изменяется. Это справедливо только при кратковременном действии слабых раздражителей. Если выражение (29) рассмотреть в условиях, в которых выполняется закон Вебера, то можно определить характер изменения критического уровня поляризации в зависимости от интенсивности входного сигнала. Пусть

$$\frac{\Delta X}{X} = A, \quad (29a)$$

где A — постоянная Вебера. Тогда получим

$$E_k = (AM + k)X, \quad (30)$$

т. е. для выполнения закона Вебера необходимо, чтобы критический уровень поляризации линейно возрастал с ростом X . Вероятно, зависимость порога возбудимости от интенсивности раздражителя не всегда линейна, что и объясняет ограниченную применимость закона Вебера. С другой стороны, соотношение (29) позволяет с достаточной точностью описывать явления, происходящие при кратковременных возмущающих действиях скачков, что может быть использовано при решении многих практических задач, связанных со стимуляцией тканей.

Приведенный выше анализ реакций системы, используемой в качестве модели, на входные сигналы различной формы может быть продолжен для выяснения и других важных особенностей поведения возбу-

димых элементов. В частности, получены соотношения для расчета поляризации и возбудимости во время переходных процессов при действии пачки коротких импульсов. Из тех же соотношений может быть получена величина установившегося уровня поляризации и возбудимости при постоянном действии импульсных раздражителей с произвольной фиксированной частотой. На рис. 4 изображены различные случаи суммирования импульсных реакций системы при различной частоте следования входных коротких импульсов. В зависимости от того, в какую фазу предыдущей реакции попадает следующий возбуждающий импульс, наблюдается либо суммирование гиперполяризации для малых частот, либо суммирование деполяризации при более высоких частотах импульсного возмущения. Установившимся значениям постоянной составляющей реакции соответствуют электротонические сдвиги возбудимости различных нервных элементов. Изображение Лапласа выходного сигнала системы для бесконечной последовательности возмущающих δ -импульсов с площадью A и периодом следования T имеет вид:

$$Y(p) = W_0(p) \frac{A}{1 - e^{-Tp}}; \quad (31)$$

где

$$\frac{A}{1 - e^{-Tp}} =$$

— сумма бесконечной убывающей геометрической прогрессии, представляющей периодическое возмущение системы δ -импульсами в пространстве изображений. В установившемся состоянии уровень поляризации описывается соотношением в пространстве оригиналов:

$$y_{уст} = kA \left[\frac{\alpha}{T_3} \frac{1}{(1 - e^{-T/T_3})} - \frac{\beta}{T_4} \frac{1}{(1 - e^{-T/T_4})} \right], \quad (32)$$

где

$$\alpha = \frac{T_2 - T_3}{T_4 - T_3}; \quad \beta = \frac{T_2 - T_4}{T_4 - T_3}. \quad (33)$$

При $T_4 \gg T_3$, что выполняется в условиях для модели и $T_3 < T < T_4$ получим следующую приближенную зависимость уровня поляризации от частоты входных сигналов:

$$y_{уст} \cong kA \left[\frac{\alpha}{T_3} - \beta v \right], \quad (34)$$

где $v = \frac{1}{T}$ — частота входных δ -импульсов.

Из соотношения (34) следует возрастание уровня гиперполяризации при увеличении частоты, так как $\beta > 0$ (см. рис. 4, б). При $T_4 \gg T_3$ и

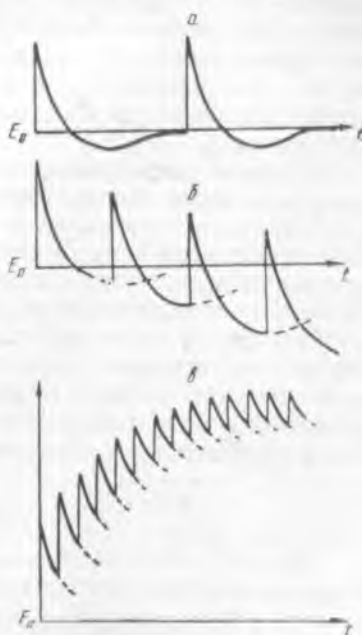


Рис. 4. Условное изображение суммирования следовых поляризационных изменений в реакциях на серии коротких возбуждающих импульсов различной частоты:

а — суммирование отсутствует, б — суммирование следовой гиперполяризации, в — суммирование следовой деполяризации.

$T_2 < T_3$ возрастает уровень деполяризации с увеличением частоты входных импульсов, что выражается соотношением

$$U_{уст} \cong kA \left[\alpha v - \frac{\beta}{T_4} \right], \quad (35)$$

которое соответствует случаю, изображенному на рис. 4, в.

Рассмотренные случаи суммирования подпороговых реакций при прямом внутриэлектродном раздражении с различным конечным эффектом иллюстрируют способность нервных элементов изменять в различных направлениях уровень поляризации и соответственно порог возбудимости. Эта способность в значительной степени определяет более или менее выраженную склонность различных элементов к ритмической активности.

Нервные элементы, импульсная реакция которых имеет сильно выраженную фазу гиперполяризации, обладают наименьшей способностью к суммированию деполяризации и проявлению ритмической активности, хотя в условиях искусственной стимуляции они тоже часто могут быть приведены в состояние ритмической активности, примером чего являются некоторые типы проводящих волокон.

Все полученные выше соотношения могут быть представлены для конкретных нервных элементов в более приемлемой для практического использования форме. В настоящей же работе поставлена цель дать обобщенное описание различных нервных элементов независимо от значения их конкретных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Модель подпороговых явлений в возбудимых элементах. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1, Харьков, 1968.

К ВОПРОСУ О ВИБРАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко

Человек воспринимает мир при помощи органов чувств, которые обогащают его сведения о природе и окружающей среде.

Одним из основных условий эффективности восприятия информации органами чувств является согласование между свойствами получаемых сигналов и характеристиками анализаторов.

Как известно, любой анализатор состоит из трех главных частей: 1) рецептора; 2) проводящих нервных путей; 3) мозгового центра в коре больших полушарий головного мозга. Основная функция рецептора — превращение энергии действующего раздражителя в нервный процесс. Условием возникновения нервного процесса является физическое взаимодействие рецептора с раздражителем. При этом для работы каждого вида рецепторов характерна такая форма взаимодействия, в которой проявляются определенные свойства вещей, составляющие содержание ощущений соответствующей модальности. Вход рецепторов приспособлен к приему только определенных видов воздействия, а его выход посылает сигналы, по своей природе единые для любого входа и выхода нервной системы.

Вторая часть анализатора — проводящие пути — осуществляет передачу нервных импульсов через ряд инстанций нервной системы в кору головного мозга.

Мозговой конец анализатора состоит из ядра и рассеянных в коре головного мозга элементов. Ядро, образованное массой нервных клеток, находится в том участке коры головного мозга, куда входят проводящие пути от рецепторов. По современным данным, связь между рецепторами и мозговым концом анализатора является двусторонней. Это подтверждается рядом экспериментов, а также гистологическими данными. Волокна, идущие от центра к периферии, были обнаружены в составе проводящих путей всех анализаторов.

Таким образом, анализатор представляет собой систему, включающую прямые и обратные связи, благодаря чему обеспечивается его саморегуляция.

Физиологические и психологические данные свидетельствуют о том, что взаимодействие полушарий — это процесс, в котором фазы иррадиации возбуждения (и торможения) сменяются фазами индукции и наоборот. Смена фаз взаимодействия определяется конкретными условиями деятельности анализаторов. Поэтому анализатор считается основным элементом в процессах чувственного отражения.

Главной характеристикой анализатора является чувствительность, которая определяется двумя величинами: абсолютным и дифференциальным порогами.

1. Минимальную величину раздражения, вызывающую едва заметное ощущение, принято называть нижним абсолютным порогом чувствительности; максимальную величину раздражения, при которой интенсив-

ность раздражителя превышает некоторый предел, вызывающий болевое ощущение, — верхним абсолютным порогом.

По абсолютному порогу судят об абсолютной чувствительности анализатора к интенсивности раздражителя:

$$E = \frac{1}{I},$$

где E — чувствительность;

I — пороговая величина раздражения.

2. Другой величиной, характеризующей чувствительность анализатора, является дифференциальный порог, или порог различения. Он определяется минимальным различием между двумя раздражителями, которые вызывают едва заметное различие в ощущении:

$$\frac{\Delta I}{I} = k,$$

где I — величина исходного стимула;

ΔI — величина приращения интенсивности стимула, соответствующая минимальному различению.

Кроме того, многие эксперименты подтвердили, что зависимость между изменением интенсивности стимула и вызываемого им ощущения не может быть линейной, т. е. ощущения изменяются гораздо медленнее, чем раздражитель.

Это отражается законом Фехнера

$$E = k \lg I + C,$$

где E — интенсивность ощущения;

I — интенсивность раздражителя;

k, C — константы.

Существуют и другие психофизические зависимости между раздражителем и ощущением. Следует отметить, что каждому виду чувствительности (тактильная, вибрационная, мышечная и т. д.) соответствуют свои психофизические закономерности.

Важное место в деятельности человека занимает вибрационная чувствительность как переходная форма от тактильной чувствительности к слуху [1]. Многие авторы экспериментально доказали, что тактильные рецепторы обычного типа являются и вибрационными рецепторами, но вибрация, передаваемая от среды к организму, отражается субъектом в форме особого рода ощущения. Установлено, что в обычных условиях жизни и деятельности человека вибрационная чувствительность тормозится слухом, зрением и т. д. При выключении этих видов рецепции она растормаживается и может достичь высокой степени совершенства. Условием ее развития является специальная тренировка [1].

В связи со сказанным становится ясной необходимость создания биологической модели вибрационной чувствительности. С этой целью проводились исследования методом «кибернетического черного ящика» [2]. Сущность метода состоит в том, что формируются различные подходы входных сигналов, позволяющие точно измерить все параметры сигнала. Выходной сигнал устанавливается только ощущением; при этом анализатором является сознание человека.

Основанием для исследования послужил ряд законов.

1. Закон Тальбота:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} B(t) dt = \lim_{\tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} B_N(t) dt,$$

где $B(t)$ — интенсивность входного сигнала.

2. Закон Портера-Айвса:

$$n_{кр} = a \lg A + C,$$

здесь $n_{кр}$ — критическая частота;

a, A, C — константы.

3. Закон Плато:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int [B'_N(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \int [B''_N(t)],$$

где B_N — интенсивность входного сигнала.

Для исследований выбирается самый чувствительный участок кожи. Установлено, что наибольшей чувствительностью обладает кожа концевых фаланг пальцев рук, затем свода стопы и живота. Достаточно указать, что порог вибрационной чувствительности к частоте 50 гц ладонной поверхности первого и второго пальца рук — составляет $2,6 \times 10 \text{ см}^3$, а диапазон воспринимаемых частот от 1 до 10 000 гц. Кроме того, при проведении исследований, исходя из общей природы зрительных, слуховых, вибрационных и других ощущений, следует различать временные, пространственные и пространственно-временные эффекты.

Таким образом, метод «кибернетического черного ящика» дает возможности построить математическую модель вибрационного анализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ц. Андреева-Галанина. Вибрация и ее значение в гигиене труда. Медгиз, 1956.
2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, В. Л. Рвачев, А. Г. Мурашко. Математические модели зрения, изд-во «Техника», 1966.
3. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, В. Л. Рвачев, А. Г. Мурашко, Г. Д. Майстровский. Вопросы теории инерции зрения. Семинар «Математические модели в биологии и бионике», изд. Ин-та кибернетики АН УССР, 1965.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПЕРАТОРА

Э. В. Утеуш

Дальнейшее развитие современных автоматизированных систем содержащих человека-оператора, связано с решением задачи автоматизации контроля его состояния. В связи с этим всестороннее изучение деятельности человека как специфического звена кибернетической системы «человек и автомат» представляет одну из актуальных проблем, решение которой позволит создавать специальные автоматические системы, работающие совместно с оператором.

Среди возможных методов исследования человека как звена кибернетической системы особо выделяются работы по изучению памяти. При этом постановка задачи для исследований непосредственно вытекает из анализа видов памяти человека на основе сравнения со структурами памяти вычислительных машин, а также из выяснения роли памяти в различных процессах восприятия и действия [1, 2, 3]. Учитывая структуру памяти, как было показано [3], можно исследовать рефлекторную систему с помощью математических методов теории замкнутых систем автоматического регулирования.

Методы исследования, учитывающие наличие в рефлекторной системе памяти, наиболее пригодны для тех систем психической регуляции, в которых возможно измерение параметров или воздействия на цепь прямых и обратных связей. Примерами таких систем являются контуры регулирования процесса речи. Для данной системы, как было показано в работе [4], воздействие на контур регулирования осуществляется с помощью введения в цепь обратной связи блока регулируемой задержки времени (БРЗ) (рис. 1, а). Принцип действия этой системы описан в работе [3]. В той же работе дана методика исследований, в частности проверка и разработка критериев осуществимости замкнутых систем регулирования (рис. 1, в).

Проведенные автором предварительные эксперименты по методике изложенной в работе [4], в соответствии с рис. 1, а показали, что при некоторых видах деятельности, например, при чтении стихов, не наблюдается нарушения процессов функционирования модели при изменении времени запаздывания τ во всем диапазоне. Это свидетельствует о развитых экстраполирующих функциях, что подтверждается корреляционным анализом [5]. Однако наличие экстраполяции в психической регуляции затрудняет использование в исследованиях математического аппарата теории автоматического регулирования.

В то же время, как известно, прогнозирование в смысле экстраполяции динамики системы осуществляется в неявном виде в любой системе регулирования, где используется управление по производным [6]. Например, если формировать управляющее воздействие U по закону

$$U(t) = y(t) + a \frac{dy(t)}{dt} - y_{зад},$$

то, подставляя $y(t + \Delta t)$ в виде

$$y(t + \Delta t) \approx y(t) + \frac{dy(t)}{dt} \Delta t,$$

получаем, что при $\Delta t = a$

$$U(t) \approx y(t + \Delta t) - y_{\text{зад}},$$

т. е. управление формируется по экстраполированному значению $y(t)$ [6].

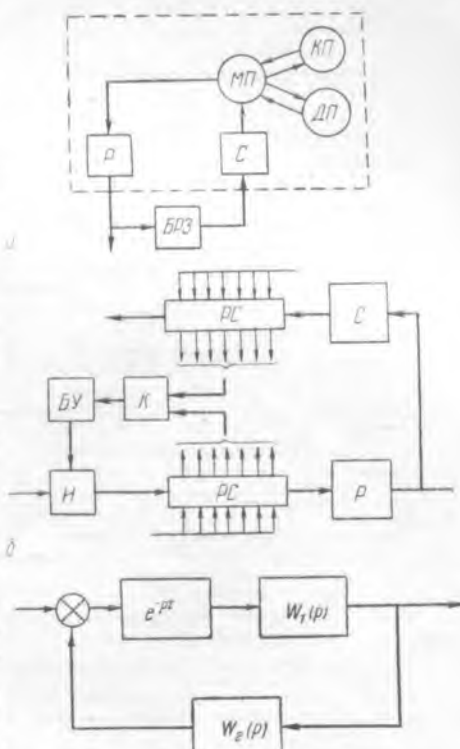
Подобную экстраполяцию следует учитывать при оценке свойств входных сигналов, а также выделять ее из других экстраполирующих функций нервной системы.

Эксперименты с введением блока запаздывания в контур возможны в настоящее время, очевидно, только для тех рефлекторных систем, которые дают внешнее выходное воздействие, контролируемое затем одним из органов чувств. Принятие этого допущения позволяет распространить данный метод исследования на процесс слежения, являющийся самым распространенным видом деятельности человека-оператора. Такие опыты заключаются во включении блоков запаздывания в цепь сигнала идущего к оператору от регулируемой системы (рис. 2, а), или в канал выходной реакции оператора (рис. 2, б). Кроме блоков запаздывания ($e^{-p\tau}$) в данные каналы можно включать и другие звенья с передаточной функцией $W(p)$, как показано на рис. 2, в. Такие эксперименты дают возможность не только изучать роль задержки в передаче действия [7], но и исследовать рефлекторные системы как системы автоматического регулирования; кроме того, в них можно осуществлять контроль функционального состояния оператора по длительности времени регулирования, например, путем измерения времени сенсомоторной реакции в процессе непрерывного слежения.

Особый интерес для рассматриваемых систем представляет изучение взаимных корреляционных функций $K_{f_1 f_2}(\tau)$ [3].

$$K_{f_1 f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t + \tau_1) f_2(t + \tau_2) dt.$$

Введением искусственного блока регулируемого запаздывания с временем задержки τ можно добиться $\tau_1 = \tau_2$, а тогда, как известно из теории корреляции, взаимная корреляционная функция $K_{f_1 f_2}(\tau)$ достигает максимума. Измерение максимума корреляционной функции означает



таким образом, что $\tau_1 = \tau_2$. Поскольку часть этого времени τ поддается регулированию, по значению τ можно судить о различных относительных рассогласованиях во времени Δt , характеризующих индивидуальные особенности оператора либо сдвиги в функциональном состоянии оператора за какой-то промежуток работы.

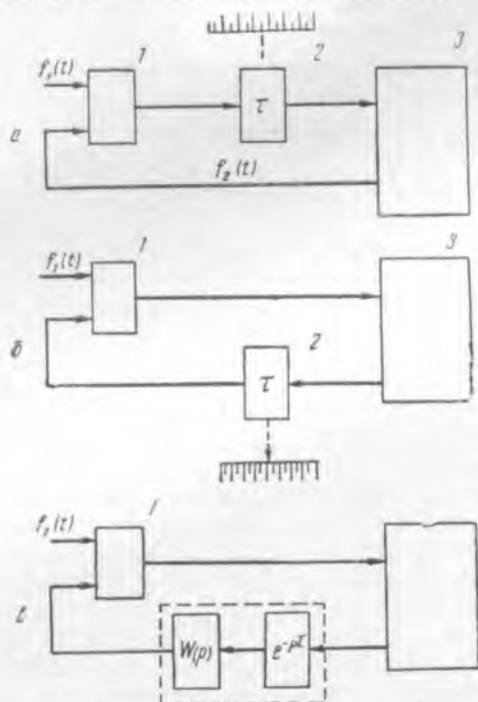


Рис. 2. Изучение влияния задержки в передаче действия:

1 — регулируемая система; 2 — блок регулируемого запаздывания; 3 — человек-оператор; $i_1(t)$ — функция движения цели; $i_2(t)$ — функция движения визира.

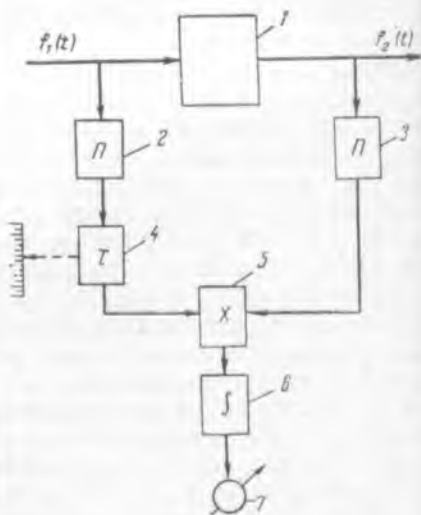


Рис. 3. Блок-схема простейшего корреляционного индикатора для времени сенсомоторной реакции и изучения эскаполирующих свойств оператора:

1 — оператор; 2, 3 — преобразователи; 4 — блок БРЗ; 5 — множительное устройство; 6 — интегратор (или сглаживающий фильтр); 7 — индикатор.

Простейшая схема для измерения времени сенсомоторной реакции выполняется так же, как и схема корреляционного измерителя скорости проката [8]. В применении к данной задаче она представлена на рис. 3.

При использовании схемы автоматического корреляционного измерения скорости [8] схема индикатора преобразуется к виду, показанному на рис. 4.

Упрощение схемы корреляционного индикатора представляет собой важную задачу. В этой связи интересна схема корреляционного измерителя на основе дифференциальной системы [8, 9], приведенная на рис. 5. Объектом регулирования здесь был коррелятор.

Закон регулирования данной системы записывается в виде [9]:

$$U = K_2(\tau) - K_1(\tau).$$

Система находится в устойчивом состоянии при

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{\Delta \tau}{2}.$$

т. е. рабочая точка системы всегда отдалена от экстремума (см. рис. 5) на $\frac{\Delta\tau}{2}$ [9].

Дальнейшее упрощение дифференциальной системы показано в работе [8]. Упрощенная дифференциальная система с одним множительным устройством приведена на рис. 6.

Исследования, проведенные по описанной методике, основываются на результатах работы [3], в которой моделировались процессы восприятия. Однако при изучении процессов слежения следует учитывать некоторые отличия модели и викарных действий в ней по сравнению с моделями для процессов восприятия.

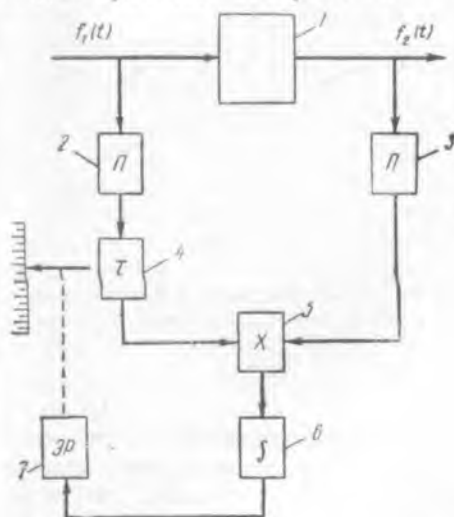


Рис. 4. Схема автоматизации корреляционного индикатора:

1, 2, 3, 4, 5, 6 — те же элементы, что и на рис. 3. ЭР — экстремальный регулятор.

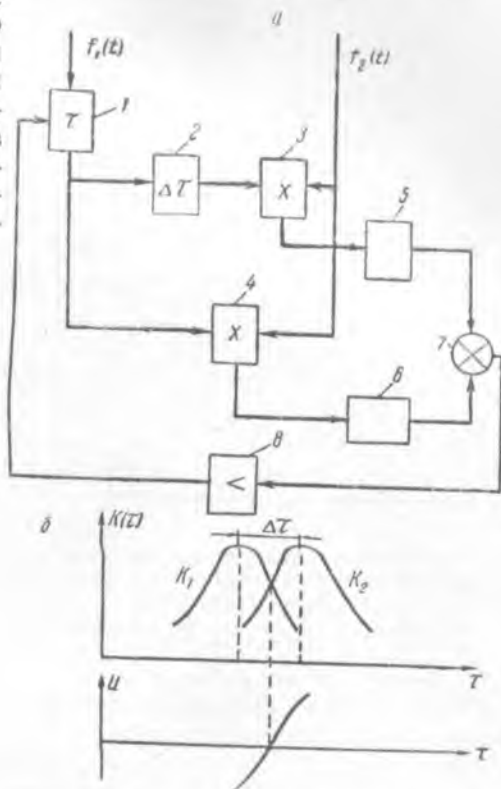


Рис. 5. Корреляционный измеритель на основе дифференциальной системы:

а — блок-схема, б — характеристики системы. 1 — БПЗ; 2 — блок постоянного запаздывания $\Delta\tau$; 3, 4 — множительные устройства; 5, 6 — сглаживающие фильтры; 7 — вычитающее устройство; K_1 (τ) — характеристика модели; U (τ) — разностная характеристика (выходной сигнал вычитающего устройства).

Самостоятельный интерес представляет исследование влияния на человека движущихся изображений в поле зрения (рис. 7). Так, если изображения перемещаются в направлении AD с некоторой постоянной скоростью v , то может возникнуть ситуация, когда некоторый участок на прямой BD , будет характеризоваться наибольшей угловой скоростью движения. Угловая скорость достигает наибольшей величины при движении через точку C . Условия труда при скорости в зоне, характеризуемой углом β , могут оказаться некомфортными, вызывающими переутомление. Выделение угла θ — угла допустимого обзора в поле зрения представляет собой хотя и простую, но важную задачу.

В инженерной психологии при оценке условий видимости из транспортного средства учитывают значение так называемого «блер-порога». Нетрудно показать, что во многих скоростных системах угол θ опреде-

ляет зону, в которой допустимые относительные угловые скорости значительно меньше, чем скорости, определенные по «блер-порогу». Так, для машиниста скоростного локомотива минимальный угол зрения вниз,

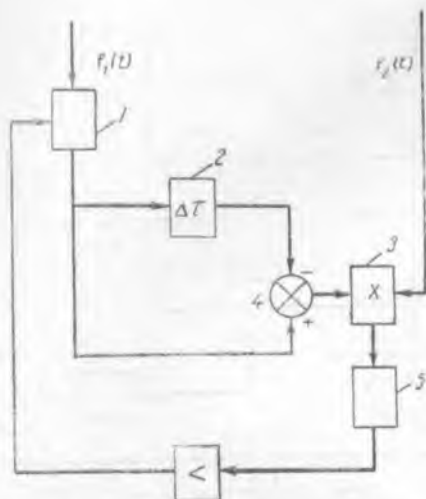


Рис. 6. Блок-схема упрощенной дифференциальной системы с одним многозначным устройством.

1 — БРЗ; 2 — блок постоянного запаздывания ($\Delta\tau$); 3 — множительное устройство; 4 — вычитающее устройство; 5 — сглаживающий фильтр; 6 — усилитель.

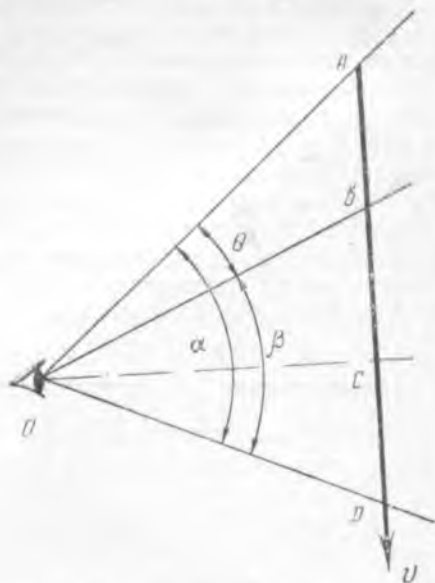


Рис. 7. Иллюстрация к случаю выделения зоны допустимого обзора.

найденный по условиям «блер-эффекта», имеет порядок 20° , а по условиям нормального восприятия, если исходить из особенностей памяти

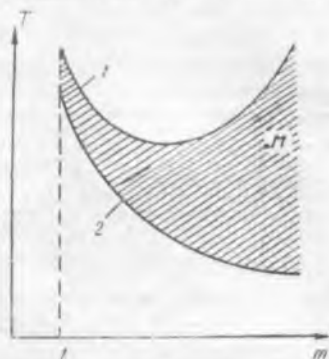


Рис. 8. Область изменения обобщенного критерия T в зависимости от сложности, оцениваемой числом признаков m воспринимаемых образов.

и глазодвигательного слежения, этот угол значительно меньше. Из этого следует, что для снятия утомления у машинистов, шоферов и операторов необходимо, прежде всего, ограничить информацию, получаемую при восприятии полотна движущейся в поле зрения дороги, или конвейера. Достигается такое ограничение путем правильного конструирования транспортных средств или операторских пультов.

На состояние человека-оператора оказывают влияние те оставленные изменения в нервной системе, которые определяются функционированием памяти. Поэтому важно установить интегральный критерий, характеризующий процессы памяти. Нам представляется, что обобщенным критерием является время T — время обработки информации памятью (рис. 8) [2]. Необходимо, однако, учитывать, что значение параметра T ограниче-

но областью между двумя кривыми: 1 — зависимость $\left(\frac{A}{m} + Bm\right)$; 2 — функция $\left(\frac{A}{m}\right)$. Поэтому точка M , характеризующая процесс восприятия,

не выходит из допустимой области. Установление граничных условий требует дальнейшей разработки методики эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Утеуш. О памяти кибернетических систем. Сб. «Проблемы бионики», № 1. Изд-во ХГУ, 1968.
2. Э. В. Утеуш. Моделирование биологической памяти. Там же.
3. Э. В. Утеуш. Регистровая структура как модель памяти и ее роль в процессах восприятия (статья в настоящем сборнике).
4. Э. В. Утеуш. Некоторые вопросы исследования краткосрочной памяти. «Вопросы бионики изд-во «Наука», М., 1967.
5. Г. А. Сергеев, Г. В. Суходольский, В. М. Водлозеров. Исследование статистических характеристик человека-оператора при нестационарных входных воздействиях. Сб. «Система» человек и автомат», изд-во «Наука», 1965.
6. Ф. Б. Гулько и др. Метод прогнозирования при помощи быстродействующих аналоговых вычислительных машин и его применения. «Автоматика и телемеханика», 1964, № 6.
7. П. Фресс, Ж. Пиэже. Экспериментальная психология, изд-во «Прогресс», 1966.
8. С. Ф. Козубовский. Автоматические корреляционные измерители скорости. Изд-во АН УССР, К., 1963.
9. В. І. Васильев. Екстремальні системи керування без пошукових коливань, вид-во «Техніка», К., 1966.

РЕГИСТРОВАЯ СТРУКТУРА КАК МОДЕЛЬ ПАМЯТИ И ЕЕ РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ ВОСПРИЯТИЯ

Э. В. Утеуш

Проблема строения памяти представляет большой интерес для кибернетиков, поскольку решение ее даст возможность лучше разобраться во многих вопросах управления в живых организмах. Особенно важно изучить процессы хранения информации в памяти и управления записью (передачей) информации, а также выяснить связь информации со структурами памяти.

Один из приемов исследования заключается в установлении аналогии между процессами биологической памяти и вычислительной техники. В машинах память разбивается на слова, которые изображаются и запоминаются в виде сигналов или импульсов. Эти сигналы, в свою очередь, представляют отдельные двоичные цифры слов. Во всех устройствах слова воспринимаются как единая кодовая группа. Когда передача слов осуществляется в виде последовательности импульсов, последние синхронизируются относительно друг друга с помощью специальных синхронизирующих импульсов. Такое представление о синхронизации импульсов может стать, очевидно, основополагающим при объяснении феномена биологических часов. В данном случае существенно установить с помощью каких структур может осуществляться хранение и пересылка импульсов. В работе [1] эти процессы связываются с регистровой структурой.

Действительно, регистр представляет собой наиболее общую модель, в которой отражены процессы приема, хранения и выдачи слов. Регистр сдвига осуществляет, кроме того, процессы как параллельной, так и последовательной пересылки информации под действием импульсов управления и является, по-видимому, наиболее вероятной моделью структуры биологической памяти [1]. В той же работе показано, что каждый сдвигающий регистр включается в одну ветвь переключательного дерева и представляет собой элементарную ячейку памяти. Таким образом, в одном регистре сдвига помещается одно рабочее слово, т. е. сам регистр имеет длину одного рабочего слова. В общем случае длина слова памяти может варьировать так, что длина слова в памяти будет меньше или больше длины одного рабочего слова. В первом случае емкость памяти используется неэкономно, во втором — оптимальное заполнение наблюдается лишь в случае, когда длина слова памяти кратна длине рабочего слова. Примеры такого отображения информации в регистрах памяти показаны на рис. 1. В регистре признак начала и конца слова легко определяется при сканировании.

Особый интерес представляет запись в память информации о плоскостных и пространственных фигурах. В психофизике восприятия пространства имеются данные, позволяющие представить главные феноменальные направления двумерного поля зрения в виде декартовой системы координат [2]. Нами высказано предположение, что одно из феноменальных направлений кодируется в рабочем слове некоторой информа-

шей, занимающей в регистре длину h . Пусть, например, признак h будет служить признаком начала информации о горизонтальной линии, которая отображается одним или более чем одним регистром.

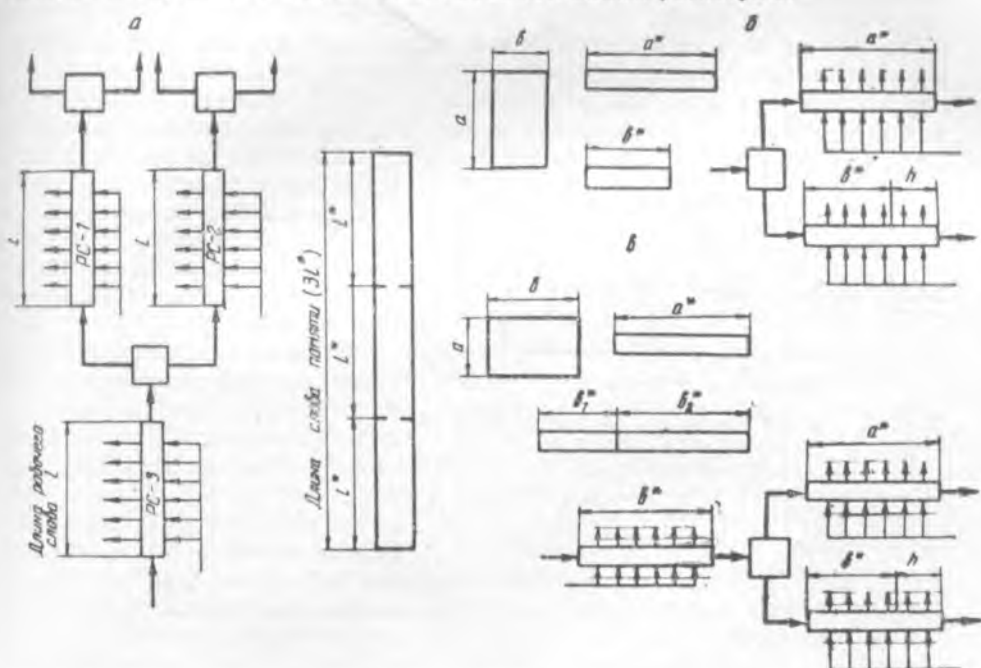


Рис. 1. Иллюстрация случая, когда длина «слова памяти» кратна длине «рабочего слова»:

a — длина слова памяти равна длине трех смежных регистров ветвящегося дерева; $б$ — заполнение емкости двух смежных регистров при записи контура прямоугольника с соотношением сторон $a : b = 1,618$ (золотое сечение); $в$ — заполнение емкости трех смежных регистров при записи контура прямоугольника с соотношением сторон $a : b = 0,618$ (золотое сечение).

Тогда, при записи в память информации о контуре прямоугольника вертикальные линии, как показано на рис. 1, отображаются в регистрах без какого-либо дополнительного признака, а информация о горизонтальных линиях начинается с признака h . Запись слов памяти, кратных длине рабочего слова, является наиболее вероятным свойством адаптивных процессов, осуществляемых, например, посредством дельта-модуляции. На рис. 1, б представлено заполнение регистров модели для отношения $a : b = a^* : b^* = 1,618$, а на рис. 1, в — для отношения $a : b = a^* : b^* = 0,618$. Такие пропорции называются золотым сечением. Для обоих случаев признак h занимает фиксированную длину, равную 0,382 длины рабочего слова. Как легко видеть, только для золотого сечения наблюдается эффективное использование емкости памяти.

Такая интерпретация особенностей восприятия пространства и объяснение феномена золотого сечения, повидимому может дать начало новому направлению в исследованиях систем «человек и автомат». Например, при определении точности для случая двухмерного слежения из анализа модели следует, что точность слежения всегда выше, когда орган управления перемещается в направлении оси Y («на себя — от себя»), т. е. когда в считываемой с регистра командной информации нет дополнительных признаков. Аналогичные факты установлены инженерной психологией, занимающейся изучением различных моторных компонентов действия [3, 4]. Некоторые особенности регуляции физиологиче-

ских функций также можно объяснить с помощью модели. В этой связи целесообразно поставить задачу исследования явления пропорциональности в определенных пределах, близких к золотому сечению, при регуляции давления крови.

Идея последовательности организации, положенная нами в основу моделирования памяти регистровой структурой, используется некоторыми исследователями. Так, Ликлайдер в 1951 г. высказал гипотезу о нервных механизмах измерения периодичности нервной импульсации в слуховой системе [5]. Его модель (рис. 2) состоит из линии задержки

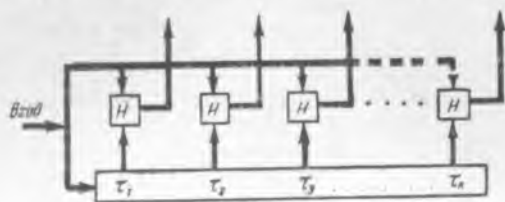


Рис. 2. Схема измерения периодичности нервной импульсации в слуховой системе (модель Ликлайдера):

H — схема совпадения; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ — линия задержки.

с большим количеством отводов, каждый из которых соединен со входом схемы совпадения. На второй вход схемы совпадения подается незадержанный сигнал.

Данная модель не противоречит электрофизиологическим данным [5], однако она не объясняет процессов управления при переносе информации и не предусматривает влияния обратных связей, в частности, афферентационного потока в цепи

рефлекторной дуги. Замена линии задержки регистром сдвига добавляет одну степень свободы для управления процессом пересылки информации от рецепторов в память мозга. Существует несколько гипотез, объясняющих механизмы записи информации, однако этот вопрос, как отмечается в работе [5], еще не исследован: «вне зависимости от того, какая из этих гипотез (или еще какая-либо иная) окажется правильной, все равно остается неясным, как управляется считывание и передача информации в память» [5]. В той же работе отдается предпочтение гипотезе о считывании, синхронизированном с сигналом. Регистровая структура допускает считывание, управляемое сигналом. Например, можно предположить, что на вход регистров поступают сигналы от группы нейронов, реагирующих только на один сигнал, а управление сдвигом информации в регистре осуществляется импульсами от другой группы нейронов, реагирующих на те или иные свойства поступившей в рецептор информации [6].

Важнейшее значение для разработки методики экспериментов по изучению памяти низших уровней имеет установление характера взаимодействия регистровой структуры памяти с рецепторами, а также моделирование памяти рецепторов. Выделение памяти анализаторов в особый вид представляется особенно удачным при изучении быстротекающих переходных процессов. Метод исследования в этом случае часто основывается на аналогиях [7, 8]. В работе [7] отмечается, что зрительный анализатор имеет свою промежуточную буферную память, из которой информация периодически по каналу сетчатка — мозг поступает на более высокие этажи нервной системы. В наших работах на основе аналогии с буферными запоминающими устройствами вычислительной техники выделяется особый вид памяти — мгновенная память (МП) со временем сохранения информации порядка 0,1 сек [8]. Были сделаны предположения о свойствах памяти, моделируемой сдвигающими регистрами, и о связи МП с рецепторами. Время хранения информации в такой структуре, равное 0,1 сек, функционально определяет основную часть времени реакции, большую 0,1 сек. Исходя из этого факта, а так-

же из литературных данных о наименьшей критической длительности, равной $0,01 \text{ сек}$ [9], можно прийти к выводу, что время хранения информации буферной памятью рецептора на один или более чем на один порядок ниже времени $0,1 \text{ сек}$.

Ввиду малости этого времени при разработке методики экспериментов по изучению памяти на основе моделирования механизмов рефлекторной дуги целесообразно не выделять в отдельный вид буферную память рецептора, а объединять данное время ($< 0,01 \text{ сек}$) с общим временем сохранения информации структурой МП. Однако при установлении передаточных функций рецепторов, очевидно, нельзя обойтись без представления о буферной памяти, и для данного случая важно определить характер нервных процессов. Эти процессы протекают в цепях, организованных по принципу «физиологической воронки», в которых несколько клеток сходятся к одной выходной. Для таких цепей, как показал Рапопорт, возможно сканирование [9].

Возникает вопрос, какова скорость этого процесса. Естественно, она должна быть величиной переменной, ибо в противном случае не наблюдались бы адаптационные процессы в рецепторе. Экспериментальные факты говорят об изменении в переходных процессах частоты импульсации ганглиозных клеток, к которым сходятся сканируемые клетки [9]. Исходя из гипотезы о сканировании, можно истолковать эту частоту как частоту управляющих сигналов сканирующего устройства буферной памяти рецептора. Отсюда в первом приближении можно принять, что для нормального процесса сканирования скорость передачи информации Q_2 в буферную память находится в функциональной зависимости от произведения числа волокон n , идущих от рецептивного поля, на «глубину» заполнения их информацией h , т. е.

$$Q_2 = anh. \quad (1)$$

При этом под Q_2 можно понимать скорость изменения числа квантов N_2 :

$$Q_2 = \frac{dN_2}{dt}. \quad (2)$$

Согласно квантовой теории памяти фон Ферстера, величина N_2 характеризует число исчезающих впечатлений, а величина N_1 — ряд элементарных впечатлений, воспринимаемых рецепторами [10]. Тогда скорость изменения воспринимаемых рецептором элементарных впечатлений определится как

$$Q_1 = \frac{dN_1}{dt}. \quad (3)$$

Обозначим номинальные значения притоков Q_{10} и Q_{20} , глубины заполнения h_0 . Тогда в состоянии равновесия приток Q_{10} равен стоку Q_{20} , т. е.

$$Q_{10} - Q_{20} = 0, \quad (4)$$

а глубина заполнения h не изменяется во времени:

$$\frac{dh}{dt} = 0$$

и равна номинальному значению:

$$h = h_0.$$

При отклонении Q_1 от установившегося значения глубина заполнения изменяется со скоростью, зависящей от разности Q_1 и Q_2 , а также от площади рецептивного поля F . Поэтому справедливо очевидное уравнение движения

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = F \frac{dh}{dt}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= Q_1 - Q_{10}, \\ \Delta Q_2 &= Q_2 - Q_{20}.\end{aligned}$$

Для малых отклонений Δh изменение расхода ΔQ_2 можно считать пропорциональным изменению h :

$$\Delta Q_2 \approx \beta \Delta h, \quad (6)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Подставив (6) в уравнение (5), получим следующее линейаризованное уравнение движения в абсолютных единицах:

$$F \frac{dh}{dt} + \beta \Delta h = \Delta Q_1. \quad (7)$$

Для того чтобы привести данное уравнение движения к виду, обычно в теории автоматического регулирования для линейного апериодического звена, удобно использовать уравнение (7) в относительных единицах с безразмерными коэффициентами:

$$T_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + k_c \varphi = \mu, \quad (8)$$

где

$$\varphi = \frac{\Delta h}{h_0}; \quad \mu = \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}}; \quad K_c = \frac{\beta h_0}{Q_{10}}; \quad T_\varphi = \frac{F h_0}{Q_{10}}.$$

Уравнение движения (8) можно записать и в другом виде:

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k \mu, \quad (9)$$

где

$$k = \frac{1}{K_c}.$$

Передаточная функция апериодического звена, как известно, имеет вид

$$W_1(p) = \frac{k}{T_p + 1}, \quad (10)$$

и значение постоянной времени T определяется величиной эквивалентной емкости, равной площади рецептивного поля, т. е.

$$T = \frac{T_\varphi}{K_c} = \frac{F h_0}{Q_{10} \beta h_0} = F \frac{1}{\beta}.$$

Таким образом, данный анализ рецептора сводится к его моделированию апериодическим звеном первого порядка, например, гидравлической емкостью или электрической $R - C$ — цепочкой. В случае гидравлической аналогии (рис. 3, а и 3, з) уровень h изменяется от нулевого до максимального $h_{\max}$, и в этом диапазоне справедливо уравнение (10).

В силу ранее упомянутой гипотезы о строении рецепторов по принципу «физиологической воронки» величина F , как видно из рис. 3, варьирует в определенных пределах. Это является причиной изменения постоянной времени T , причем при максимальной площади рецептивного поля ($F_{1\max}$) постоянная $T = T_{\max}$.

Высказывая суждения о закономерностях, описывающих переходные процессы в рецепторе, мы исходим из предположения о линейности зависимостей между величинами, характеризующими эти процессы. Составляемые на основе этого предположения линейные дифференциальные уравнения, однако, не объясняют многих явлений, имеющих место

в действительности, например, таких, как перестройка рецептивных полей в зависимости от уровня освещенности; *on*- и *off*-эффекты зрительной системы; факты временного накопления и др. Линейные представления в случае рецепторных механизмов восприятия позволяют создать картину переходных процессов, верную только для узкого «линеаризованного» диапазона возможных режимов работы.

Такие представления, по-видимому, пригодны лишь для упрощенного описания процессов в рецепторе, связанном с элементарным рецептивным полем, а не во всей рецепторной системе. При анализе механизмов такого рецептора (рис. 3, а и рис. 3, в) используют обыкновенные дифференциальные уравнения, предполагая, что система содержит элементы с сосредоточенными параметрами. В действительности рецептор является системой с распределенными параметрами, однако поскольку площадь элементарного рецептивного поля мала, а время процессов регулирования в системе относительно велико, то в соответствии с поставленной целью анализа работы замкнутой системы регулирования можно пренебречь переходными процессами в системе собственно одного элементарного рецептивного поля. Время протекания этих процессов по крайней мере на два порядка ниже времени переходных процессов анализируемой системы.

Такой подход позволяет охарактеризовать систему элементарного рецептора одной обобщенной координатой h — глубиной заполнения информацией рецепторных проводящих каналов.

Таким образом, элементарный рецептор рассматривается здесь как динамическая система с $1/2$ степени свободы: движения описываются дифференциальными уравнениями первого порядка. Такой результат получается вследствие пренебрежения малыми емкостными запаздываниями. Учет малых запаздываний, не проявляя ощутимо картину явлений, резко усложняет уравнения движения, повышая их порядок.

Рецепторная система состоит из множества элементарных рецепторов 1, 2, ..., n (рис. 3, б и 3, в), каждый из которых является детектирующим звеном (звеном направленного действия). Детектирующим звеном в теории автоматического регулирования называют звено, пропускающее воздействие только в одном направлении. Каждым элементарным рецептором информация последовательно передается в мозг по отдельному каналу. Поэтому число таких параллельных каналов из ре-

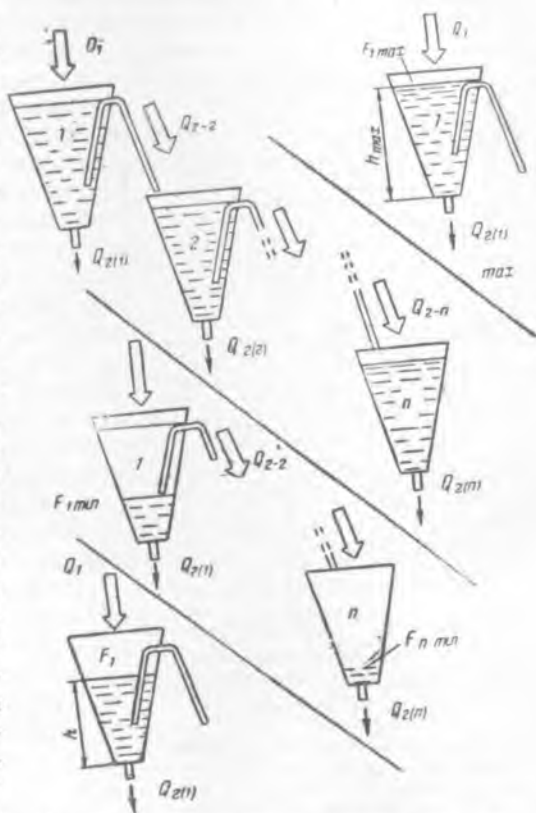


Рис. 3. Гидравлические аналогии при моделировании рецепторов.

цепторной системы равно числу элементарных рецепторов. Отдельный рецептор связан с соседним (например, в направлении от центра к периферии рецептивного поля) через дополнительный канал (рис. 3), имеющий релейную характеристику. В соответствии с нейрофизиологическими данными эти каналы ($Q_{2-2}, Q_{2-3}, \dots, Q_{2-n}$), по-видимому, входят в так называемую интегративную систему [9]. Как из анализа гидравлической модели, так и из данных нейрофизиологии следует, что суммация возбуждений в рецепторе определяется интегративной и рецепторно-проводящей системой в каждом элементарном рецепторе. Гипотетический механизм действия направленных каналов интегративной

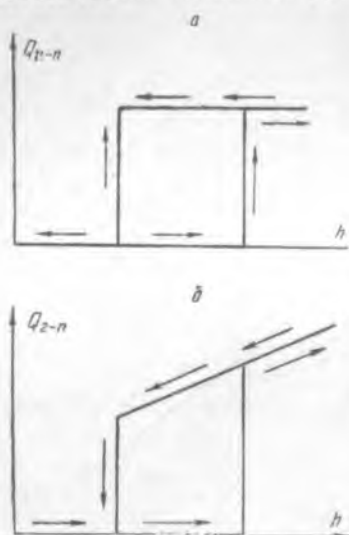


Рис. 4. Гипотетические механизмы действия направленных каналов интегративной системы:

а — релейная зависимость $Q_{2-n} = f(h)$;
б — релейная и статическая зависимость $Q_{2-n} = f(h)$.

системы характеризуется двумя порогоми (рис. 4). С момента времени, когда начинает работать канал Q_{2-2} , площадь рецептивного поля в первом рецепторе уменьшается и ее установившееся значение определяется суммой $Q_{2(1)} + Q_{2-2}$. Может оказаться, что в результате влияния рецепторно-проводящих систем нескольких элементарных рецепторов при сильном стимуле суммарная площадь рецептивного поля станет меньше, чем в случае возбуждения меньшей силы, когда в работу включается меньшее число элементарных рецепторов. Для случая зрительной системы известно, что при включении света дают импульсацию оп-волна.

В предложенной модели оп-эффект объясняется превышением уровня сверхпорогового значения ($h > h_{\max}$) и происходящей вследствие этого перестройкой рецептивного поля. При выключении света наблюдается off-эффект, который имеет ту же природу и наступает при $h < h_{\min}$.

Таким образом, анализ сенсорных систем показывает, что задержка в них является пренебрежимо малой величиной, поскольку при посылке информации в мозг по ряду параллельных каналов наименьшее время передачи определяется лишь емкостью элементарного рецептора. С учетом того крайнего случая (рис. 3, в), когда восприятие характеризуется малой площадью рецептивных полей (при стимуле большой интенсивности), время задержки в сенсорной системе становится близким к нулю, и переходные процессы в элементарном рецепторе описываются выражением (10). Иной характер имеют переходные процессы по перестройке рецептивных полей, так как емкость всей рецепторной системы относительно велика. Это обуславливает неодинаковое время сенсорной задержки в параллельных каналах передачи информации в мозг.

Для каждого такого канала можно построить модель регуляции, в которой основная временная задержка равна длительности сохранения информации в последовательной регистровой структуре (рис. 5, а). В соответствии с рассмотренными здесь гипотезами эта задержка не обусловлена временем поступления сигналов в мозг, потому что с первых же элементов регистровой структуры или линии задержки (в модели Ликлайдера) информация поступает в центры для измерения перио-

дичности нервной импульсации. Следовательно, при анализе контура рефлекторной дуги, как системы регулирования, временная задержка в двигательной реакции определяется каналом обратной связи с включенной в него структурой МП (рис. 5, а). Аналоговая модель такой системы регулирования в первом приближении представлена на рис. 5, б.

В основу моделирования положена концепция об адекватности образа и деятельности с использованием представления о формировании системы так называемых викарных действий [7]. В предложенной модели (рис. 5, а) викарные действия, адекватные воспринимаемому образу, осуществляются цепочкой: «распознающее устройство (РУ) — память (П) — регистр сдвига (РС-2) — двигательная система (ДС)». В цепях системы выделяются следующие функции: на РС-1 — функция $f_1(t)$, на РС-2 — $f_2(t)$. В нормальном режиме данные сигналы имеют аналогичную форму и сдвинуты друг относительно друга на некоторое время τ , необходимое для процессов распознавания образа, принятия решения и извлечения из памяти информации. При моделировании процессов регуляции обычной следящей системой (рис. 5, б) сигнал $f_1(t)$ — это сигнал в цепи рецепторной системы, а $f_2(t)$ — тот же сигнал в цепи обратной связи, т. е.

$$f_2(t) = f_1(t + \tau).$$

Анализ данной следящей системы, проведенный в работе [11], показывает, что для обеспечения наилучшего процесса регулирования необходимо так реализовать передаточную функцию канала обратной связи $W_2(p)$, чтобы

$$W_2(p) = \frac{e^{p\tau}}{W_1(p)} - \frac{1}{\Phi(p)}, \quad (11)$$

где $\Phi(p)$ — оптимальная передаточная функция системы при данном виде возмущающего воздействия. Реализация функции $W_2(p)$ связана с построением упреждающего звена. Для данной системы ошибка упреждения рассматривается как функция времени запаздывания τ : с увеличением τ возрастает ошибка упреждения. В работе [11] также показано, что при некотором достаточно большом τ построение упреждающего звена становится невозможным, так как значения величины сигнала, разделенные временем τ , становятся практически некоррелированными. Поэтому критерий осуществимости для таких систем имеет вид [11]:

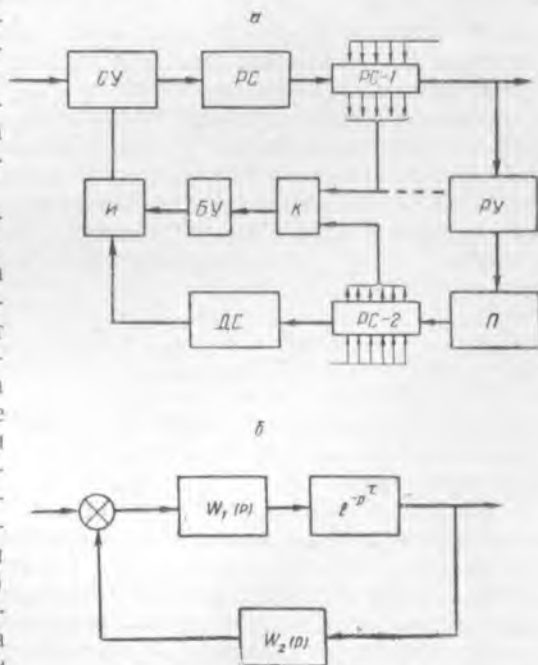


Рис. 5. Моделирование системы регулирования процессов в рецепторных системах: а — схема системы с корреляцией сигналов в цепях прямой и обратной связи; СУ — сканирующее устройство; РС — рецепторная система; РС-1 и РС-2 — сдвигающие регистры; РУ — распознающее устройство; П — память; ДС — двигательная система; И — схема совпадения; БУ — блок управления; К — коррелятор; б — упрощенная структурная схема системы автоматического регулирования.

$$t_0 > \tau, \quad (12)$$

где t_0 — время спада корреляционной функции $f(t)$.

Для получения необходимого качества регулирования, кроме выполнения условия (12), нужно обеспечить определенную степень корреляции между значениями функции $f(t)$, разделенными временем $t = \tau$, т. е. выполнить условие [11]:

$$F[R_x(0), R_x(\tau)] \geq P, \quad (13)$$

где P — величина, определяемая из требований к точности функционирования, R_x — корреляционные функции.

Очевидно, что критерии (12) и (13) применимы лишь тогда, когда в цепях прямой и обратной связи наблюдается одна и та же функция $f(t)$, сдвинутая на время τ . Такие условия всегда выполняются в случаях детерминированного входного сигнала, при определенной тренированности, достаточно быстром распознавании образа и т. д. В общем же случае сигналы в цепях рецепторной и двигательной систем разные, и поэтому имеет смысл рассматривать взаимную корреляционную функцию

$$K_{f_1 f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t + \tau_1) f_2(t + \tau_2) dt, \quad (14)$$

где τ_1 — запаздывание, осуществляемое мгновенной памятью на РС-1 ($\tau_1 = 0 - 0,1$ сек); τ_2 — запаздывание, определяемое действием цепи обратной связи.

В работе модели (рис. 5, а) можно выделить два этапа. На первом этапе функция $f_1(t)$ распознается мозгом, на втором — величина взаимной корреляционной функции $K_{f_1 f_2}(\tau)$ становится выше некоторого значения, в соответствии с условием аналогичным критерию (13). Без осуществления этих этапов функционирование модели, например, работа сканирующего устройства (СУ) рецепторной системы, не имеет смысла. Для процессов опознания необходимо определенное время фиксации сканирующего устройства. Данное условие выполняется цепью обратной связи, подающей разрешающие (растормаживающие) импульсы в сканирующее устройство (СУ). В соответствии с моделью (рис. 5, а), механизмы действия каналов обратной связи состоят в определении значения взаимной корреляционной функции цепочкой «РС-1, РС-2 — релеятор (К) — блок управления (БУ)» и в подаче по каналу «двигательная система (ДС) — ячейка совпадения (И)» разрешающего сигнала для производства сканирующим устройством одного шага. Для зрительной системы такая природа регулирования подтверждается скачкообразным перемещением глаза в процессе рассматривания, когда он совершает саккадические (скачкообразные) движения от одной точки фиксации к другой. При этом на перемещение затрачивается лишь около 3% всего времени рассматривания [9]. Таким образом, проведенный анализ позволяет прийти к выводу о том, что время каждой фиксационной паузы регулируется в соответствии с моделью (рис. 5, а), причем с уменьшением запаздывания в цепи «распознающее устройство (РУ) — память (П) — регистр (РС-2)» уменьшается длительность фиксационной паузы.

Сделанное здесь описание процессов основано на аналоговой форме сигнала в рецепторных системах. Но большинство исследователей относят эти сигналы к дискретным, являющимся по своему характеру частотно-импульсным кодом. Такая форма сигнала предопределяет по-

строение коррелятора, в схеме которого используются так называемые «двойные релейные» корреляционные функции, имеющие вид

$$K_{f_1 f_2}^{**}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \text{sign}[f_1(t + \tau_1)] \text{sign}[f_2(t + \tau_2)] dt. \quad (15)$$

При оптимальной работе модели здесь, в отличие от случая непрерывных сигналов, когда $f_2(t + \tau_2) = f_1(t + \tau_1)$, должно соблюдаться равенство сигнум-сигналов:

$$\text{sign}[f_2(t + \tau_2)] = \text{sign}[f_1(t + \tau_1)]. \quad (16)$$

При этом, как известно из теории корреляции, взаимная корреляционная функция достигает максимума при $\tau_1 = \tau_2$. Если τ_1 рассматривать как ось задержки времени, то положение максимума корреляционной функции случайного непрерывного сигнала на оси задержек времени всегда совпадает с положением максимума двойной релейной корреляционной функции; при этом более острый пик двойной релейной корреляционной функции обеспечивает более высокую точность определения положения максимума на оси τ [12].

Связь между двойной релейной корреляционной функцией и пропорциональной корреляционной функцией наиболее сильна в положении максимума, когда $\tau_1 = \tau_2$. При появлении и увеличении рассогласования ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$) она ослабевает, а методическая погрешность двойной релейной корреляционной функции сигнала становится отличной от нуля [12]. Для случая использования двойных релейных корреляционных функций остаются в силе критерии осуществимости, подобные отношениям (12) и (13). Однако с увеличением $\Delta\tau$, как следует из работы [13], точность определения оценок корреляционных функций падает. Поэтому наиболее достоверные участки оценок корреляционных функций находятся в окрестности точки $\tau_1 = \tau_2$.

Таким образом, на основании данного здесь анализа можно сделать вывод о том, что одним из вероятных свойств рецепторной системы является измерение нервной системой максимума взаимной корреляционной функции $K_{f_1 f_2}$ или $K_{f_1 f_2}^{**}$ при $\tau_1 = \tau_2$. Для этих целей требуется сравнительно небольшая задержка $\tau_1 = \tau_2$. Поэтому результаты настоящего исследования объясняют высокую целесообразность биологической организации, заключающуюся в наличии переменных временных задержек на сдвигающих регистрах для сравнительно малого диапазона $\tau_1 = \tau_2 = 0 \div 0,1$ сек.

Сравнение данных о длительности фиксационных пауз позволило выявить ряд интересных особенностей. Известно, что нижний предел времени фиксации взора — так называемая критическая длительность фиксационной паузы — равен 0,05 сек [9]. Такая длительность возможна лишь при соответствующем экстраполировании входных сигналов, когда цикличность процесса слежения в рецепторной системе определяется только работой коррелятора, для которого данный интервал является минимально необходимым при вычислениях. Для случая недетерминированных входных сигналов экстраполирующие функции в нервной системе ослабевают и поэтому длительность фиксационной паузы возрастает. При приеме случайных сигналов саккадические движения глаз должны повторяться не чаще чем через 0,1 сек, когда время распознавания и длительность экстраполяции равны нулю.

Важным элементом модели (рис. 5, а) является коррелятор. Его изучение также удобно вести на основе установления аналогии. Нами сделано предположение о том, что корреляционные измерители скорости

в первом приближении являются бионическими моделями корреляторов автоматической регуляции рецепторных систем. Корреляторы для дискретных сигналов с использованием двойных релейных корреляционных функций имеют более простое устройство, чем корреляторы для непрерывных сигналов [12]. Поэтому в настоящее время они интенсивно разрабатываются, и в технике измерения скорости космических кораблей применяются корреляторы с линией задержки на одном или двух регистрах сдвига [12].

Установить роль регистров в рецепторных системах, а также влияние их параметров на процессы восприятия помогает анализ бионических моделей, который весьма нагляден при оценке погрешностей. Число элементов в регистрах схемы влияет на погрешность работы системы измерения скорости [12]. Это обстоятельство следует учитывать при сравнительном исследовании биологических систем. Время задержки, устанавливаемое с помощью регистров сдвига, также оказывает влияние на относительную погрешность определения корреляционной функции. Здесь особенно существенно установить, в каком масштабе времени работает коррелятор. Решить такую задачу пока еще не представляется возможным, однако отдельные факты могут прояснить картину. Известную ценность имеет, например, вывод о том, что длительность одного цикла работы коррелятора в рецепторной системе равна, как это выше было показано, 0,05 сек. Цикличность работы коррелятора определяется временем интегрирования. Время интегрирования T конечно, поэтому для описания работы коррелятора применимы так называемые «текущие корреляционные функции» [14]:

$$K_{f_1 f_2}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t + \tau_1) f_2(t + \tau_2) dt, \quad (17)$$

$$K_{f_1 f_2}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T \text{sign}[f_1(t + \tau_1)] \text{sign}[f_2(t + \tau_2)] dt. \quad (18)$$

Данные выражения тем более отличаются от значений функций (14) и (15), чем короче время интегрирования и чем меньше низшая частота спектра случайного процесса [15]. Если известны допустимые относительная погрешность определения корреляционной функции δK и низшая частота спектра случайного процесса ω_n , то формула для приближенной оценки необходимого интервала интегрирования T имеет вид [12, 15]

$$T \geq \frac{1}{\omega_n \delta K}. \quad (19)$$

Эта формула позволяет разработать методику экспериментов по определению неизвестных в нашем случае членов формулы (19), т. е. значений T и δK . В одной серии экспериментов можно добиться наименьшей критической длительности фиксационной паузы и тем самым установить функционально связанное с ней значение T . Очевидно, оно, как выше отмечалось, всегда будет меньше 0,05 сек. Данные опыты соответствуют режиму работы, когда определяется максимум взаимной корреляционной функции с наименьшей относительной погрешностью. Другая серия экспериментов по определению величины δK отличается особой сложностью, так как время фиксационной паузы определяется в этом случае рядом компонентов: временем работы коррелятора, длительностью экстраполяции и временем распознавания. Кроме того, сложность заключается в том, что корреляционные функции в реальных условиях будут определяться при Δt , отличных от нуля. Для режима

$\Delta t \neq 0$, как уже отмечалось, погрешность в определении корреляционных функций возрастает. Поэтому для данных экспериментов особенно важно внести дополнительные уточнения в методику.

Таким образом, на основе анализа работы рецепторных систем можно сделать ряд интересных выводов. Важное значение, в частности, имеет заключение о необходимости включить в такие системы сдвигающие регистры в качестве регулируемых линий задержек. Для более полного понимания процессов регулирования в рецепторных системах, а также для установления особенностей памяти требуется дополнительный анализ свойств регистровых структур мгновенной памяти.

Прежде всего возникает вопрос, синхронизировано ли считывание информации в памяти с входным сигналом. Некоторые факты говорят в пользу такой гипотезы [5], однако пока еще нет достаточно убедительных данных, свидетельствующих о том, что в зависимости от сигнала меняется частота управляющих сигналов сдвигающего регистра. Применяя такой принцип в технике корреляторов для получения переменной длительности задержки, с этой целью используют дополнительные регистры. Например, в системах корреляционного измерителя скорости космического корабля имеются регистры сдвига, управляемые регулируемым генератором тактовых импульсов [12]. Поэтому можно заключить, что при любом устройстве коррелятора имеются линии задержки на регистрах сдвига, выполняющие одновременно роль буферной (мгновенной) памяти. Поскольку эти регистры должны работать согласованно с остальными, более высокими уровнями памяти, исследования мгновенной памяти, в частности работы по выявлению характера управляющих импульсов регистров сдвига, имеют важное значение для решения проблем памяти.

Некоторые феноменальные явления в центральной нервной системе, имеющие длительность 0,1 сек, дали исследователям материал для теории «рефрактерности» мозга, основанной на периодике α -ритма [16]. Питтс и Мак Калок рассматривали α -ритм как выражение сканирующей деятельности коры с частотой порядка 10 гц. В связи с такой концепцией особый интерес представляет теория Страуда о новой психологической единице времени, отличной от астрономической и равной 50—100 мсек [16].

Страуд рассматривал восприятие не как непрерывную функцию времени, а как последовательность дискретных значений (квантов восприятия). В течение критического интервала информация, по Страуду, накапливается, но если нервная система имеет для измерения того или иного аспекта стимула меньше 50—100 мсек, то результат будет неточен или извращен.

В рамках данной теории это явление математически интерпретируется так: информация представляет собой функцию времени

$$L = f(t),$$

а оценка этой информации мозгом может иметь только одно значение

$$B = \int_{t_1}^{t_2} Kf(t) dt. \quad (20)$$

Легко видеть, что теория Страуда представляет собой частный случай и во многом сходна с изложенной выше теорией корреляции, используемой при объяснении процессов восприятия. Согласно Страуду, если $t_1 - t_2$ ограничены интервалом меньше $50 \div 100$ мсек, то измерение не выполняется или выполняется ошибочно. То же следует и из теории корреляции. Коррелятом воспринимаемой величины сенсорного стиму-

ла по Страуду, является не общий временной интеграл центрального возбуждения, а интеграл в момент окончания критической длительности или критического ряда длительностей [16].

Данный вывод следует из теории действия модели (рис. 5): максимальное значение взаимной корреляционной функции будет получено при $t_1 \equiv t_2 \approx 50 \div 100$ мсек. Несмотря на то, что теория Страуда объясняет множество фактов, она все же не согласуется с явлением обратной маскировки и с субъективными оценками длительности очень коротких сигналов L (порядка нескольких миллисекунд). Теория, на которой основан принцип работы предложенной нами модели, хорошо объясняет это явление. Действительно, краткий одиночный звук ($20 \div 50$ мсек) будет оцениваться системой (рис. 5, а) в течение периода пересылки информации регистром сдвига (100 мсек плюс $20 \div 50$ мсек). Поэтому общее время, в течение которого нервная система регистрирует этот звук, будет не меньше чем $120 - 150$ мсек, и этот факт согласуется с данными нейрофизиологии [16]. Несколько дополняют и уточняют теорию Страуда результаты, полученные Крилманом при моделировании слуха [16].

Однако теория Страуда со всеми уточнениями мало применима при исследовании биологических систем, являющихся, как известно, по своей природе подлинно кибернетическими. Нам представляется, что любая имеющая широкое значение концепция о работе органов чувств и психофизиологии ощущений должна, прежде всего, основываться на кибернетических принципах, в частности, на использовании аппарата теории обратной связи. В этом смысле предпосылки для разработки кибернетических теорий заложены в трактовке восприятия как действия, адекватного образу [7].

Такая постановка проблемы в сочетании с кибернетическим подходом, примененным в настоящей работе, позволила предложить модель для объяснения механизмов восприятия и, кроме того, установить понятие о длине рабочего слова памяти, равного длине одного сдвигающего регистра. Поэтому психологическая единица времени тесно связана с временем хранения информации в сдвигающем регистре. По аналогии с вычислительными машинами, как было выше показано, информация, распределенная по длине одного рабочего слова, воспринимается как единая кодовая группа при обработке информации в нервной системе. В связи с этим наиболее вероятным процессом, проявляющимся в α -ритме, представляется процесс стробирования, который, в частности, может иметь место при работе распределителей, переключающего дерева [1]. Сканирование, как известно, является процессом, отличным от стробирования, и для осуществления его частота управляющих импульсов в сдвигающих регистрах должна быть значительно выше 10 гц. В заключение нам хочется особо отметить одну работу [17], важную для обоснования сделанных нами выводов о регистровой структуре памяти. В этом исследовании выявлена роль процесса стробирования и обоснована связь α -ритма с временем $0,1$ сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Утеуш. О памяти кибернетических систем. Сб. «Проблемы бионики», № 1, Изд-во ХГУ, 1968.
2. Ф. Кликс. Проблемы психофизики восприятия пространства, Изд-во «Прогресс», М., 1965.
3. Б. Ф. Ломов. Человек и техника, изд-во «Сов. радио», М., 1966.
4. М. А. Кремень. Экспериментальное исследование особенностей процесса слежения в их зависимости от входных сигналов. Автореф. канд. дисс., ЛГУ, 1966.

5. Л. А. Чистович. Психоакустика и вопросы теории восприятия речи. Сб. «Автоматическое распознавание слуховых образов», изд-во «Наука», Новосибирск, 1966.
 6. Э. В. Утеуш. Принципы организации памяти как последовательной структуры. Сб. трудов I Украинской конференции по бионике. «Бионика. Моделирование биосистем», изд. Института кибернетики АН УССР, К., 1967.
 7. Н. Ю. Вергилес, В. П. Зинченко. Проблема адекватности образа. «Вопросы философии», 1967, № 4.
 8. Э. В. Утеуш. Некоторые вопросы исследования краткосрочной памяти. Сб. «Вопросы бионики», изд-во «Наука», М., 1967.
 9. В. Д. Глезер, И. И. Цуккерман. Информация и зрение. М.—Л., 1961.
 10. Ст. Бир. Кибернетика и управление производством, изд-во «Наука», М., 1965.
 11. Э. Л. Ицкович. О построении схемы регулирования для объектов с чистым запаздыванием. «Автоматика и телемеханика», т. XX, № 8, 1959.
 12. С. Ф. Козубовский. Автоматические корреляционные измерители скорости, Изд-во АН УССР, К., 1963.
 13. Э. Л. Ицкович. Статистические методы при автоматизации производства, изд-во «Энергия», 1964.
 14. А. А. Харкевич. Очерки общей теории связи, Гостехтеоретиздат, М., 1955.
 15. В. В. Солодовников. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления, Физматгиз, М., 1960.
 16. С. Н. Гольбурт. Нейродинамика слуховой системы человека, Изд-во ЛГУ, 1964.
 17. Н. Винер. Новые главы кибернетики, изд-во «Сов. радио», М., 1963.
-

ОБ ОДНОМ ПЕРСПЕКТИВНОМ НАПРАВЛЕНИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В. П. Белявский, Ю. А. Василенко, Н. Я. Какурин

Научно-технические достижения последних лет во многом обусловлены развитием вычислительной техники, техники связи, методов обработки информации. Эти направления обеспечили создание сложных технических систем. Однако с ростом сложности решаемых задач и повышением требований к качеству систем возникло противоречие между показателями, определяющими целесообразность построения систем с вычислительными комплексами.

Одним из таких показателей является надежность функционирования. Обеспечение должного уровня надежности при возросшей сложности требует снижения интенсивности отказов отдельных элементов системы на два порядка, что технологически неприемлемо и экономически невыгодно. Поэтому возникает необходимость в разработке новых принципов и методов построения схем, сохраняющих надежность работы при сравнительно низкой надежности элементов системы, разбросе значений их параметров или даже выходе из строя некоторого количества элементов.

Современные вычислительные системы теряют свою работоспособность почти из-за любой неисправности. Значительное повышение сложности систем, может привести к тому, что неисправности станут более вероятными, а чрезмерная миниатюризация только затруднит ремонт или сделает его вообще невозможным. В обоих случаях издержки, связанные с исправлением неисправностей, возрастают. Естественно, что проектировщика интересует вопрос о том, когда издержки, связанные с неисправностями, делают проектируемую систему нецелесообразной.

Как известно, наиболее надежными являются биологические системы.

Надежность этих систем представляет собой результат длительно-го эволюционного процесса в условиях изменчивой внешней среды.

Наблюдая в природе разнообразные высокоорганизованные системы, их приспособляемость к изменяющейся среде, развитие и самовоспроизведение, мы приходим к мысли, что в основе их лежит единый механизм, обуславливающий способность этих систем не растрачивать свою упорядоченность, т. е. обеспечивать выполнение функций системы. Такие системы — самоорганизующиеся. Подобными системами являются и кибернетические.

Кибернетическая система характеризуется следующими особенностями:

- 1) она чрезвычайно сложна — до такой степени, что структура ее в деталях не поддается определению;
- 2) она чрезвычайно вероятностна — до такой степени, что, будучи сложной по строению, становится неделимой и каждая траектория ее движения равновероятна;
- 3) она обладает самоорганизацией — коренным свойством, проявляющимся в ней изнутри.

По Павлову, функция управления наряду с наиболее сложными формами аналитико-синтетической переработки всей получаемой информацией есть высшее проявление рефлекторной деятельности (высшей нервной деятельности).

Совершенные принципы самоорганизации механизмов переработки информации сформировались в природе в результате многих миллионов лет конкурентной борьбы и естественного отбора, в ходе длительного процесса эволюции.

Конструкция мозга как органа рефлекторного отражения окружающей среды и организатора поведения все больше и больше привлекает к себе внимание исследователей. Дальнейший прогресс наших знаний в этой области, несомненно, связан с систематическим накоплением фактического материала, с установлением подробностей строения мозгового вещества и взаимосвязей между отдельными его элементами.

Головной мозг и нервная деятельность животных и человека могут служить примером блестящего решения надежности в живой природе. Несмотря на то, что многие стороны функционирования и структурной организации нервной системы еще не исследованы, хорошо известна удивительная эффективность ее работы. По мнению некоторых специалистов, при самых благоприятных условиях существования организма, каждый час безвозвратно погибает около тысячи нейронов [1]. Подавляющее большинство ученых считает, что нейроны — единственный вид клеток, которые совершенно не размножаются делением. Однако, несмотря на это, мозг обеспечивает жизнедеятельность организма в течение многих десятков лет, а в ряде случаев даже восстанавливает нарушенные функции. В ходе эволюции животного мира нервная система развивалась как орган, обеспечивающий наиболее совершенную форму приспособления к условиям окружающей среды посредством сигнальной деятельности.

В отличие от растений, реагирующих изменениями своей жизнедеятельности лишь на непосредственное внешнее воздействие, животное способно реагировать на сигналы от раздражителей, т. е. воспринимать и перерабатывать в ответные действия содержащуюся в этих сигналах информацию.

Материальным субстратом сигнальной деятельности являются следующие три основных элемента, соединенные между собой в определенном порядке по ходу рефлекторной дуги:

1) рецепторы — клетки органов чувств, воспринимающие раздражения и трансформирующие их в ответные реакции в виде нервных импульсов;

2) нейроны — нервные клетки с их отростками, осуществляющие разнообразные переключения нервных импульсов на пути их передачи от начального звена рефлекторной дуги к конечному ее звену;

3) эффекторы — клетки мышц и желез — элементы, посредством которых реализуются рефлекторные ответы организма на раздражения.

Основные единицы построения нервной системы — нейроны — возникают и развиваются как специальный аппарат связи между рецепторами и эффекторами. Именно нейроны ответственны за определение сигнального значения раздражителя и за выработку биологически целесообразных приспособительных реакций.

Вся центральная нервная система человека содержит около 10^{10} нейронов, причем половина этого количества приходится на головной мозг. В процессе эволюции происходила все большая дифференциация нервных клеток. В результате у живых организмов выделилось определенное количество нейронов, которые специально информируют орга-

низм обо всех изменениях, происходящих во внешней среде. Дифференцирование типов нейронов, усложнение аппарата рецепции сигналов — таков переход от элементарно-чувствительного отражения качеств и интенсивностей раздражителей к отражению образов вещей и явлений, т. е. к воспроизведению более сложных мозговых моделей. В основе строения нервной системы лежит один общий принцип, имеющий универсальное значение. В соответствии с ним любой нейрон как элементарная единица переключающего устройства является точкой схождения и расхождения переключаемых в ней импульсов, т. е. представляет собой прибор, осуществляющий на клеточном нервном уровне определенную форму анализа, синтеза и отбора проходящего сквозь него сигнала.

Всякая открытая кибернетическая система в процессе нормального функционирования получает информацию из внешней среды и преобразует ее по тому или иному алгоритму. Существует ряд методов анализа кибернетических систем, каждый из которых преследует вполне конкретную цель.

Наиболее общим из методов является структурный анализ, который позволяет дать самую обобщенную характеристику системы — определить ее структуру. Структура представляет собой некоторое множество элементов, упорядоченное вполне определенным образом. Элементы ее — это единичные неделимые компоненты системы. Независимо от степени сложности структуры (среда, иерархия, система или одиночный объект) каждый входящий в нее элемент может быть проанализирован, хотя и под другим углом зрения, относительно другого вида отображения. При структурном анализе технических систем в качестве элементов принимаются те или иные единичные функциональные узлы. Биологические системы, в частности центральная нервная система, функционально и структурно организованы значительно сложнее любой из созданных человеком систем. Многое в работе нервной системы животного и человека остается неизвестным. Но многочисленные и достоверные факты нейрофизиологии, морфологии и других наук, изучающих нервную систему человека, дают все основания считать, что в основе структурной организации нервных систем лежит вполне определенная упорядоченность единичных нервных клеток (нейронов).

Знание структуры и функций центральной нервной системы может существенно помочь при синтезе технических кибернетических систем. Однако до тех пор, пока не известны принципы работы элементов нервной системы, невозможно проанализировать структуру нервной системы. Наоборот, зная вполне определенно, какова структура биологического нейрона и структура функциональных связей нейронов в нервной системе, можно сделать вывод о целесообразности использования нейроноподобных элементов для синтеза тех или иных кибернетических устройств.

Решение этой проблемы связано с развитием бионики, использующей знание элементов и систем живой природы для решения инженерных задач. От анализа биологических систем через математическую формализацию к синтезу новых, значительно более совершенных, технических систем переработки информации — таковы принципы бионики.

Сейчас намечаются три направления развития в бионике:

- 1) биологическая бионика, изучающая физические процессы в биологических системах;
- 2) теоретическая бионика, изучающая построение математических моделей биологических систем;
- 3) техническая бионика, применяющая сведения, полученные пер-

выми двумя направлениями, для решения конкретных технических задач.

Важнейшими задачами технической бионики являются анализ, формализация и синтез биологических принципов надежности, открывающих новые возможности построения сложных кибернетических систем. Теория формальных нейронов (сетей) является развитой отраслью бионики, имеющей самостоятельное значение. Понятно, что первым этапом на пути построения такой теории явилось изучение одиночных элементов — нейронов (сначала биологических, затем формальных).

Все процессы управления и регулирования, происходящие в живом организме, связаны с функционированием взаимодействующих нейронов нервной системы. Именно в этом смысле нейрон является элементом сложно организованной динамической нервной системы. В зависимости от функционирования специальных механизмов нейрон получает через нервные окончания возбуждающие и тормозящие воздействия. Некоторые авторы [2] отмечают также наличие еще одного типа волокон, которые оканчиваются не на соме, а на возбуждающем пресинаптическом волокне, образуя аксо-аксомальные синапсы.

В активированном состоянии эти волокна предотвращают прохождение возбуждения по пресинаптическому волокну, на котором они оканчиваются.

Установлено, что в нейроне происходит как временное, так и пространственное суммирование синаптических сигналов. Под временным суммированием понимается следующее: поступающие на вход нейрона отдельные синаптические раздражители имеют подпороговую величину и каждый из них в отдельности не может возбудить нейрон. Если же эти подпороговые раздражители следуют один за другим через достаточно короткие промежутки времени, то происходит их временное суммирование, и нейрон возбуждается. Роль предыдущих раздражителей в суммарном эффекте возбуждения нейрона тем меньше, чем больше времени прошло после их появления. Это затухание следов действия предыдущих раздражителей происходит приблизительно по экспоненциальному закону.

Пространственное суммирование заключается в том, что подпороговые раздражители поступают на ту или иную пространственно разнесенную группу синапсов нейрона одновременно, и в зависимости от суммарного эффекта синаптических воздействий может произойти возбуждение нейрона. В том случае, когда в результате временного и пространственного суммирования подпороговых раздражителей суммарный сигнал превосходит пороговую величину, нейрон возбуждается и генерирует стандартный по форме нервный импульс, который распространяется вдоль аксона с конечной скоростью (без затухания). Это и соответствует возбуждению нервной клетки.

Наибольшая частота выходных импульсов в одиночном волокне не может превышать 100—1000 гц и зависит от типа нервной клетки.

Для данной нервной сети основные параметры одиночного нейронного импульса: амплитуда, длительность, крутизна фронтов — остаются постоянными, где бы этот импульс не действовал.

Единственной мерой степени возбуждения нейрона является количество импульсов возбуждения в серии и временные интервалы между ними. Можно предположить, что для передачи информации в нервной системе используется принцип частотно-импульсной модуляции.

Нейрон функционирует согласно закону «все или ничего», т. е. он может находиться в одном и только одном из двух состояний: а) возбужденное состояние; б) состояние покоя.

Таковы далеко не полные свойства биологического нейрона, являющегося элементарной частью всей нервной системы.

За последнее время в литературе появилось большое количество статей, посвященных различным вопросам моделирования нейронов. Основной задачей такого моделирования является экспериментальное исследование оригиналов — биологических нервных клеток, каждая из которых представляет собой элемент нервной системы (биологический аспект моделирования нейронов).

Одно из преимуществ модели состоит в том, что она допускает исследование объекта в критических условиях, разрушение его и последующее восстановление. В конечном итоге моделирование биологических нейронов позволяет глубже познать различные стороны функционирования как отдельного нейрона, так и нейронных сетей различной сложности. Кроме биологического, существует математический аспект моделирования. На основе его ученые пытаются создать устройство, законы функционирования которого воспроизводили бы основные функциональные соотношения биологического нейрона. Так, первая известная модель формального нейрона была предложена У. С. Мак Каллоком и У. Питсом в 1943 г. [3]. Основная идея их работы, заключается в том, что любые информационные явления в нервных сетях можно представить и анализировать средствами математической логики. Эти авторы ввели следующие допущения:

1. Нейрон представляет собой многополюсник, имеющий n входов и один выход.
2. Входы нейрона (синапсы) по своему воздействию делятся на возбуждающие и тормозящие.
3. Активность нейрона удовлетворяет принципу «все или ничего».
4. Сигналы могут проходить через нейрон только в одном направлении.
5. С течением времени структура сети, в частности порог, не изменяется.
6. Единственным имеющим значение запаздыванием в нервной системе является синаптическая задержка между возбуждением входа и возбуждением выхода нейрона.
7. Синаптическая задержка — величина постоянная.

Приведенные представления несколько упрощены по сравнению с нейрофизиологическими данными, однако, по мнению авторов [7], согласуются с этими данными.

На основе модели, известной в литературе как «линейный пороговый элемент» было разработано значительное количество алгоритмов анализа и синтеза как отдельных элементов, так и сетей на них.

Отметим один весьма примечательный факт: порог в модели Мак Каллока и Питтса 1943 г. принимается постоянным, следовательно предполагаются неизменными функции, вычисляемые нейроном. Такое допущение соответствует идеальной надежности нейрона, что далеко от истины как для живых систем, так и для технических элементов.

Поэтому Мак Каллок переходит от модели 1943 г. к модели нейрона 1958 г. [4], учитывающей новейшие достижения нейрофизиологии. Теоретической основой такого перехода были идеи Дж. Неймана. Исходя из своего принципиально нового подхода к роли ошибки в синтезе автоматов, Нейман [5, 6] пришел к необходимости постановки трех задач: 1) синтеза сетей, дающих один и тот же выход при одновременном сдвиге порогов у нейронов, так что каждый элемент начинает вычислять некоторую новую функцию от входа (логически стабильные сети); 2) синтез сетей, более надежных, чем составляющие их элементы (логи-

чески надежные сети); 3) синтез нейронов, обеспечивающих при вычислении более высокую гибкость, чем любые до того используемые в системах элементы.

В новой модели Мак Каллока введены следующие допущения: 1) имеется запрещающее волокно (запрещает возбуждающее или тормозящее волокно); 2) порог нейрона может изменяться в некоторых определенных пределах.

Таким образом, если в первой модели одним из допущений теории являлось отсутствие ошибок в функционировании элемента (стабильный порог), то во второй модели ошибка считалась уже органическим свойством нейрона. Понятно, что второе допущение существенно увеличивает адекватность реального нейрона и технической модели.

В настоящее время И. Б. Гутчиным, А. С. Кузичевым [8] предложена обобщенная модель формального нейрона, суть которой сводится к следующему: наличие запрещающего волокна типа «запрет запрета»; возможность как разъединения, так и объединения волокон нейронов.

Авторы предположили наличие у формального нейрона запрещающих волокон типа «запрет запрета» произвольной глубины. Такое предположение может быть использовано при синтезе формальных нейронов [9]. По математическим моделям был построен ряд электронных моделей. Наиболее известные из них модель С. Клини [10], Д. Т. Калбертсона [11], Дж. Неймана [12], В. И. Варшавского [13].

Подводя итоги, можно с уверенностью сказать, что теория формальных нейронов как математический аппарат создания высоконадежных кибернетических систем займет достойное место среди наук, занимающихся вопросами надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilmore Ken. Bionic Computers. Electronic World, v. 69, N 3, 1963.
2. E. M. Gray. J. Anat., v. 97, N 1, 1963.
3. У. С. Мак-Каллок, У. Питтс. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной деятельности. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
4. W. S. McCulloch. Agathe Tyche of nervous nets—the lucky reckoners. Mechanisation of Thought Process. Nat. Phys. Lab. Symposium, N 10, HMSO, London. 1959.
5. Дж. Нейман. Общая и логическая теория автоматов. В кн. А. Тьюринг. «Может ли машина мыслить?», Физматгиз, 1960.
6. Дж. Нейман. Вероятностная логика и синтез надежных автоматов из надежных компонент. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1959.
7. С. И. Брайнес, А. В. Напалков, В. Б. Свечинский. Нейрокибернетика, Медгиз, 1962.
8. И. Б. Гутчин, А. С. Кузичев. Бионика и надежность изд-во «Наука», 1967.
9. В. П. Белявский и др. Анализ поведения формального нейрона (статья в настоящем сборнике).
10. С. К. Клини. Представление событий в нервных сетях и клеточных автоматах. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит. 1956.
11. Д. Т. Калбертсон. Некоторые неэкономические работы. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
12. Дж. Нейман. Некоторые универсальные элементы на конечных автоматах. Сб. «Автоматы», Изд-во иностр. лит., 1956.
13. В. И. Варшавский. Некоторые вопросы теории логических сетей, построенных из пороговых элементов. Сб. «Вопросы теории математических машин», вып. 2, Физматгиз, 1962.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ФОРМАЛЬНОГО НЕЙРОНА

Ю. А. Василенко, В. П. Белявский, Н. Я. Какурин

Формальный нейрон в смысле [4] описывается следующим образом.

1. Нейрон имеет конечное число входов $a_1, a_2, \dots, a_n$, на которые подаются входные сигналы, и один выход.

2. Каждый из входов и выход могут находиться в одном из двух состояний: возбужденное (соответствует единице) или невозбужденное (соответствует нулю).

3. Типы волокон: а) возбуждающие — каждое возбуждающее волокно оканчивается на теле нейрона и в активированном состоянии вводит положительную единицу возбуждения (+1); б) тормозящие — каждое тормозящее волокно оканчивается на теле нейрона и вводит в активированном состоянии отрицательную единицу возбуждения (-1); в) запрещающие — каждое запрещающее волокно при возбуждении входа, которому оно принадлежит, предотвращает прохождение сигнала, на котором оно оканчивается.

4. Одной из основных характеристик нейрона является порог T , выражающийся целым числом. Изменение порога во времени задается конечным набором различных целых чисел

$$\{T_1, T_2, \dots, T_k\}, \quad (1)$$

расположенных (для определенности) в порядке убывания. В каждый данный момент времени t порог T принимает определенное значение T_j из набора $\{T_1, T_2, \dots, T_k\}$.

5. Если суммарное воздействие, подающееся от всех волокон, в момент времени t превышает пороговое значение T_j , то в момент времени $t + 1$ происходит возбуждение выхода нейрона.

Формальный нейрон задан, если известны все его волокна — их число, тип и распределение по входам.

В настоящей работе, в отличие от [4], разрешается так называемый «запрет запрета»: запрет запрещающего волокна.

Модель формального нейрона отличается также от модели обобщенного формального нейрона тем, что она не допускает объединения волокон [1].

Известно, что формальный нейрон может быть задан интегральным и аналитическим способами [1].

Интегральный способ однозначно определяет поведение нейрона при различных наборах входных переменных, без указания на конкретную структуру волокон нейрона. При этом способе задаются пороговые, порядковые, вероятностные и T диаграммы, приведенные в [1].

Прежде чем перейти к аналитическому способу задания формального нейрона (ф. н.), введем некоторые обозначения.

Возбуждающее волокно оканчивается на теле нейрона стрелкой ($\rightarrow$).

Тормозящее волокно оканчивается на теле нейрона точкой ($\cdot$).

Запрещающее волокно оканчивается петлей на том волокне, которое оно запрещает.

Пучок волокон, изображаемый в виде одного волокна с числом (весом), указывающим количество волокон в пучке, а также совокупность всех запрещающих волокон, оканчивающихся на данном пучке (с учетом волокон типа «запрет запрета»), называется ветвью.

Вес возбуждающих ($+W_i$) и тормозящих ($-W_i$) (ветвей записывается в виде числа без знака справа от ветви.

Определение 1. Аналитическим выражением Ω_n ф. н. будем называть сумму, каждое из слагаемых которой соответствует только одной из ветвей нейрона.

Правила построения аналитического выражения:

1. Для ветви входа a_i без запретов слагаемое имеет вид

$$W_i a_i. \quad (2)$$

2. Для ветви входа a_i с одним запретом от входа a_j слагаемое имеет вид

$$W_{i(j)} a_i (1 - a_j). \quad (3)$$

3. Для ветви входа a_i с двумя запретами от входов a_j и a_k , слагаемое имеет вид

$$W_{i(j, k)} a_i (1 - a_j) (1 - a_k). \quad (4)$$

4. Для ветви a_i с одним запретом от входа a_j , в свою очередь запрещаемого входом a_k , слагаемое имеет вид

$$W_{i(j(k))} (a_i (1 - a_j (1 - a_k))). \quad (5)$$

Пункт 4 легко распространяется на произвольное число входов.

Известно (3), что аналитическое выражение для запрещаемого волокна однозначно определяет некоторую булеву функцию, записанную в форме импликации.

Пусть дано выражение вида

$$\overline{f_i = x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow \dots \rightarrow x_{k-1} \rightarrow x_k}. \quad (6)$$

Здесь x_i — формула алгебры высказываний (в частном случае — булева переменная).

Определение 2. Глубиной запрета будем называть число стрелок импликации из выражения (6), обозначаемое H .

Очевидно, что для нейронов, не имеющих запрещающих волокон, $H = 0$.

Формальный нейрон в смысле Мак Каллока [4] имеет $H = 1$.

Следовательно, аналитическое выражение [5] с учетом понятия «глубины запрета» по индукции обобщается на произвольное число волокон типа «запрет запрета».

$$\text{Пример. } \Omega_3 = a_1 (1 - a_3 (1 - a_2)) - 2a_2 - 2a_3 (1 - a_2). \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое соответствует булевой функции

$$\overline{a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2}. \quad (8)$$

Третье слагаемое соответствует булевой функции

$$\overline{a_3 \rightarrow a_2} \quad (9)$$

Структура формального нейрона, рассмотренного в примере, показана на рисунке. Здесь ψ — выходная булева функция ПЭ.

Постановка задачи анализа ф. н. Формальный нейрон задается аналитическим выражением и интервалом изменения порога.

Требуется определить (при фиксированном значении порога T) булеву функцию, реализуемую ф. н.

Введем понятие об обобщенных переменных.

Определение 3. Обобщенной переменной ф. н. называется булева переменная z_i , определяемая соотношением (с учетом 6):

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если } f_i = 1, \\ 0, & \text{если } f_i = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Элемент, на входы которого подаются обобщенные переменные $z_1, z_2, \dots, z_m (m \geq 1)$, является пороговым элементом (ПЭ), закон функционирования которого определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m W_j z_j > T, & \psi(z_1, z_2, \dots, z_m) = 1, \\ \sum_{j=1}^m W_j z_j \leq T, & \psi(z_1, z_2, \dots, z_m) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь W_j — вес j -й переменной z , равный весу соответствующего волокна нейрона, которое подано на тело нейрона; $\psi(z_1, z_2, \dots, z_m)$ — выходная функция ПЭ, равная выходу ф. н.

Алгоритм анализа ПЭ приведен в работе [2]. Алгоритм анализа ф. н. сводится к следующему:

1. Введение обобщенных переменных и получение ПЭ, изоморфных исходному ф. н.
 2. Применение алгоритма анализа ПЭ [2]. Нахождение булева выражения функции, реализуемой ПЭ.
 3. Получение импликативных выражений для соответствующих ветвей ф. н. [3] и подстановка их в выражение для ПЭ.
 4. Раскрытие импликативного выражения по законам булевой алгебры, приведение подобных членов.
 5. Процесс повторяется для всего интервала изменения порогов.
- Пример.**

$$\Omega_5 = 2a_1(1 - a_3(1 - a_2)) + a_3(1 - a_1) + 3a_4; \quad T = 3.$$

Преобразование ф. н. в соответствующий ПЭ:

$$[2, 1, 3/3] \sim [W_1, W_2, W_3/T],$$

$$\begin{cases} z_1 = f_1 = \overline{a_1 \rightarrow a_3} \rightarrow a_2, \\ z_2 = f_2 = \overline{a_3 \rightarrow a_1}, \\ z_3 = f_3 = a_4. \end{cases}$$

Булева функция, соответствующая ПЭ, имеет вид

$$\psi = z_1 z_3 \vee z_2 z_3.$$

Подстановка выражения (12) в (13) дает

$$\psi = \overline{a_1 \rightarrow a_3} \rightarrow a_2 a_4 \vee \overline{a_3 \rightarrow a_1} a_4 = a_1 \overline{a_3} a_4 \vee \overline{a_1} a_2 a_4 \vee \overline{a_1} a_2 a_4.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Б. Гутчин, А. С. Кузичев. Бионика и надежность, изд-во «Наука», М., 1967.
 2. В. В. Литвинов. Анализ порогового элемента. Сб. «Вопросы теории математических машин» № 1, изд. КДНТП, К., 1966.
 3. В. Л. Бедрявский, Ю. А. Василенко и др. Об одном способе выражения запрещающего волокна формального нейрона. Сб. «Проблемы бионики», № 1, 1968.
 4. W. S. McCulloch. *Agathe Tyche of nervous nets — the luskly reckoners*. Mechanization of Thought Processes. Nat. Phys. Lab. Symposium. N 10. HMSO, London, 1959.
 5. В. П. Бедрявский, Ю. А. Василенко и др. Об одном методе реализации пороговых функций. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1, Изд-во ХГУ, 1968.
-

О ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЧЕЛОВЕКА

А. Г. Мурашко

1. В работах Ю. П. Шабанова-Кушнаренко предложена математическая модель обработки информации в глазу человека.

Ниже приводится перечень алгоритмов преобразования (1) — (10).

$$\text{Блок 1. } U_i = \int_0^\infty B_i A_i(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

$$\text{Блок 2. } a_i \frac{\partial P_i}{\partial t} - b_i^2 \left(\frac{\partial^2 P_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_i}{\partial y^2} \right) + P_i = k_i U_i. \quad (2)$$

$$\text{Блок 3. } V_i = c_i \lg d_i P_i. \quad (3)$$

$$\text{Блок 4. } Q_i = \frac{1}{I_i} (V_i - N_i). \quad (4)$$

$$\text{Блок 5. } q_i \frac{\partial N_i}{\partial t} - h_i^2 \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \right) + N_i = (1 - f_i) Q_i. \quad (5)$$

$$\text{Блок 6. } R_i = \frac{1}{r_i} (Q_i - T_i). \quad (6)$$

$$\text{Блок 7. } m_i \frac{\partial T_i}{\partial t} - n_i^2 \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) + T_i = (1 - r_i) R_i. \quad (7)$$

$$\text{Блок 8. } W_i = R_i - R_1. \quad (8)$$

$$\text{Блок 9. } S_2 = \sqrt{W_2^2 + W_3^2}. \quad (9)$$

$$\text{Блок 10. } S_3 = \arctg \frac{W_2}{W_3}. \quad (10)$$

Здесь рассмотрена возможность технической реализации всей модели в целом — построение искусственной системы, которая должна облегчить проведение дальнейших исследований с целью выяснения алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека.

При построении математической модели переработки информации в зрительной системе человека последняя рассматривалась как кибернетическое устройство, которое обрабатывает информацию, поступающую со световыми лучами в глаз, и передает ее в мозг. Поэтому рассматривается исключительно информационная сторона работы органа зрения, т. е. по каким законам и алгоритмам входная зрительная информация преобразуется в выходную.

На основе психофизических данных о зрении человека предлагается математическая модель работы органа зрения. Входным сигналом служит зрительная картина $B(x, y, t)$, выходным сигналом — векторная функция $S(x, y, t)$, компонентами которой являются светлота $S_1(x, y, t)$ насыщенность $S_2(x, y, t)$ и цветовой тон $S_3(x, y, t)$ зрительного ощущения. Как видно из схемы (рис. 1), модель работы органа зрения со-

держит ряд соединенных между собой блоков. Каждый из них описывается одним из уравнений (1) — (10).

Вопросы технической реализации будут обсуждаться для одного канала общей структурной схемы модели от блока 1₁ до блока 7₁, затем следует реализация функций, выполняемых блоками 8₂, 9 и 10.

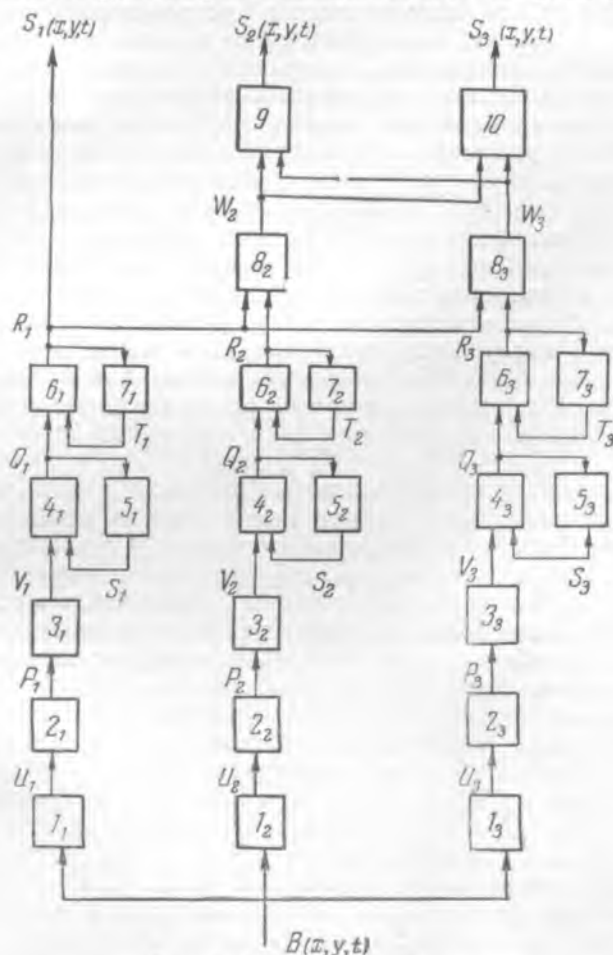


Рис. 1. Функциональная схема.

Следует сразу заметить, что при исследовании подобных вопросов имеется тенденция к моделированию тех или иных математических зависимостей на электронных цифровых машинах, в результате чего тщательно анализируется моделируемое явление, определяются пределы возможного, намечаются пути дальнейших исследований и, как правило, если задача требует построения специализированного устройства, определяется структура схемной реализации и аппаратная сложность, по сравнению с той ЦВМ, на которой проводился данный эксперимент. В дальнейшем эта структура может быть минимизирована, в значительной степени упрощена, и специализированное устройство, являющееся аналогом некоторой объективной системы, будет с успехом использоваться для тех или иных целей.

Проанализируем зависимости (1) — (10), учитывая, что все вычисления должны быть произведены для всего поля зрения за время, имею-

щее один порядок со временем, которое затрачивает орган зрения на обследование поля зрения. В результате анализа станет ясно, что применять метод моделирования на электронных цифровых машинах пока нецелесообразно. Самые мягкие оценки заставляют прийти к выводу, что для выполнения этой задачи понадобится цифровая машина, обладающая оперативным запоминающим устройством, имеющим около миллиона ячеек памяти, а скорость счета должна составлять около десяти миллиардов элементарных операций в секунду. Известное противоречие между емкостью и быстродействием запоминающих устройств современных вычислительных машин заставляет пока отказаться от услуг ЭЦВМ при решении поставленной задачи в общем виде. Частные задачи, связанные с тем или иным свойством зрения, при ограничении класса входных сигналов, можно решать, по-видимому, используя цифровую машину, однако решение частных задач не дает возможности исследовать все свойства зрения в их взаимосвязи. Основной целью реализации модели является построение аналога, который должен помочь разобраться в более сложных вопросах зрительного восприятия и уточнить алгоритмы переработки информации, а также поставить ряд новых задач исследования. По своей сути реализация не является конечной целью исследования, и поэтому решение частных задач в этом аспекте мало интересно и может быть произведено более простым способом.

Современные аналоговые машины (сеточные модели, модели структурного типа) имеют неоспоримое преимущество перед цифровыми в быстродействии, однако приходится заботиться и о повышении точности таких машин, что, в свою очередь, связано с повышением их стоимости. Несмотря на то, что точность решения на аналоговых машинах относительно невысока, они более пригодны для решения поставленных задач, чем цифровые, особенно, если речь идет о моделировании в реальном масштабе времени. Наиболее перспективной на данном этапе исследования нам представляется техническая модель использующая принципы работы цифровых моделей или цифровых дифференциальных анализаторов, несколько уступающих в быстродействии аналоговым машинам, но превосходящих их в точности. Такая модель может вести вычисления со скоростью, раз в сто превышающей скорость работы электронных цифровых вычислительных машин.

2. Анализ возможностей технической реализации системы алгоритмов (1) — (10) начнем с рассмотрения некоторой общей функциональной схемы, представленной на рис. 1. Схема содержит десять блоков. Блок 1 является датчиком входных сигналов и преобразует входную информацию о параметрах зрительной картины в пропорциональный ей сигнал согласно уравнению (1). Этим сигналом может быть либо постоянное или переменное напряжение, либо число-импульсный код, т. е. сигнал U_1 может быть по необходимости либо дискретным, либо непрерывным. Блок 2, осуществляющий преобразование U_1 в P_1 согласно (2), является основным, наиболее важным и трудно реализуемым. Предположим, что блок 2 как-то реализован и на его выходе имеется сигнал P_1 . Реализацию блока 2 рассмотрим немного позже. В качестве блока 3, осуществляющего преобразование P_1 в V_1 , согласно (3), может быть функциональный логарифмический преобразователь, выполненный на диодах, триодах и других элементах. Реализация его не вызывает принципиальных и технических трудностей. Блоки 4, 6, 8 представляют собой обычные суммирующие схемы (сумматоры-вычитатели) на два входа. В качестве таких схем для различных способов представления величины могут быть использованы операционные суммирующие усили-

тели, сумматоры последовательного или параллельного действия на дискретных элементах и т. д. Реализация блоков 4, 6, 8 не вызывает трудностей. Реализовать блоки 5 и 7 при условии, что реализован блок 2, нетрудно, однако это вовсе не обязательное условие. Коэффициенты g и m , имеющие размерность времени (сек), и коэффициенты h и n , имеющие размерность угловых единиц (угловая минута), количественно на один — два порядка отличаются от соответствующих коэффициентов a и b , входящих в уравнение (2). Поэтому уравнения (5) и (7) с помощью быстродействующих машин могут быть решены в реальном масштабе времени.

Техническая реализация блоков 9 и 10 не связана с трудностями, поскольку в качестве блока 9, осуществляющего извлечение квадратного корня из суммы квадратов двух величин, может быть применена схема, известная из техники непрерывных машин, а также схема, построенная на базе дискретных элементов, либо схема на фотоумножителях и др. Зависимость (10) также легко воспроизвести при любом способе представления входных величин. В качестве блока 10 можно использовать функциональный преобразователь, настроенный на воспроизведение $\arctg x$ либо схему, построенную на цифровых интеграторах, и т. д.

Таким образом, очевидно, что блоки 1,3—10 могут быть реализованы с той или иной степенью сложности, причем их реализация не вызывает принципиальных трудностей. Такую реализацию можно осуществить как на аналоговом так и на дискретном уровне. Выбор той или иной системы зависит от требуемой точности решения, необходимого быстродействия, от класса задач, которые должна решать техническая схема, реализующая алгоритмы. Итак, все дело в рациональной реализации блока 2, осуществляющего преобразование согласно алгоритму (2).

3. Рассмотрим возможные способы реализации уравнения (2) и попытаемся оценить современные возможности такой реализации. Поставим задачу следующим образом. Пусть имеется зрительная картина $U(x, y, t)$, заданная большим числом точек, например 500 000 элементов разложения, как в телевизионных системах. Телевизионное изображение, вообще говоря, можно представить в следующем виде: в данный фиксированный момент времени на экране трубки имеется некоторое изображение A . За время τ , которое электронный луч тратит на развертку изображения до последнего элемента разложения, параметры изображения неизменны, т. е. оно стационарно до возвращения луча в исходную точку. После этого луч снова обойдет весь экран сверху до низу и затратит на это то же время τ . Все изменения параметров изображения A , происшедшие за время τ , будут отличать вновь появившееся изображение A_1 от A . Далее процесс повторяется. Таким образом, в отдельные фиксированные моменты времени на экране появляются стационарные картинки, которые, как бы накладываясь друг на друга, создают у зрителя эффект непрерывного слитного изображения во времени и в пространстве. При этом существенную роль играют два свойства зрения — инерция и иррадиация.

Представим себе, что именно таким образом на первый блок структурной схемы (рис. 2) подаются с экрана трубки входные сигналы B_k . Первый блок преобразует их в сигналы U_1 , которые могут быть непрерывными или дискретными. Выясним, какими параметрами должен обладать блок 2, выполняющий, например, функцию вводного устройства электронной цифровой машины 3. Устройство 2 согласно условию должно осуществлять преобразование информации по алгоритмам (2) —

(10), поэтому на его выходе появляется величина S , характеризующаяся тремя компонентами S_1 , S_2 и S_3 . Очевидно, непосредственное считывание информации с экрана трубки в том темпе времени, как это делает зрительная система человека, или в темпе времени развертки изображения неприемлемо даже для записи ее в ячейки памяти машины, не говоря уже о дальнейших преобразованиях информации в том же темпе времени. Иными словами, цифровая машина, получив информацию о картине, должна составить о ней «суждение», как это делает человек после того как ему показали картину.

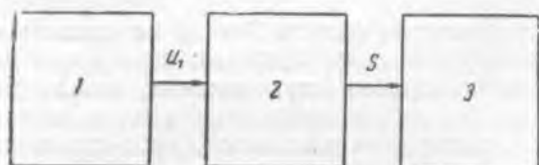


Рис. 2. Связь ЭЦВМ с устройством ввода.

При определенных условиях наблюдения время, необходимое человеку для того, чтобы начать рассказ о картине, характеризуется, вообще говоря, временем инерции зрительной системы. Последнее определяется некоторой постоянной инерции a , зависящей от условий наблюдения и лежащей в пределах сотых долей секунды. Для упрощения рассуждений величину a можно принять равной 0,1 сек и, исходя из нее, проанализировать возможные параметры блока 2. Примем для удобства время t , за которое луч обегает все поле зрения (т. е. разворачивает изображение), равным 0,1 сек (на самом деле 0,04 сек). Таким образом, на выходе блока 2 через время, равное 0,1 сек, должна появиться информация о зрительной картине, фиксированной на экране трубки на время t . Если принять число элементов разложения равным 500 000 и учесть, что в результате одноразового решения алгоритмов (2) — (10) извлекается информация для одной точки зрительного ощущения, то получится, что блок 2 за время, равное 0,1 сек, должен произвести вычисления для 500 000 точек зрительной картины, т. е. дать 500 000 решений за 0,1 сек. Между тем, каждое решение осуществляется путем выполнения нескольких элементарных операций, если иметь в виду дискретную машину. Отсюда можно заключить, что такие условия преобразования информации на дискретном уровне при существующем быстродействии (в лучшем случае 1 млн. операций за секунду) крайне неблагоприятны. Ни одна из существующих технических систем (ЭЦВМ) не способна обработать информацию о зрительной картине в реальном масштабе времени. С этой задачей справляется только зрительная система.

Основным препятствием, однако, является реализация алгоритма (2). Попытка реализовать его на ЭЦВМ пока еще не удавалась, причем, как видно из приведенных выше рассуждений, объяснялось это лишь неудовлетворительным быстродействием современных дискретных машин. С числом ячеек памяти здесь примерно то же, что и с быстродействием. И все дело в том, что вычисленное значение функции $S_1(x, y, t)$ для одной точки зрительного образа необходимо хранить определенное время в памяти, так как значение функции $S_2(x, y, t)$, вычисленное для другой точки зрительного образа, существенно зависит от предыстории.

4. Рассмотрим возможность реализации алгоритма (2) на аналоговом уровне. Для этого преобразуем алгоритм (2) к виду, удобному для моделирования на аналоговых машинах.

Перепишем уравнение (2) в виде:

$$a_i \frac{\partial P_i}{\partial t} = k_i U_i - P_i + b_i^2 \left(\frac{\partial^2 P_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_i}{\partial y^2} \right). \quad (11)$$

Правая часть равенства (11) может быть аппроксимирована разностным методом на электрической сетке.

Уравнение (11) примет следующий вид:

$$P_i = \frac{1}{a_i h^2} \int (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - 5P_i + k_i U_i) dt. \quad (12)$$

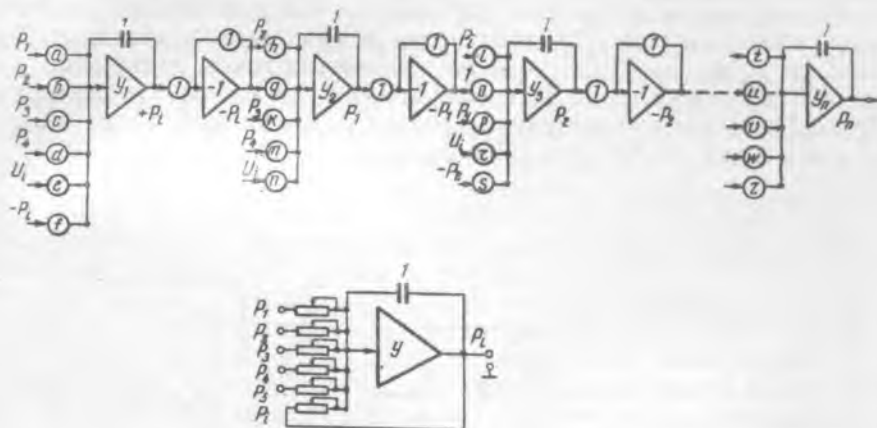


Рис. 3. Аналоговая модель и элемент аналоговой модели.

Равенство (12) можно реализовать при помощи показанной на рис. 3 схемы. Однако на рисунке 3 показана лишь одна секция вычислительного устройства аналогового типа, дающая решение для одной узловой точки электрической сетки. Количество узловых точек, а значит и точек, взятых на объективной зрительной картине, будет определять сложность вычислительного устройства, реализующего алгоритм (12). При большом количестве точек схема настолько усложняется, что применение ее становится нецелесообразным по многим причинам. Во-первых, велика аппаратурная сложность, во-вторых, постоянную времени каждого из интеграторов трудно согласовать с пределами изменения постоянных инерции зрения и т. д.

Алгоритм (11) можно реализовать при помощи схемы, представленной на рис. 4. Правая часть равенства (11) реализована сеткой активных сопротивлений. Устройство 2 представляет собой быстродействующий коммутатор, работающий по определенной программе и обходящий узловые точки в заданной последовательности и в заданном темпе времени. Выходные величины блока 2 интегрируются по времени на обычном операционном интегрирующем усилителе постоянного тока, на выходе которого для данного момента времени появляется сигнал, пропорциональный значению P_i для одной точки зрительной картины. Поскольку для вычисления P_i для другой точки зрительного образа необходимо знать значение P_i , то при такой схеме реализации необходима память большей емкости. Так же трудно обеспечить достаточное быстродействие коммутатора, вследствие чего приходится отказаться от такой схемы реализации.

5. К технической реализации алгоритмов (2) — (10) можно подойти с другой стороны. Если алгоритм (2) заменить интегральной формой модели, имеющей вид:

$$P_i(x, y, t) = \frac{k}{4\pi b^2} \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{\frac{t-\tau}{a}}}{t-\tau} e^{-\frac{(3-x)^2 + (\eta-y)^2}{4b^2 \frac{t-\tau}{a}}} \cdot U_i(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta, \quad (13)$$

то представляется возможным реализовать (13) схемой, построенной на базе цифровых интеграторов и выполняющей последовательное интегрирование по ξ , потом по η и, наконец, по τ . Однако и при таком способе представления алгоритма (2) вопросы быстродействия системы, реализующей алгоритм (13), тоже имеют первостепенное значение. Действительно, при сохранении того же количества точек зрительной картины (500 000) необходимо за время $\Delta t = 0,1$ сек выполнить интегрирование по ξ и η для одного сечения куба в то время, когда современные ЦДА выполняют 100 000 решений в секунду.

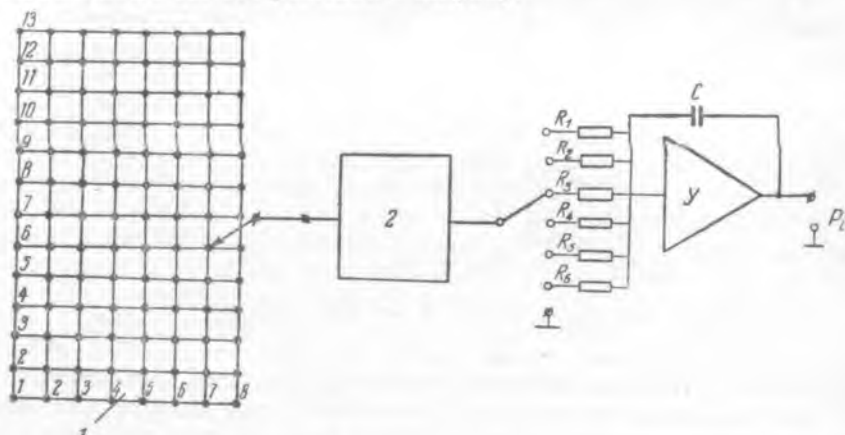


Рис. 4. Модель аналог-сетка.

Таким образом, из сказанного можно заключить, что в настоящее время нельзя рассчитывать на получение технической системы, способной осуществлять преобразование информации в реальном масштабе времени и приближающейся в чисто информационном смысле по своим количественным показателям к зрительной системе человека. Попытка реализации алгоритмов непосредственно техническими информационными системами не приводит к удовлетворительным результатам лишь потому, что быстродействие и емкость памяти технических систем пока еще малы, а увеличение быстродействия на три-четыре порядка, по сравнению с имеющимся сегодня, будет решающим фактором, обеспечивающим удовлетворительный исход реализации. Трудности чисто технического характера в данном случае закономерны. Ведь зрительная система осуществляет преобразование информации с помощью примерно 130 миллионов фоторецепторов, которых всего в 100 раз меньше, чем нейронов в коре головного мозга (15 млрд.), и между тем известно, что реализация каждого нейрона связана с определенными техническими трудностями.

Задача, которая обсуждалась выше, может быть в значительной степени упрощена. Как уже говорилось, техническая реализация частных задач, выполняемых зрительной системой, не вызывает особых

трудностей. Например, при реализации отдельных свойств зрения инерции, адаптации, иррадиации и др. — использовались малые нелинейные модели (МН-7), сеточные модели (МСМ-1) и цифровые машины (Минск-14). При этом эксперименты показали, что реакции математической модели того или иного свойства зрения на определенные типы входных сигналов близки к теоретическим и хорошо согласуются с данными психофизических экспериментов, проделанных рядом авторов.

Предложенную задачу технической реализации можно решить, используя современные средства вычислительной техники, если сузить класс входных сигналов в количественном отношении. Современные цифровые дифференциальные анализаторы (ЦДА) позволяют выполнять до 100 000 решений в секунду, поэтому, представив зрительную картину 10 000 точек (100×100), можно с использованием ЦДА построить систему, удовлетворяющую временным и пространственным характеристикам зрительной системы. В этом случае алгоритмы (5) и (7) упрощаются настолько, что по соответствующей временной программе они могут быть реализованы с помощью одного и того же блока, реализующего алгоритм (2). Техническая реализация алгоритмов является продолжением исследования свойств зрения, поэтому построение такой технической системы, способной оказать помощь в постановке ряда экспериментов, представляет собой важную задачу.

В лаборатории бионики ХИРЭ создается техническая модель, структурная схема которой представлена на рис. 5. Схема содержит 10 блоков. Блок 1 представляет собой телевизионную передающую трубку (видикон, суперортикон и др.), с которой происходит считывание информации. С сопротивления R снимается напряжение, пропорциональное яркости точки зрительной картины. Это напряжение преобразуется затем в блоке 2 в число-импульсный код. Преобразователь типа аналог-код построен по принципу импульсного взвешивания и имеет быстродействие порядка 200 000 преобразований в секунду.

Блок развертки 3 и блок управления разверткой 5 осуществляют развертку изображения с заданной частотой. Пусковые импульсы они получают от общего управляющего устройства 7. В блоке 4 хранятся программы вычислений и константы, которые автоматически вводятся в соответствующие интеграторы по командам от логического блока и блока изменения программы 6. Предусмотрены пульт управления 9 и устройство вывода 8. Последнее является промежуточным между ЭЦВМ и моделью. С него происходит по командам от УУ считывание трех чисел S_1 , S_2 , S_3 , пропорциональных светлоте, цветовому тону и насыщенности для каждой из 10 000 точек зрительной картины. Эта информация вводится по желанию в нужные ячейки памяти ЭЦВМ. Блоки 1 — 9 на схеме не развернуты, так как они не оригинальны и построены по апробированным схемам, известным из техники дискретного счета.

Блок 10 является основным блоком модели и называется решающим. Этот блок состоит из 13 цифровых, четырех суммирующих и трех следящих интеграторов. Имеется также пять схем совпадения на два входа для переключения цепей. Всеми операциями решающего блока управляет устройство управления 7 совместно с логическим блоком и блоком изменения программы 6. Интеграторы a , b , v осуществляют преобразование информации согласно алгоритму (13), т. е. согласно интегральной форме модели. Они выполняют преобразование информации и по алгоритмам (5) и (7), записанным также в виде тройного интеграла. Для переключения цепей и ввода заданных констант служат вентили B_1 — B_5 и блок 4. Следящий интегратор g и интегратор d реализуют алгоритм (3), т. е. логарифмическую функцию. Интеграторы e ,

ж, з — реализуют алгоритмы (4), (6), (8) и являются суммирующими. Интеграторы *и, м, к* реализуют подкоренное выражение алгоритма (9), а следящий интегратор *л* совместно с интегратором *н* выполняет операцию извлечения квадратного корня.

Интеграторы *о, п, р* выполняют операцию деления, а интеграторы *с, т, у, ф* реализуют функцию $\arctg$.

Модель имеет три выхода и построена для одного канала структурной схемы преобразования информации в зрительной системе. Чтобы воспроизвести три канала, необходимо дополнить схему 16 цифровыми интеграторами по два в каждом канале, *а, б, в, г, д, е, ж, з*. Полная схема будет содержать 36 цифровых интеграторов. Однако есть возможность уменьшить число интеграторов в схеме примерно вдвое за счет усложнения блока управления, логического блока и блока изменения программы.

Представленная структурная схема довольно сложна, хотя техническое воплощение ее вполне реально. Наличие 20 интеграторов, каждый из которых является довольно сложным устройством и содержит примерно 150 полупроводниковых триодов и 200—300 диодов (в зависимости от разрядности регистров и количества вспомогательного оборудования), позволяет говорить о модели как о некоторой специализированной вычислительной системе с достаточно сложной логикой работы. Поэтому в дальнейшем предполагается исследовать возможность минимизации устройства и создания оптимальных с точки зрения построения алгоритмов работы данной модели.

Вместе с тем представляет интерес реализация алгоритмов (1) — (10) так называемым комбинированным способом. Такая реализация заключается в следующем. Необходимо найти или создать техническую систему, которая сама по себе обладала бы двумя свойствами — инерцией и иррадиацией. Как было показано, эти свойства затрудняют техническую реализацию алгоритмов при использовании средств вычислительной техники.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТАНТНОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОБЪЕКТА

Я. Я. Белик

Для адекватной ориентации в ближнем пространстве у человека прижизненно складывается функциональная система константности восприятия величины объектов, которая указывает на то, что наблюдаемые объекты находятся в пределах определенной зоны [1].

Функциональная система константности восприятия величины объектов обусловлена тем, что восприятие величины объектов определяется не только величиной сетчаточного образа, но и механизмами аккомодации и конвергенции, которые вносят коррекцию в восприятие величины объектов*.

Поскольку константность восприятия определяется механизмами конвергенции и аккомодации, то ее моделирование сводится к моделированию каждого из указанных механизмов в отдельности.

Для аккомодации находится соответствие между удаленностью оператора от фиксируемого объекта и кривизнами преломляющих поверхностей глаза.

Для конвергенции устанавливается зависимость между удаленностью и углом конвергенции, а для сетчаточного образа — соответствие между его величиной и кривизнами преломляющих поверхностей (неявная зависимость величины сетчаточного образа от удаленности).

Как известно, константность восприятия величины объекта обусловлена сигналами от конвергирующих, аккомодационных мышц и от раздражаемой области сетчатки, которые зависят соответственно от угла конвергенции, кривизны преломляющих поверхностей, а величина раздражаемой области — от удаленности и величины объекта. Поэтому, рассмотрев зависимость кривизны преломляющих поверхностей, угла конвергенции и сетчатого образа от удаленности, исследуем первое звено функциональной системы константности восприятия.

Рассмотрим оптическую модель аккомодации. Аккомодация обычно действует на расстоянии до 5—6 м и характеризует свойства отдельных преломляющих поверхностей глаза в зависимости от удаленности объекта от глаза.

К преломляющим поверхностям глаза относятся роговица, передние и задние поверхности хрусталика и ядра хрусталика. Учитывая, что глаз с оптической точки зрения представляет собой толстую линзу, необходимо найти оптический эквивалент глаза в виде такой линзы. Замена всех преломляющих поверхностей глаза этой линзой может быть произведена на основе законов геометрической оптики [2].

Для конкретного расчета необходимо знать коэффициенты преломления глазных сред. Для роговицы они равны 1,376, для передней каме-

* Следует отметить, что механизмы аккомодации и конвергенции представляют собой прижизненно формирующиеся функциональные системы и являются неосознаваемыми.

ры — 1,336, для хрусталика — 1,386, для ядра хрусталика — 1,406, для стекловидного тела — 1,336 [3].

В результате проведенных нами расчетов все элементы f , f' , $S(H)$ и $S'(H')$, характеризующие толстую линзу, были найдены аналитически; f и f' представляют собой переднее и заднее фокусное расстояние линзы — эквивалента глаза, а $S(H)$ и $S'(H')$ определяют положение передней и задней главных плоскостей линзы.

Аналитическая связь между этими элементами и кривизнами преломляющих поверхностей выражается следующими зависимостями:

$$f = - \frac{23r_1r_2r_1^2r_2^2}{1,265r_1^2r_2^2(r_2 - r_1) + 0,51r_1r_2(r_2^2 - r_1^2) + r_1r_2r_1^2r_2^2}; \quad (1)$$

$$f' = \frac{31,8r_1r_2r_1^2r_2^2}{1,265r_1^2r_2^2(r_2 - r_1) + 0,51r_1r_2(r_2^2 - r_1^2) + r_1r_2r_1^2r_2^2}; \quad (2)$$

$$S(H) \approx 23; \quad (3)$$

$$S'(H') = - \frac{1025r_1r_2r_1^2r_2^2}{38,4r_1^2r_2^2(r_2 - r_1) + 15,4r_1r_2(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (4)$$

Здесь r_1 и r_2 — радиусы кривизны передней и задней поверхностей хрусталика, r_1^2 и r_2^2 — радиусы кривизны передней и задней поверхности ядра хрусталика.

Формулы (1) — (4) определяют переменную толстую линзу — глаз. Переменность ее заключается в изменении кривизны передней и задней поверхностей, которое определяется изменением удаленности от фиксируемого объекта.

Если перейти от линзы-эквивалента к реальному глазу, то переменными кривизнами будут кривизны передних и задних поверхностей хрусталика и ядра хрусталика, что отражено в выражениях (1) — (4). Поскольку численные значения радиусов кривизны преломляющих поверхностей и соответствующие им f , f' , $S(H)$ и $S'(H')$ известны лишь для крайних случаев фиксирования предельно близких и далеких ориентиров [3], правильность зависимостей (1) — (4) можно подтвердить, если из них будут получены указанные выше частные значения. Эти значения действительно были получены нами из (1) — (4) и имеют хорошее совпадение с данными Гульстранда [3].

Для наглядности на рис. 1 приведена картина расположения фокусов и главных плоскостей для отдельных преломляющих поверхностей и их комбинаций в случае фиксирования далеких объектов (расслабленный глаз). Здесь H , H' — означают передние и задние главные плоскости; f и f' — передние и задние фокусы; индексы 1_x и 2_x — передняя и задняя поверхности хрусталика; p — роговица; y — ядро; x_1 — я — оптическая система «передняя поверхность хрусталика, ядро»; x_1 — y , x_2 — оптическая система «передняя, задняя поверхности хрусталика, ядро»; p ; x_1 — y ; x_2 — оптическая система «роговица, передняя и задняя поверхности хрусталика, ядро».

Поскольку в конечном счете самую толстую линзу — глаз определяет удаленность до фиксируемого объекта, то очень важна зависимость кривизны преломляющих поверхностей от удаленности, т. е. оптическая модель аккомодации.

Проведенный нами расчет дает следующую зависимость:

$$h = \frac{r_1 r_2 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}} [5,1 r_1 r_2 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}} + 2,6 r_1 r_2 (r_2^{\text{н}} - r_1^{\text{н}}) + 6,45 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}} (r_2 - r_1)]}{[1,265 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}} (r_2 - r_1) + 0,51 r_1 r_2 (r_2^{\text{н}} - r_1^{\text{н}}) + r_1 r_2 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}}]} \times \quad (5)$$

$$\times \frac{10}{[2,8 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}} (r_2 - r_1) + 1,13 r_1 r_2 (r_2^{\text{н}} - r_1^{\text{н}}) - 0,97 r_1 r_2 r_1^{\text{н}} r_2^{\text{н}}]},$$

где h — удаленность от фиксируемого объекта;

$r_1, r_2, r_1^{\text{н}}, r_2^{\text{н}}$ — имеют тот же смысл, что и раньше.

Модель (5) дает возможность определить зону отчетливого видения — область, где объект при соответствующей настройке глаза виден отчетливо. С учетом экспериментальных данных для преломляющих поверхностей глаза в случае фиксирования предельно близких и далеких значений из формулы (5) получаем соответственно $h_{\text{min}} \approx 8$ см, $h_{\text{max}} = \infty$. Оба указанные значения подтверждаются опытными литературными данными. При рассмотрении области действия аккомодации предполагается, что это область, где наблюдается эффективное изменение кривизны преломляющих поверхностей хрусталика. С учетом того, что эту область определяют до 6 м, можно сказать, что изменение кривизны поверхностей при фиксировании объектов в области от 6 м до ∞ либо настолько мало, что не дифференцируется, либо его вообще не происходит.

Поскольку толстая линза — эквивалент глаза определяется зависимостями (1)–(4), то, основываясь на них, можно рассчитать величину изображения на сетчатке:

$$e' = e \left(\frac{0,84}{r_1} + \frac{0,335}{r_1^{\text{н}}} - \frac{0,335}{r_2^{\text{н}}} - d \right), \quad (6)$$

где d — равно 0,17 для близлежащих к глазу объектов и 0,18 для далеких (свыше нескольких метров) объектов;

e' — величина изображения объекта на сетчатке;

e — величина объекта;

$r_1, r_1^{\text{н}}, r_2^{\text{н}}$ — имеют тот же смысл, что и в выражениях (1)–(4). Все величины даны в миллиметрах.

В качестве примера можно показать, что объект длиной в 2 см, удаленный на минимальное расстояние от глаза, при котором он еще резко (≈ 8 см), по формуле (6) дает изображение на сетчатке, равное 4,6 мм.

Рассмотрим теперь взаимосвязь между удаленностью и углом конвергенции. Для случая фиксирования объекта, лежащего на перпендикуляре к отрезку прямой, соединяющему центры глаз и проведенном через его середину (симметричная конвергенция), а также для боковой асимметричной конвергенции зависимость угла конвергенции от удаленности была получена Саутхоллом [4].

Нами получена формула (7), описывающая угол конвергенции для любой точки пространства, и из нее как частные получаются обе формулы Саутхолла:

$$h = \frac{b \cos(\alpha + \beta) \cos \beta}{\sin \alpha}, \quad (7)$$

где h — удаленность до фиксируемого объекта; α — угол конвергенции; β — угол между одной из зрительных осей и перпендикуляром к межглазной оси, проведенным через фиксируемую точку (в случае боковой конвергенции зрительная ось — ближняя к перпендикуляру); b — база глаз.

Знак минус относится к случаю фиксирования ориентира, который находится внутри пространства, ограниченного двумя плоскостями, перпендикулярными межглазной оси и проведенными через зрачки глаз, знак плюс относится к случаю расположения ориентира вне указанного пространства.

Строгая формула (8) во многих случаях может быть заменена на приближенную:

$$h \approx \frac{b}{a}. \quad (7, a)$$

Если же величина β достаточно большая (для боковой конвергенции), то

$$h \approx \frac{b \cos^2 \beta}{a}. \quad (7, б)$$

Итак, рассмотрены модели всех трех механизмов, определяющих константность восприятия; оптические модели аккомодации, конвергенции и величины сетчатого изображения. Эти модели являются основой для дальнейшего изучения константности восприятия величины объекта, так как они дают возможность найти прямую связь между натяжением аккомодирующих и конвергирующих мышц и удаленностью от глаз наблюдаемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Леонтьев. Проблемы психики, изд-во «Мысль», М., 1965.
2. Б. В. Ф е ф и л о в. Прикладная оптика, Геодезиздат, М., 1947.
3. С. В. К р а в к о в. Глаз и его работа, Изд-во АН СССР, М., 1950.
4. С. С. С т и в е н с. Экспериментальная психология, т. II, гл. 23, Изд-во иностр. лит., 1963.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ УДАЛЕННОСТИ ПО ВИДИМОЙ ВЕЛИЧИНЕ ОРИЕНТИРА, ЕЕ ГРАДИЕНТУ И ВИДИМОЙ СКОРОСТИ

Я. Я. Белик

При движении летательного аппарата относительно поверхности визуальная оценка удаленности от нее и ее изменения осуществляется функциональными системами, формирующимися прижизненно. Для управления зрительным восприятием человека необходимо знание структуры таких функциональных систем.

Изучение функциональных систем может быть произведено методом математического моделирования. Основой построения функциональных систем такого рода является рассмотрение зависимости между входными сигналами системы (например, видимая величина ориентира, его видимая скорость и т. д.) и выходными сигналами системы (оцениваемая удаленность, ее изменение и т. д.).

В данной статье будут рассмотрены математические модели оценки удаленности и ее изменения для случая вертикального движения, основанные на видимой скорости ориентира, его видимой величине и на градиенте его видимой величины.

Коэффициенты пропорциональности, связывающие между собой видимые величины признаков, и их объективные величины индивидуальны для каждого оператора, зависят от его зрительной системы (с учетом оптических приспособлений) и в большинстве случаев примерно равны единице. Поэтому в рассматриваемых моделях будут фигурировать видимые величины в качестве входных сигналов.

Рассмотрим модель функциональной системы оценки удаленности по видимой скорости ориентира, зависящей в общем случае как от скорости наблюдаемого ориентира, так и от скорости оператора. Произведенные нами расчеты дает следующее векторное уравнение:

$$\omega [\vec{k} \times \vec{i}] = \frac{\sin \gamma}{h} (\pm u \cos \gamma \pm v \sin \gamma) \vec{j}. \quad (1)$$

Здесь ω — видимая скорость ориентира;

u, v — линейные скорости оператора и ориентира (ориентир движется по радиусу);

h — расстояние от оператора до ориентира.

Верхний знак перед u означает движение оператора к поверхности, нижний — от поверхности; верхний знак перед v означает движение ориентира от проекции оператора на поверхность, а нижний знак —

к этой проекции. Единичные векторы $\vec{k}, \vec{i}$ и $\vec{j}$ имеют направление соответствующее видимой скорости, радиусу-вектору, направленному из точки наблюдения к ориентру, и суммарной проекции скоростей, перпен-

дикулярной радиусу-вектору. В этом уравнении все величины, кроме удаленности, либо известны заранее (u и v), либо непосредственно измеряются (ω , γ , $\vec{k}$, $\vec{i}$, $\vec{j}$). Это дает возможность однозначно решить уравнение (1) относительно удаленности. Реальные условия, в которых функциональная система оценки удаленности может работать соответственно модели (1) можно представить в виде относительного движения вертолета и поезда, вертолета и автомобиля.

Для неподвижных ориентиров модель [1] переходит в

$$\omega [\vec{k} \times \vec{i}] = \pm \frac{\sin 2\gamma}{2h} u \vec{j}, \quad (1,a)$$

где все обозначения имеют тот же смысл. Последний случай встречается в реальных условиях наиболее часто, поэтому укажем, что для него при малой величине линейной скорости (малые ω) лучше всего смотреть под углом $\gamma = 45^\circ$.

Если оператор производит оценку относительного изменения удаленности от поверхности, вызванного его движением, то математическими моделями функциональных систем, ответственных за эту оценку, могут быть следующие:

$$\left| \frac{\Delta h}{h} \right| = \frac{\pm \frac{\Delta \omega}{\omega}}{\frac{v}{u} \cdot \sin 2\gamma - 2 \sin^2 \gamma}, \quad (2)$$

$$\left| \frac{\Delta h}{h} \right| = \frac{\pm u (u \cdot \operatorname{ctg} \gamma - v) \frac{\Delta \omega}{\omega}}{2vu \cdot \cos 2\gamma + (u^2 - v^2) \sin 2\gamma}. \quad (3)$$

Здесь $\left| \frac{\Delta h}{h} \right|$ — искомая величина относительной удаленности;

$\left| \frac{\Delta \omega}{\omega} \right|$ — относительное изменение видимой скорости (под изменением везде понимается разность величин в конечном и начальном состоянии).

Остальные величины имеют тот же смысл. Уравнение [2] получено для разнотипного движения оператора и ориентира. Знак плюс в числителе соответствует движению оператора вверх (от проекции оператора на поверхность), а ориентира — к проекции оператора на поверхность, знак минус — обратному случаю.

Зависимость (3) получена для однотипного движения, причем знак плюс в числителе относится к случаю движения оператора и ориентира к проекции оператора на поверхность, а знак минус (перед u) относится к обратному случаю. В моделях (2) и (3) важной величиной, показывающей, насколько меняется относительное изменение видимой скорости с изменением удаленности, является коэффициент

$$X_\omega = \left| \frac{\frac{\Delta \omega}{\omega}}{\frac{\Delta h}{h}} \right|.$$

Величина этого коэффициента определяет оптимальный угол визирования, под которым следует смотреть для наиболее быстрой оценки $\left| \frac{\Delta h}{h} \right|$.

Несмотря на то, что X_ω для (2) и (3) имеет не единственный максимум, предпочтение надо отдать $X_\omega = 2$, наблюдаемому под $\gamma = \frac{\pi}{2}$, поскольку реально редко встречаются большие отношения $\frac{v}{u}$ и постоянство угла визирования методически удобно.

Кроме видимой скорости одним из многих признаков, на которых основаны разработанные и могущие быть разработанными функциональные системы оценки удаленности, является видимая величина ориентира. Рассмотрим оценку удаленности до поверхности по небольшим ($S \ll h^2 \sin^2 \gamma$, где S — площадь объекта) плоским объектам. Видимая величина этих объектов определяется телесным углом, под которым они видны. При наличии в поле зрения оператора знакомых объектов можно описать функциональную систему, с помощью которой он определяет удаленность от поверхности, следующей моделью:

$$h = \sqrt{\frac{S \sin^2 \gamma}{\Omega}}, \quad (4)$$

где Ω — видимый телесный угол; все остальные величины имеют тот же смысл, что и раньше.

При постоянном угле визирования (удобно взять $\gamma = \frac{\pi}{2}$ — смотреть под себя) наблюдается зависимость, согласно которой удаленность обратно пропорциональна корню квадратному из видимого телесного угла.

Моделирование функциональной системы, при помощи которой можно оценить относительное изменение удаленности по изменению видимой величины для способа прослеживания ориентира, привело к следующему уравнению:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\frac{\Delta \Omega}{\Omega}}{1 - 3 \sin^2 \gamma}, \quad (5)$$

где $\frac{\Delta \Omega}{\Omega}$ — относительное изменение видимой величины ориентира.

Остальные величины имеют тот же смысл, что и раньше.

Рассмотрение зависимости (5) показывает, что в области $0 < \gamma < \arcsin \sqrt{1/3}$ видимая величина ориентира с увеличением удаленности возрастает, а в области $\arcsin \sqrt{1/3} < \gamma < \frac{\pi}{2}$ — уменьшается.

Для быстрой оценки $\frac{\Delta h}{h}$ необходимо смотреть под углом $\gamma = \frac{\pi}{2}$, поскольку под этим углом наблюдается наибольшее изменение видимой величины ориентира. Что касается способа скольжения линии зрения по однородным ориентирам, то модель, соответствующая этому случаю, будет следующей:

$$\frac{\Delta \Omega}{\Omega} = -2 \frac{\Delta h}{h}. \quad (6)$$

По структуре это очень удобная модель, поскольку для любого угла визирования относительное изменение удаленности в два раза меньше относительного изменения видимой величины.

Далее рассмотрим модели функциональных систем, основанных на градиенте видимой величины ориентиров, определяющем степень ее изменения с изменением угла визирования. Рассмотрим будем вести для плоских горизонтальных и линейных горизонтальных ориентиров. Для функциональной системы, основанной на градиенте величины небольших плоских ориентиров, расчет дает следующую модель:

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta \gamma} \vec{j} = \frac{3S \sin^2 \gamma \cos \gamma}{h^2} \vec{j}, \quad (7)$$

где $\frac{\Delta \Omega}{\Delta \gamma} \vec{j}$ — градиент видимого телесного угла;

S — площадь ориентира,

$\vec{j}$ — единичный вектор в направлении градиента.

Для продольных и поперечных линейных объектов размером имеем соответственно (8) и (9):

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\gamma}\right)_{\parallel} \vec{j} = \frac{Dh \sin 2\gamma - D^2 \sin^2 \gamma}{h^2 - Dh \sin 2\gamma + D^2 \sin^2 \gamma} \vec{j}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\gamma}\right)_{\perp} \vec{j} = \frac{Dh \cos \gamma}{h^2 + D^2 \sin^2 \gamma} \vec{j}. \quad (9)$$

Если сравнить модели (7) — (9) для небольших объектов, то окажется, что градиент линейных ориентиров выражен лучше, чем градиент плоских ориентиров. Кроме того, важным преимуществом градиента линейных объектов является наличие нулей величины градиента в области $0 < \gamma < \frac{\pi}{2}$, так как это дает возможность искусственно строить удобные модели оценки удаленности, по которым можно научить простой оценке удаленности.

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТОВ ОРГАНОМ ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

В. П. Пчелинов, Е. П. Путятин

Одним из важнейших каналов связи человека с окружающим миром является его достаточно совершенный зрительный аппарат, благодаря которому он получает подавляющую долю информации.

Поэтому для создания устройств ввода графической и цветовой информации в вычислительные машины и различные автоматические системы необходимо изучать работу органа зрения человека с целью получения алгоритмов переработки зрительной информации.

В работах [1, 2] описана математическая модель цветового зрения человека, на основе которой разработана электронная модель, описываемая в настоящей работе.

Эта модель не является полной аналогией математической модели, она воспроизводит лишь отдельные ее блоки.

Функциональная схема основных узлов модели приведена на рисунке.

На входе модели имеется система фотосопротивлений с фильтрами $\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_{10}$, которые подобраны так, чтобы перекрывался весь видимый глазом диапазон спектра излучения.

В общем случае зрительный объект, который видит глаз человека, характеризуется распределением лучистой яркости по длине волны во времени и пространстве, т. е.

$$E = E(\lambda, x, y, t), \quad (1)$$

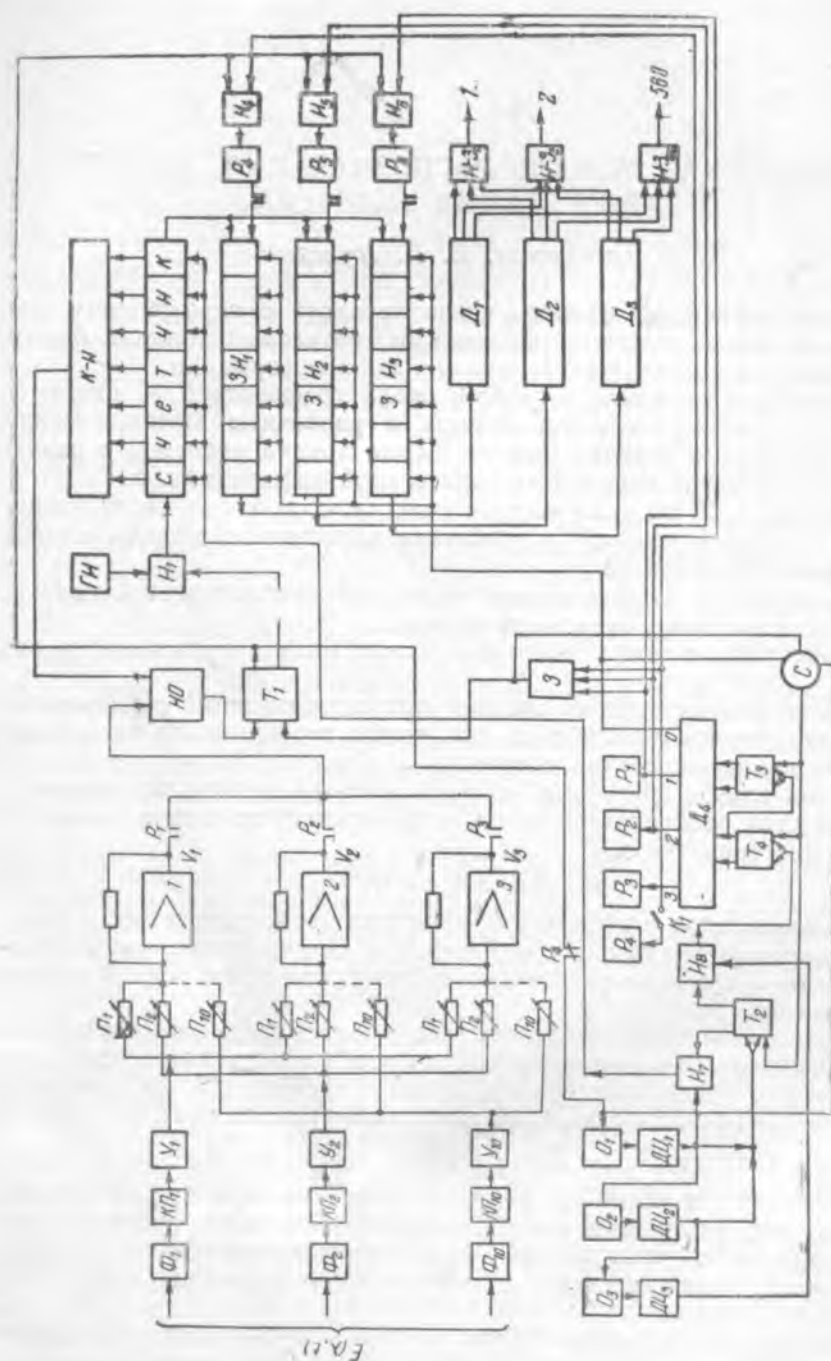
причем максимальная и минимальная яркости изображения могут изменяться в широком диапазоне при изменении освещенности, что необходимо учитывать при конструировании фотоэлектрических устройств ввода информации.

Если же ограничиться условием, что объект, предназначенный для анализа, однороден и освещается одним и тем же источником света, то входной сигнал будет представлять собой лучистую яркость, изменяющуюся только в зависимости от длины волны и времени, т. е.

$$E = E(\lambda, t). \quad (2)$$

Для восприятия такой информации блок фотоприемников должен состоять из трех фотоэлементов с фильтрами. При этом требуется, чтобы спектральные системы фильтр — фотоприемник совпадали с кривыми смещения глаза человека с точностью до линейных преобразований.

Однако процесс создания такой системы фотоприемников весьма трудоемок, так как трудно подбирать фильтры с заданной характеристикой. Фотоприемники же имеют разброс параметров, не стабильны во времени, и поэтому, чтобы такая система работала достаточно надежно, необходимо корректировать спектральные характеристики фильтров, что весьма затруднительно.



Функциональная схема модели.

Процесс конструирования системы, обладающей заданными характеристиками, можно облегчить, используя избыточное количество фотоприемников ($n > 3$) с различными спектральными характеристиками и применяя затем необходимые математические преобразования, приведенные в работе [3], которые сводятся к интерполированию заданной функции системой известных.

В этом случае возможна корректировка спектральной характеристики системы без подгонки фильтров путем изменения сопротивлений потенциометров $P_1, P_2, \dots, P_{10}$ на входе решающих усилителей.

В данной модели использовалось 10 фотоприемников. Чтобы обеспечить необходимую стабильность фотосопротивлений и устранить влияние посторонних источников света, объект, цвет которого требовалось определить, освещали пульсирующим источником света. В качестве такого источника использовалась лампа дневного света, которая мигала с частотой 50 гц.

Для создания такого режима лампы включали в электрическую сеть через диод, благодаря чему срезалась одна полуволна синусоиды напряжения сети.

С фотосопротивлений пульсирующее напряжение поступало на катодные повторители $KП_1, KП_2, \dots, KП_{10}$ и переменная составляющая его усиливалась усилителями $У_1, У_2, \dots, У_{10}$. Постоянную составляющую сигнала, получаемую за счет освещения объекта посторонними источниками света, не пропускает конденсатор, стоящий на входе каждого усилителя. Поэтому на выходе усилителей $У_1, У_2, \dots, У_{10}$ будет сигнал, получаемый от освещения объекта только пульсирующим источником света. Затем этот сигнал, имеющий форму, близкую к пилообразной, сглаживается электрическими фильтрами и поступает на соответствующие входы решающих усилителей.

После математических преобразований на выходе этих усилителей получаются сигналы V_1, V_2, V_3 в виде уровней напряжений, которые пропорциональны кривым смещения глаза человека, т. е. координатам цвета.

Корректировку этих напряжений в случае необходимости, можно осуществлять потенциометрами $P_1, P_2, \dots, P_{10}$.

Затем напряжения поочередно подаются на преобразователь аналог — код, который является преобразователем с обратной связью и состоит из генератора импульсов ГИ, нуля-органа НО, триггера T_1 , схемы $И_1$, семirazрядного счетчика импульсов, преобразователя код — напряжение КН и трех схем запоминания и индикации чисел, образующихся в счетчике $ЗИ_1, ЗИ_2, ЗИ_3$. Работает этот преобразователь следующим образом: при подаче одного из напряжений V_1, V_2, V_3 на одну из шин нуля-органа триггер T_1 устанавливается в такое положение, что схема $И_1$ пропускает импульсы генератора на счетчик импульсов. Последний их считает и выдает информацию на обратный преобразователь код — напряжение. В момент, когда напряжение на второй шине нуля-органа от преобразователя код — напряжение достигнет значения входного напряжения, ноль-орган начнет генерировать импульсы, которые поступают на второй вход триггера T_1 , и первым же импульсом триггер перебрасывается в другое состояние. При этом на схему $И_1$ подается сигнал, запрещающий подачу импульсов на счетчик. Таким образом, в счетчике будет зафиксировано число, соответствующее величине входного напряжения.

Это число запоминается соответствующей схемой ЗИ и выводится в виде светящихся неоновых лампочек. Затем автоматически производится сброс счетчика в нулевое состояние, подключение следующего

по порядку напряжения V_i ($i = 1, 2, 3$) и установка триггера T_1 в первоначальное состояние. Далее процесс повторяется.

Данная модель может работать в двух режимах: следящем, если на входе цвет объекта не стационарен, т. е. $E = E(\lambda, t)$, и стационарном, если на входе картина постоянна, т. е. $E = E(\lambda)$. Нужный режим задается переключателем K_1 . Автоматическая работа модели осуществляется следующим образом.

Перед началом работы кнопкой сброс «С» все элементы модели приводятся в исходное состояние. При этом на вход одновибратора O_1 (заторможенного мультивибратора) подается импульс, который запускает его, и на выходе дифференцирующей цепочки ДЦ₁ образуются два импульса: положительный — при запуске одновибратора и отрицательный при его возвращении в исходное состояние.

Положительным импульсом триггер T_2 переводится в противоположное состояние, подготавливает ячейку I_7 по одному из входов, а отрицательный импульс поступает на другой вход схемы I_7 . На выходе ее образуется сигнал, который является импульсом сброса для счетчика импульсов преобразователя аналог — код.

Этот же отрицательный импульс запускает одновибратор O_2 , выход которого подается на дифференцирующую ячейку ДЦ₂. Положительным импульсом с выхода этой ячейки триггер T_2 переводится в противоположное состояние и подготавливает ячейку I_8 по одному из входов. Этим же импульсом запускается одновибратор O_3 , и образующийся после него на дифференцирующей ячейке ДЦ₃ отрицательный импульс подается на второй вход схемы I_8 , проходит через нее и поступает на двухразрядный счетчик, состоящий из триггеров T_3 и T_4 .

Записанная таким образом в счетчике единица идет на дешифратор D_4 , в результате чего на его первой шине образуется сигнал, который включает реле P_1 . При этом контакты реле замыкаются и первое преобразуемое напряжение подается на преобразователь аналог — код.

Кроме того, с первой шины дешифратора D_4 подается сигнал на схему I_4 , подготавливающий ее по одному из входов.

После окончания преобразования напряжения в код с выхода нуля органа НО подается сигнал на триггер T_1 , означающий окончание преобразования. На выходе триггера T_1 , кроме сигнала, поступающего на схему I_1 , который запрещает подачу импульсов на счетчик, образуется еще сигнал, поступающий на второй вход I_4 , реле P_4 срабатывает, обеспечивая этим считывание информации со счетчика в схему запоминания и индикации. При этом загораются лампочки, соответствующие числу, записанному на счетчике.

Этот же сигнал с триггера T_1 одновременно поступает на вход одновибратора O_1 , запускает его и процесс повторяется.

По окончании процесса в счетчик импульсов на триггерах T_3, T_4 добавится еще единица, на выходе дешифратора теперь окажется возбужденной вторая шина, сработает реле P_2 , подключив напряжение V_2 , а реле P_1 отключится.

Затем аналогичным образом будет подано на вход преобразователя аналог — код напряжение V_3 . При этом на выходе схем запоминания $3И_1, 3И_2, 3И_3$ будут гореть лампочки, соответствующие кодам напряжений V_1, V_2, V_3 . Кроме того, информация с этих схем поступает на дешифраторы (соответственно D_1, D_2, D_3), выходы которых подаются на схемы $И - 3_1, И - 3_2, \dots, И - 3_{560}$.

Таким образом, любой комбинации чисел в схемах $3И_1, 3И_2, 3И_3$, т. е. любой комбинации напряжений V_1, V_2, V_3 , в свою очередь, зависящих от напряжений на входах решающих усилителей, поступающих от

фотоприемников, соответствует своя схема $И-3$, на выходе которой будет сигнал. Этот сигнал зажигает соответствующую лампочку, либо может подаваться как регулирующий или управляющий сигнал в автоматическую систему.

Если модель работает в следящем режиме, то после срабатывания реле P_3 будет возбуждаться нулевая схема дешифратора D_4 , которая осуществляет сброс информации во всех схемах $ЗИ$, после чего все снова повторяется.

Если же модель работает в стационарном режиме, который задается замыканием контактов переключателя K_1 , то одновременно со срабатыванием реле P_3 , срабатывает реле P_4 , которое разомкнет цепь подачи сигнала с триггера T_1 на одновибратор O_1 , и работа модели прекратится. Для следующего запуска ее достаточно нажать кнопку C .

Из описания схемы модели видно, что точность ее работы и количество определяемых цветовых оттенков зависит от количества фотоприемников, а также от числа разрядов счетчика импульсов преобразователя аналог — код и от количества разрядов дешифраторов D_1 , D_2 , D_3 .

Человеческий глаз различает несколько тысяч оттенков и построить устройство с таким количеством выходов затруднительно, поэтому в данной модели мы приняли 560 выходов. Число разрядов счетчика преобразователя аналог — код равно семи, что соответствует десятичному числу 128, так как $2^7 = 128$. Однако информация на дешифраторы подается только с последних четырех разрядов.

Этим достигается необходимая точность получения координат цвета и ограничение количества выходов.

Таким образом, на выходе каждого из дешифраторов D_1 , D_2 , D_3 будет по 16 шин, которые комбинируются по три на входах различных схем $И-3$. Следовательно, общее число схем $И-3$, т. е. число выходов модели будет равно числу сочетаний 16 элементов по три.

$$C_{16}^3 = \frac{16!}{3!(16-3)!} = 560. \quad (3)$$

Если бы мы сделали дешифраторы D_1 , D_2 , D_3 на все разряды счетчика, то число выходов было бы равно

$$C_{128}^3 = \frac{128!}{3!(128-3)!} = 341\,376. \quad (4)$$

Оптимальный вариант, по-видимому, соответствует пяти разрядам счетчика; при этом число выходов равно 4690, что соответствует среднему числу цветовых оттенков, различаемых человеческим глазом, известному из литературы. Однако при таком количестве выходов устройство будет слишком громоздким.

Быстродействие модели в основном определяется частотой работы генератора G , которая равна 5 кГц и может регулироваться. Максимальное время заполнения счетчика составляет

$$t = \frac{1}{5 \cdot 10^4} \cdot 128 = 25,6 \text{ мсек}. \quad (5)$$

Если к этому времени прибавить время работы одновибраторов O_1 , O_2 , и O_3 для каждого из них равное 1 мсек, то общее время такта, за который определяется одна из координат цвета, равно 28,6 мсек. Полное время определения цветового оттенка составляет $28,6 \cdot 3 = 85,8$ мсек. Таким образом, модель в следящем режиме следит за изменением цветового оттенка с частотой 11,6 Гц. Если необходимо, эту частоту можно увеличить во много раз, увеличив частоту генератора.

Различные узлы модели выполняются на разных электронных элементах. Катодные повторители $KП_1, KП_2, \dots KП_{10}$, усилители $У_1, У_2, \dots У_{10}$ и решающие усилители выполняются на электронных лампах, а все остальные блоки на полупроводниковых приборах и неоновых лампах. Такая комбинация элементов обеспечивает простоту и необходимую стабильность работы модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Е. П. Путятин. «Математическая модель цветового зрения человека». XXI Всесоюзная научная сессия, посвященная 70-летию изобретения радио А. С. Поповым. Докл. секции бионики, изд. НТОР и Э, М., 1965.
 2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Е. П. Путятин, Г. Д. Майстровский. Моделирование однородных стационарных зрительных процессов. Сб. «Моделирование в биологии и медицине», вып. II, изд-во «Наукова думка», К., 1966.
 3. Н. Я. Какурин, Е. П. Путятин, В. П. Пчелинов. Некоторые вопросы построения датчиков ввода цветовой информации в ЭЦВМ. Сб. «Приборы и системы автоматики», вып. 7, Изд-во ХГУ, 1968.
 4. А. О. Олеск. Фоторезисторы, изд-во «Энергия», 1966.
-

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ КРАЕВОГО КОНТРАСТА

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, В. Я. Сердюченко

Давно известно, что орган зрения осуществляет подчеркивание границ, содержащихся в изображении, которое обнаруживается в виде явления краевого контраста [1]. Это свойство зрения несомненно целесообразно, поскольку благодаря наличию краевого контраста облегчается обнаружение и последующий анализ контура изображения.

В настоящей работе предлагается математическая модель обработки зрительной информации, лежащей в основе явлений краевого контраста.

Ограничиваясь ахроматическими зрительными картинками, рассматриваем их как функции яркости $U = U(x, y)$ координат x, y поля зрения. Зрительное ощущение характеризуем светлотой $B = B(x, y)$.

Модель преобразования информации в органе зрения человека представим в виде схемы, изображенной на рис. 1. Функции $P(x, y)$, $V(x, y)$ и $S(x, y)$ обозначают некоторые промежуточные сигналы преобразования.

Блок 1 осуществляет иррадиационное преобразование зрительной информации согласно уравнению

$$-b^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + P = U. \quad (1)$$

Функционирование этого блока рассмотрено в работе [2].

Поскольку явления краевого контраста разыгрываются на значительно более крупных участках поля зрения, чем явления иррадиации, в настоящей работе для упрощения задачи иррадиационные процессы вовсе не учитываются, а блок 1 рассматривается в качестве тождественного преобразователя

$$P = U. \quad (2)$$

Блок 2 осуществляет логарифмирование сигнала P :

$$U = c \lg dP, \quad (3)$$

где c и d — константы, численные значения и размерность которых зависят от выбора единицы измерения соответственно для светлоты и яркости.

Преобразование сигналов в блоке 3 описывается уравнением

$$-n^2 \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + S = k_k V, \quad (4)$$

сходным с уравнением иррадиации зрения. Константу k_k назовем постоянной интенсивности контраста, константу n — постоянной затухания краевого контраста.

Блок 3 осуществляет вычитание сигналов:

$$B = V - S. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (4) для случая безграничной двумерной зрительной картины имеет вид

$$S(x, y) = \frac{k_k}{4\pi n^2} \iint_{-\infty}^{\infty} V(\xi, \eta) K_0 \left(\sqrt{\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{n}} \right) d\xi d\eta, \quad (6)$$

где k_0 — функция Макдональда, ξ и η — переменные интегрирования.

В частном случае, когда зрительная картина неоднородна только в направлении координатной оси x , решение уравнения (4) запишется в виде

$$S(x) = \frac{k_k}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} V(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n}} d\xi. \quad (7)$$

Для выяснения функционального смысла параметров k_k и n модели рассмотрим зрительную картину $U(x)$, содержащую вертикальную границу $x=0$. Левая половина поля зрения имеет яркость U_1 правая U_2 , т. е.

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{при } x \leq 0, \\ U_2 & \text{» } x > 0. \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае светлота зрительного ощущения, определяемая с помощью формул (2), (3), (5) и (7), запишется в виде

$$B(x) = \begin{cases} B_1 - \Delta B e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ B_2 + \Delta B e^{-\frac{x}{n}} & \text{» } x > 0, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$B_1 = (1 - k_k) c \lg dU_1,$$

$$B_2 = (1 - k_k) c \lg dU_2, \quad (10)$$

$$\Delta B = \frac{1}{2} k_k c \lg \frac{U_2}{U_1}.$$

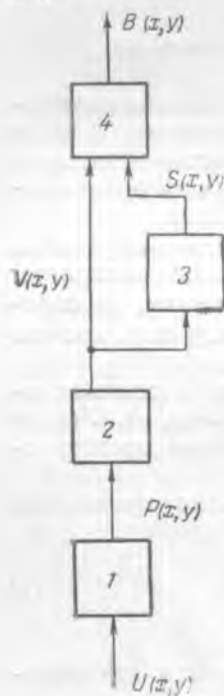


Рис. 1.

На рис. 2, а и б представлены диаграммы изменения яркости зрительной картины и светлоты зрительного ощущения в функции координаты x . Как видим, на уровне зрительного ощущения граница выглядит подчеркнутой. Подобное подчеркивание границы наблюдается также и в психофизическом эксперименте в виде краевого контраста.

Определим, во сколько раз увеличивается перепад светлоты на границе благодаря действию краевого контраста. При отсутствии действия краевого контраста перепад светлоты на границе ΔB был бы равен:

$$\Delta B' = B_2 - B_1 = (1 - k_k) c \lg \frac{U_2}{U_1}. \quad (11)$$

Перепад светлоты с учетом краевого контраста $\Delta B''$ равен

$$\Delta B'' = 2\Delta B + \Delta B' = c \lg \frac{U_2}{U_1}. \quad (12)$$

Следовательно, за счет действия краевого контраста перепад светлоты на границе увеличивается в

$$\text{раз.} \quad \frac{\Delta B''}{\Delta B'} = \frac{1}{1 - k_k} \quad (13)$$

Формула (13) показывает, что интенсивность подчеркивания контура определяется исключительно значением постоянной модели k_k , чем оправдывается введенное для нее выше название. Из формулы (13) также следует, что постоянная k_k находится в пределах от 0 до 1. Рост величины параметра k_k приводит к усилению подчеркивания границы.

Из диаграммы рис. 2, б можно видеть, что при удалении от границы приращение светлоты ΔB , обусловленное краевым контрастом, плавно снижается, затухая до нуля. Темп этого затухания полностью определяется значением константы n , изображенной на диаграмме в виде отрезка прямой.

Теперь, когда математическая модель краевого контраста построена, приступим к ее экспериментальной проверке. Уже простое наблюдение видимой границы между полями различной яркости свидетельствует о подчеркивании границы, интенсивность которого постепенно угасает по мере удаления от нее.

Для строгого количественного сравнения реакций глаза и модели необходимо было бы определить фактический закон изменения светлоты при удалении от границы. Однако сознание наблюдателя, используемое в качестве записывающего прибора, работает очень неточно, и поэтому кроме грубых оценок здесь ничего другого не удается получить.

Однако известно, что сознание наблюдателя можно использовать как весьма точный нуль-прибор, фиксирующий равенство или неравенство светлоты на различных участках зрительного ощущения.

Воспользуемся этим свойством сознания для решения обратной задачи. До сих пор мы по заданной зрительной картине определяли, каким будет зрительное ощущение. Теперь ставится обратная задача: задано зрительное ощущение: необходимо подыскать зрительную картину, которая порождает именно это ощущение. Решив задачу, мы получим возможность формировать такие простые зрительные ощущения, для анализа которых достаточно использовать сознание наблюдателя лишь в качестве нуль-прибора.

Для возбуждения такого зрительного ощущения придется взять достаточно сложную зрительную картину. Сравнивая теоретически предсказанную зрительную картину с той, которая фактически получена в эксперименте, можно осуществить количественную проверку справедливости модели.

Пусть задано произвольное зрительное ощущение $B(x, y)$. Зрительная картина $U(x, y)$, порождающая это ощущение, может быть определена по формулам

$$U = \frac{1}{a} 10^{\frac{1}{2} v}, \quad (14)$$

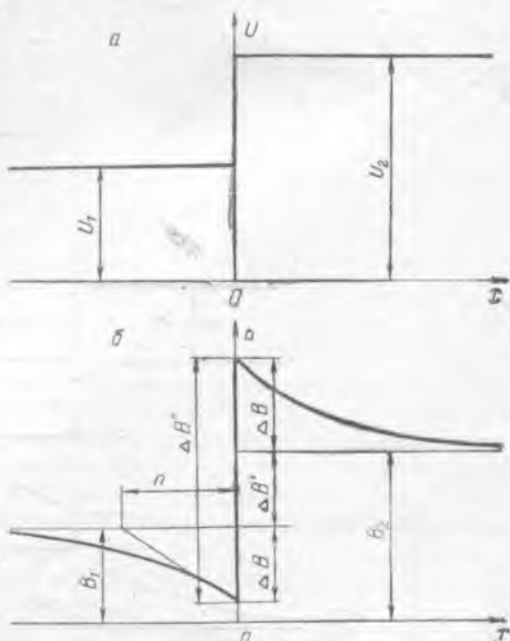


Рис. 2.

$$V(x, y) = B(x, y) + \frac{k_k}{4\pi n^3} \iint_{-\infty}^{\infty} B(\xi, \eta) K_0 \left(\sqrt{\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{n}} \right) d\xi d\eta. \quad (15)$$

В случае, когда зрительное ощущение однородно вдоль оси y , формула (15) запишется в более простом виде:

$$V(x) = B(x) + \frac{k_k}{2\sqrt{1-k_k n}} \int_{-\infty}^{\infty} B(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n}} \sqrt{1-k_k} d\xi.$$

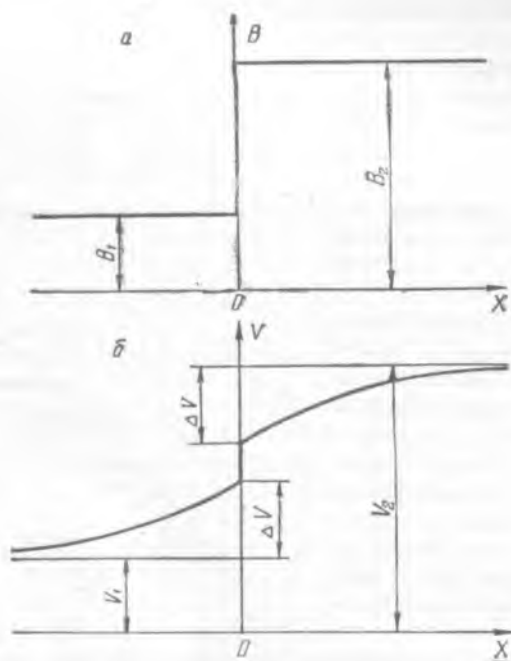


Рис. 3.

Зададимся зрительным ощущением, описываемым следующей системой условий:

$$B(x) = \begin{cases} B_1 & \text{при } x \leq 0, \\ B_2 & \text{» } x > 0. \end{cases} \quad (17)$$

Такое зрительное ощущение разделено вертикальной границей на две области. Левая область имеет светлоту B_1 , правая — светлоту B_2 . Характер изменения светлоты зрительного ощущения показан на рис. 3, а.

Зрительная картина, порождающая такое ощущение, определится зависимостью:

$$V(x) = \begin{cases} V_1 + \Delta V e^{\frac{x}{a} \sqrt{1-k_k}} & \text{при } x \leq 0, \\ V_2 - \Delta V e^{-\frac{x}{a} \sqrt{1-k_k}} & \text{» } x > 0, \end{cases} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} V_1 &= c \lg dU_1, \\ V_2 &= c \lg dU_2, \\ \Delta V &= \frac{1}{2} k_k c \lg \frac{U_2}{U_1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Переход от переменной $V(x)$ к яркости зрительной картины $U(x)$ осуществляется по формуле (14).



Рис. 4.

Диаграмма зависимости функции V , пропорциональной логарифму яркости зрительной картины, от координаты x дана на рис. 3, б.

С целью опытной проверки зависимости (18) были выполнены эксперименты, описание которых приведено ниже.

С помощью вертушки (диска Максвелла) формировалась специальная зрительная картина, яркость которой изменялась вдоль радиуса по заданному закону, определяемому формулами (14), (18), (19). При этом коэффициент отражения ρ диска вертушки должен был меняться вдоль радиуса r согласно следующей зависимости:

$$\lg \rho = \begin{cases} \lg \rho_1 + \frac{1}{2} k_k \lg \frac{\rho_2}{\rho_1} e^{\frac{r-r_0}{hn}} \sqrt{1-k_k} & \text{при } r \leq r_0, \\ \lg \rho_2 - \frac{1}{2} k_k \lg \frac{\rho_2}{\rho_1} e^{-\frac{r-r_0}{hn}} \sqrt{1-k_k} & \text{при } r > r_0. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь $r_0 = 60$ мм — радиус на диске вертушки, при котором происходит скачкообразное изменение светлоты; ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты отражения, соответствующие яркостям B_1 и B_2 ; $h = 200$ мм — расстояние наблюдения.

В одном из опытов было принято $\rho_1 = 73\%$, $\rho_2 = 83\%$, $k_k = 0,9$, $n = 20' = 0,0058$ рад. При этих данных соответствующая фигура, вычерченная черной тушью на кружке из белой бумаги, имеет вид, изображенный на рис. 4, а.

Рассматривая быстро вращающийся диск Максвелла с указанным выше распределением яркости, испытуемый видит четкую границу без каких-либо признаков краевого контраста или размыва границы. Изменение параметра k_k в пределах $0,85 \div 0,95$ не приводит к заметным искажениям зрительного ощущения. При увеличении параметра k_k до значения $0,95$ и более испытуемый отмечает размыв границы, при уменьшении k_k до $0,85$ и ниже становится заметным краевой контраст. Зрительное ощущение существенно не искажается также при изменении параметра n в пределах $15' - 30'$. Если взять $n < 15'$, то будет видна неоднородность светлоты зрительного ощущения вблизи границы, и первую оче-

редь на более темном поле. Если же $n > 30'$, то заметен краевой контраст.

Следует отметить, что изменение освещенности диска вертушки в широких пределах (от 10 до 1000 нит) в полном соответствии с теорией не вносит существенных изменений в характер зрительного ощущения, которое с обеих сторон границы продолжает выглядеть равномерным.

При значениях параметров $k_k = 0,9$ и $n = 20'$ были также сформированы зрительные картины для других пар коэффициентов отражения $\rho_1 = 32\%$, $\rho_2 = 42\%$; $\rho_1 = 78\%$, $\rho_2 = 83\%$. Для этих картин порождающие их фигуры имеют вид, изображенный на рис. 4, б и в. Опыты с образцами также не дали существенных отклонений от теоретически предсказываемого результата. Выполненные опыты свидетельствуют о справедливости предложенной модели краевого контраста зрения.

Возьмем в качестве входного сигнала модели зрительную картину в виде вертикальной полосы на однородном фоне. Обозначим яркость фона через U_0 , прибавку яркости полосы, по сравнению с фоном, — через ΔU , ширину полосы в угловых единицах — через Δx .

Полагая, что ось полосы проходит через точку фиксации, можем записать следующие выражения для описания яркости зрительной картины:

$$U(x) = \begin{cases} U_0 & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ U_0 + \Delta U & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ U_0 & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (21)$$

На рис. 5, а показан ход изменения яркости зрительной картины в зависимости от координаты X .

Ход изменения светлоты зрительного ощущения $B(x)$, вычисляемой по формулам (2) ÷ (5) при условии (21), определится формулами:

$$B(x) = \begin{cases} V_0 - k_k V_0 - k_k \Delta V \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{2n} e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ V_0 + \Delta V - k_k V_0 - k_k \Delta V \left(1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n}} \operatorname{ch} \frac{x}{n} \right) & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ V_0 - k_k V_0 - k_k \Delta V \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{2n} e^{-\frac{x}{n}} & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}, \end{cases} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} V_0 &= c \lg dU_0, \\ \Delta V &= c \lg \frac{U_0 + \Delta U}{U_0}. \end{aligned} \quad (23)$$

Диаграмма изменения светлоты зрительного ощущения показана на рис. 5, б. Из диаграммы видно, что контуры полосы должны выглядеть подчеркнутыми с двух сторон, причем средняя часть полосы по светлоте будет ближе к фону, чем ее края. Простой психофизический эксперимент показывает, что зрительное ощущение, порождаемое полосой, имеет именно такой характер.

Воспользуемся диском Максвелла (вертушкой) и вычертим для него на белом бумажном кружке сектор кольца с размерами, указанными на рис. 6. Закручивая вертушку со сверхкритической скоростью (порядка 50 об/сек), получим согласно закону Тальбота, зрительное ощущение такое же, как от зрительной картины в виде полосы (21). Небольшое ис-

кривление полосы в данном случае не имеет существенного значения. Наблюдая полосу, сформированную на диске вертушки, мы увидим распределение светлоты, соответствующее по своему характеру тому, которое было предсказано на основе анализа модельных реакций (рис. 5, б). Внутри кольца имеется потемнение, интенсивность которого наиболее велика в непосредственной близости от границ. Вне кольца вблизи границ заметно посветление фона, особенно большое у самых границ.

Средняя часть полосы между двумя границами заметно темнее периферических ее частей.

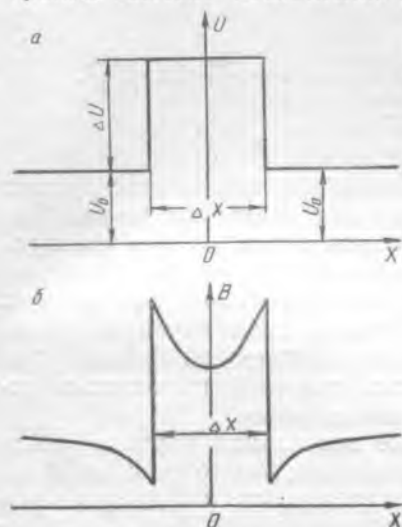


Рис. 5.

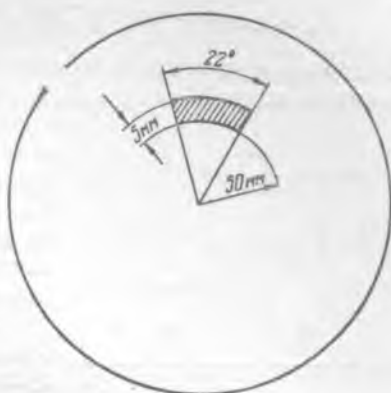


Рис. 6.

Описанный эксперимент, подтверждая теорию в качественном отношении, почти ничего не дает для количественной ее проверки, поскольку на глаз очень трудно оценивать уровень светлоты на различных участках зрительного ощущения.

Совершенно иначе обстоит дело при такой постановке эксперимента, когда испытуемый должен лишь устанавливать равенство или неравенство уровня светлоты на различных участках поля зрения. В этом случае осуществим довольно точный количественный анализ зрительного ощущения, поскольку сознание наблюдателя хорошо справляется с ролью нуль-прибора.

Чтобы подойти к постановке эксперимента, рассмотрим случай функционирования модели, когда на ее выходе возникает зрительное ощущение $B(x)$ в виде полосы постоянной светлоты на однородном фоне. Математическое представление такого зрительного ощущения запишем в виде

$$B(x) = \begin{cases} B_0 & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ B_0 + \Delta B & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ B_0 & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (24)$$

Диаграмма изменения светлоты зрительного ощущения показана на рис. 7.

Чтобы получить такого вида зрительное ощущение, необходимо подать на вход модели некоторую, вполне определенную зрительную картину. Формулы, характеризующие такую зрительную картину, можно

получить, решая систему уравнений (14) и (16) при условии (24). Они имеют вид:

$$U = \frac{1}{d} 10^{\frac{1}{2} V}, \quad (25)$$

$$V(x) = \begin{cases} V_0 + k_k \Delta V \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{n} e^{\frac{x}{n} \sqrt{1-k_k}} & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ V_0 + \Delta V - k_k \Delta V e^{-\frac{\Delta x}{2n} \sqrt{1-k_k}} \operatorname{ch} \frac{x}{n} \sqrt{1-k_k} & -\frac{\Delta x}{2} < x < \frac{\Delta x}{2}, \\ V_0 + k_k \Delta V \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{2n} \sqrt{1-k_k} e^{-\frac{x}{n} \sqrt{1-k_k}} & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (26)$$

Диаграмма изменения яркости зрительной картины в поле зрения, построенная по формулам (25) и (26), имеет вид, указанный на рис. 7, а.

Если теория верна, то при предъявлении зрительной картины, имеющей распределение яркости такое, как на рис. 7, а, наблюдатель должен увидеть полосу совершенно равномерной яркости. Фон вокруг полосы также будет видаться совершенно равномерным.

Если же зрительная картина подобрана неправильно, это тот час же обнаружится в эксперименте и приведет к появлению неравномерностей яркости в поле зрения. Сознание наблюдателя легко обнаружит эти неравномерности, выполняя функции весьма точного нуля-прибора.

Эксперимент выполнялся с помощью той же вертушки, дозировка и распределение яркости зрительной картины регулировались соотношением угловых размеров белого и черного секторов вертушки. Этим достигалось желаемое изменение коэффициента отражения вдоль радиуса диска вертушки.

Чтобы зрительная картина, сформированная на диске вертушки, соответствовала формулам (25) и (26), коэффициент отражения ρ поверхности диска должен изменяться вдоль радиуса r по следующему закону:

$$\lg \rho = \begin{cases} \lg \rho_0 + k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \operatorname{sh} \frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k} e^{\frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k}} & \text{при } r - r_0 \leq -\frac{\Delta r}{2}, \\ \lg(\rho_0 + \Delta \rho) - k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) e^{-\frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k}} \operatorname{ch} \frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k} & \text{при } -\frac{\Delta r}{2} < r - r_0 < \frac{\Delta r}{2}, \\ \lg \rho_0 + k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \operatorname{sh} \frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k} e^{-\frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k}} & \text{при } r - r_0 > \frac{\Delta r}{2}. \end{cases} \quad (27)$$

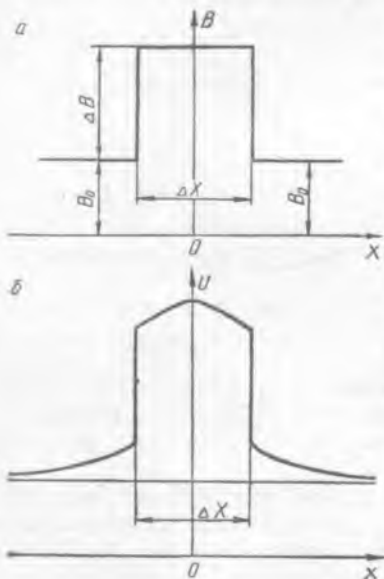


Рис. 7.

В формулах (27) $\Delta r = 5$ мм обозначает ширину полосы в линейных единицах, $r_0 = 52,5$ мм — радиус оси полосы, $h = 500$ мм — расстояние, с которого ведется наблюдение полосы.

Коэффициенты отражения ρ_0 и $\rho_0 + \Delta\rho$ соответствуют светлотам B_0 и $B + \Delta B$ однородных полей. В эксперименте принято $\rho_0 = 83\%$, $S_0 + \Delta\rho = 78,2\%$.

Раскраска кружков велась при различных значениях параметров k_h и n . Оказалось, что при значениях $k_h = 0,9$ и $n = 20'$ мы получаем зрительное ощущение без каких-либо следов неравномерности светлоты как внутри полосы, так и вне ее. В то же время сравнительно небольшие отклонения значений этих параметров приводят к появлению неравномерности светлоты зрительного ощущения. Характер отклонений примерно такой же, как тех, которые были описаны в предыдущем параграфе. Раскраска кружка, дающего равномерное зрительное ощущение, изображена на рис. 8. Подобные опыты проводились также при ширине полосы 10 мм и дали аналогичные результаты.

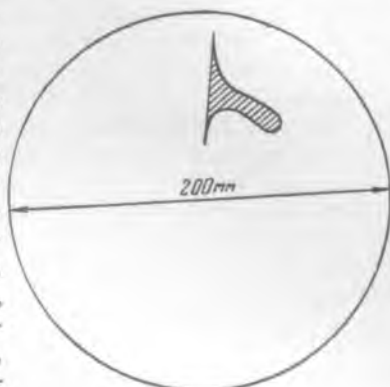


Рис. 8.

Такого же рода теоретические расчеты и эксперименты выполнялись и при других разновидностях зрительных картин и зрительных ощущений — двойном скачке яркости и светлоты, «лесенке». В этих случаях также получено удовлетворительное согласие теории и опыта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optic, Hamburg u. Leipzig, 1909—1911.
2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, А. Г. Мурашко, Моделирование иррадиации зрения, «Светотехника», 1966, № 12.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНОВ ДВИГАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Л. М. Касаткина

Планирование последовательностей двигательных актов и предвидение результатов их выполнения является одним из наиболее важных этапов организации двигательного поведения.

В работах [1, 2] описана система, моделирующая двигательное поведение человека и высших животных в ситуациях определенного класса. В настоящей статье дано краткое описание подсистемы модели, предназначенной для построения планов поведения, и приводятся результаты первой серии экспериментов с ней.

Система находится в некоторой условной среде, состоящей из ячеек или клеток, и ее двигательное поведение проявляется в перемещении из одной клетки среды в другую. Каждая клетка среды может быть либо пустой, либо содержать в себе один из «объектов» среды. Система поразному реагирует на каждый из объектов, в зависимости от его типа и собственного внутреннего состояния.

Система построена таким образом, что при движении в среде она имеет возможность «обозревать» только клетки, соседние с той, в которой она находится в данный момент. Такое ограничение, накладываемое на характер поступления в систему информации о состоянии внешней среды, исключает возможность построения достаточно сложного и целесообразного целенаправленного поведения. Поэтому, кроме описанного выше режима сбора информации, который можно назвать «оперативным обзором ситуаций», в системе реализуется и другой режим — «режим планирования». В режиме планирования система может «осматривать» значительно большие участки среды, определять цель движения и строить план достижения этой цели. Во время планирования какие-либо перемещения системы исключаются. После завершения планирования система получает возможность передвигаться и начинает работать в режиме оперативного обзора.

При движении в среде выработанный план оказывает влияние на переработку информации в системе и, следовательно, на выбор конкретных действий, приводящих к перемещению в ту или иную клетку среды.

Конечная цель движения системы задается экспериментатором в виде координат одной из клеток среды и может находиться вне пределов участка, осматриваемого системой в режиме планирования. В последнем случае система производит выбор промежуточной цели на границе этого участка и строит план, необходимый для ее достижения. Более подробно этот процесс будет описан ниже.

Модель планирования двигательного поведения реализована в виде двух программ для ЦВМ — программы построения «оценочной по-

верхности» осматриваемого участка среды и программы построения плана поведения.

При построении оценочной поверхности модель определяет координаты клетки главной цели. Если она находится вне пределов осматриваемого участка, то определяются координаты «условной» цели — клетки, лежащей на пересечении прямой, соединяющей собственную клетку системы с клеткой главной цели, и границы участка. «Условная» цель не обязательно в последующем выбирается в качестве промежуточной; она служит для оценки пространственного расположения клеток среды относительно кратчайшего пути к главной цели. Содержание клеток среды при этом не учитывается. Результатом оценки является построение «начальной оценочной поверхности», крутизна которой определяется задаваемой экспериментатором «силой цели» F .

Осмотр участка среды производится поклеточно. При этом воспринимаемые в клетках объекты оцениваются системой и результат оценки суммируется с оценкой этой же клетки, полученной при построении начальной оценочной поверхности. Если воспринимаются положительные по отношению к системе объекты («пища» и т. п.), общая оценка соответствующей клетки повышается, если отрицательные («опасность» и т. п.), — понижается. Таким образом, после осмотра на начальной оценочной поверхности образуются «пики» и «впадины», величина которых зависит от типа соответствующих объектов и состояния системы в момент оценки. На следующем этапе производится коррекция оценок всех клеток среды в зависимости от их близости к «пикам» и «впадинам». В результате образуется уточненная «конечная» оценочная поверхность.

Кроме описанных выше начальной и конечной оценочных поверхностей, которые мы будем называть поверхностями первого уровня, система формирует и более общее представление о среде. Среда условно разделяется на группы клеток, объединенных по пространственному признаку. Сумма оценок всех входящих в группу клеток является оценкой условной клетки второго уровня, представляющей данную группу клеток первого уровня. Распределение оценок клеток второго уровня образует оценочную поверхность второго уровня. Аналогично формируется и поверхность третьего уровня.

Оценочные поверхности используются для выбора промежуточной цели и построения конкретного плана ее достижения.

Двигательная сфера системы организована иерархично, и одинаковые уровни оценочных поверхностей и действий имеют одинаковую степень общности. Это позволяет нам говорить, что «простое» действие системы переводит ее из одной клетки первого уровня в другую; «сложное» действие переводит систему в соседнюю клетку второго уровня, «составное» — в соседнюю клетку третьего уровня. Построение плана происходит сверху вниз — от выбора составного действия к выбору расшифровывающих его более конкретных действий.

Обобщение клеток среды по уровням осуществляется в модели таким образом, что для 324 клеток первого уровня имеется 27 клеток второго и шесть клеток третьего уровня. Для упрощения принимается следующее: в момент построения плана система расположена так, что любая промежуточная цель может быть достигнута выполнением не более чем одного составного действия.

Если главная цель движения системы лежит вне границ осматриваемого участка среды, то выбор промежуточной цели осуществляется так.

Система сравнивает оценки клеток третьего уровня и выбирает клетку с максимальной оценкой. При этом запоминается номер соответ-

ствующего действия третьего уровня. Затем производится сравнение оценок клеток второго уровня, расположенных внутри границ выбранной клетки третьего уровня, и поиск максимальной из них. Последняя и становится промежуточной целью системы.

Построение плана предусматривает запоминание последовательностей только сложных действий (выше было оговорено, что составное действие выбирается одно). Соответственно в качестве промежуточной цели выбирается клетка второго уровня.

При построении плана второго уровня учитывается не только конечная оценочная поверхность второго уровня, но и то, какое действие третьего уровня было выбрано.

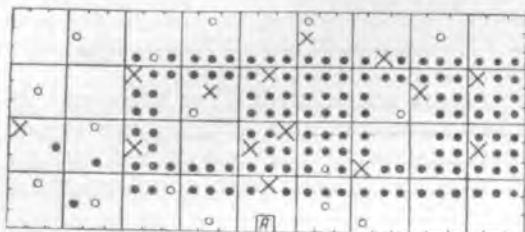


Рис. 1. Условная среда. Показаны клетки второго уровня:

A — клетка, в которой находится модель во время планирования; o — объект P1; x — объект P2; o — объект P3.

Более подробно процесс построения оценочных поверхностей и выбора планов поведения описан в работе [3].

В модели построения плана двигательного поведения предусмотрены два основных режима работы:

1. «Жесткое» влияние выбранного действия третьего уровня на построение плана второго уровня. В зависимости от направления, задаваемого

действием третьего уровня, усиливаются определенные действия второго уровня независимо от того, соответствует ли это направление на данном этапе планирования направлению на выбранную цель.

2. «Гибкое» планирование, при котором на каждом этапе дополнительное усиление получают действия, наиболее соответствующие направлению на цель.

Некоторые результаты исследования первого режима работы модели приведены в [2]. В настоящей статье будет рассматриваться только второй режим.

Исследовалось влияние некоторых «типологических» особенностей — «характера» модели на построение планов поведения в стационарной условной среде, показанной на рис. 1. Были выбраны три типа «характеров» — T1, T2, T3 и среда, состоящая из трех типов объектов, — положительных — P1, сильно отрицательных — P2 и слабо отрицательных — P3. В общей системе, моделирующей двигательное поведение, оценка объектов производится в эмоциональной сфере системы. Здесь же в качестве исходной информации для построения оценочных поверхностей использовалась заранее заданная оценка всех трех типов объектов. В зависимости от типа «характера» модели задавались различные оценки объектов в таблице.

«Характер»	Оценки объектов		
	P1	P2	P3
T1	35	—50	—15
T2	35	—35	—10
T3	35	—20	—5

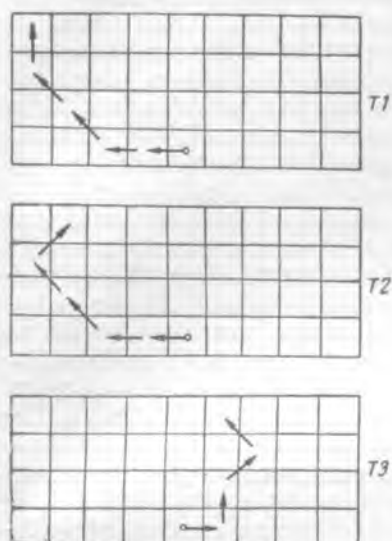


Рис. 2. Объяснение в тексте. Среда схематически представлена клетками второго уровня. ($F1 = 30$).

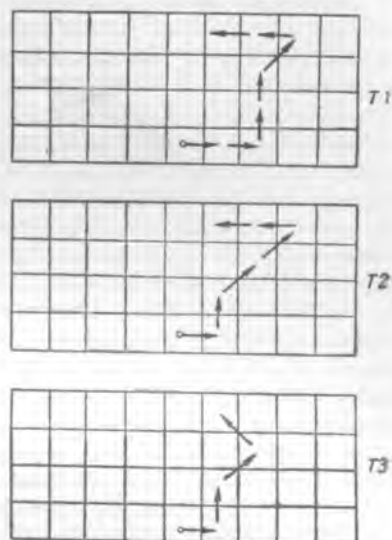


Рис. 3. Объяснение в тексте. ($F1 = 30$).

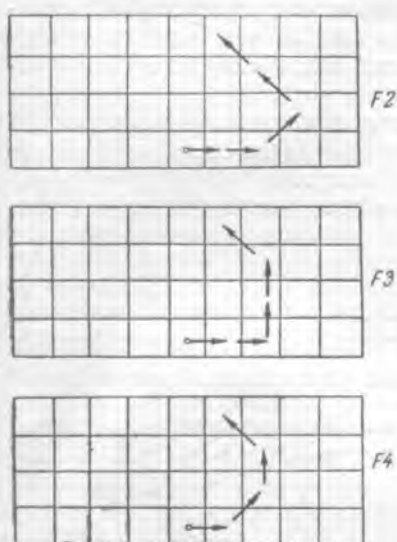


Рис. 4. Объяснение в тексте.

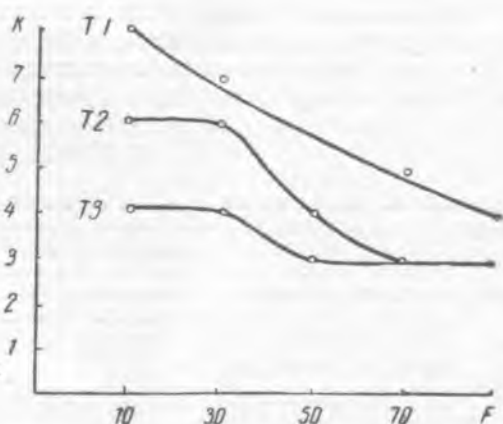


Рис. 5. Зависимость количества этапов плана от «силы цели»:

K — количество этапов плана, F — сила цели (в условных единицах).

Примеры планов, построенных моделями с различными «характерами» при одинаковой «силе цели» $F1$ показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, по своему поведению модели с различными «характерами» значительно отличаются друг от друга. План модели $T3$ наиболее короток и проходит через участки среды, содержащие объекты $P3$. Модели $T2$ и особенно $T1$ — стараются обходить эти участки и их планы соответственно гораздо длиннее. Показанные на рис. 2 планы построены при главной целевой клетке, находящейся вне пределов осматриваемого участка среды; выбор промежуточной целевой клетки при этом зависит от «силы цели» и типа «характера» модели. На рис. 3 показаны планы для рассматриваемых типов моделей, одинаковой «силы цели» $F1$ и главной цели, расположенной на границе осматриваемого участка. Пример изменения плана с увеличением «силы цели» показан для модели $T1$ на рис. 4. ($F_4 > F_3 > F_2$). Общие зависимости количества этапов плана от «силы цели» для всех типов моделей приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что количество этапов плана уменьшается с увеличением «силы цели», и поэтому можно полагать, что при достаточно высокой «силе цели» оно станет одинаковым для моделей всех типов и равным минимальному расстоянию от исходной клетки до целевой.

В заключение остановимся еще на одном свойстве модели, проявившемся в ходе ее исследования. Модель при построении плана имеет возможность запоминать различные варианты планов и, если все они оцениваются ниже некоторого критерия, выбирать лучший из них. Если же один из вариантов оценивается выше критерия, то он принимается как окончательный и дальнейшее рассмотрение возможных планов не производится. Эксперименты показали, что модель с «характером» $T1$ «просматривает» большее количество вариантов плана, чем модели с «характерами» $T2$ и $T3$ при одинаковом для всех типов «характеров» критерии оценки плана.

Модель построения плана двигательного поведения реализована в виде двух программ для ЦВМ М-20. Объем программ составляет около 1700 команд и их просчет не превышает трех минут.

В настоящее время проводится дальнейшее исследование модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Касаткина, А. М. Касаткин. Эвристическая модель поведения. Структура и динамика. Сб. «Некоторые проблемы биокibernетики, применение электроники в биологии и медицине», КДНТП, К., 1967.
2. А. М. Касаткин, Л. М. Касаткина. Моделирование цілеспрямованої поведінки живих організмів. «Автоматика», 1966, № 5.
3. Л. М. Касаткина, А. М. Касаткин. Эвристическая модель поведения. Построение плана. Сб. «Некоторые проблемы биокibernетики, применение электроники в биологии и медицине», КДНТП, К., 1967.

НОВЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

С. К. Лисицын

До последнего времени в психофизических исследованиях данные о биопотенциалах мозга используются слабо. В значительной степени это объясняется трудностью выявления на электроэнцефалограмме (ЭЭГ) функциональных статистических и семантических закономерностей; отсутствием сведений о роли ЭЭГ-сигналов в работе мозга; недостаточным знанием природы ЭЭГ-волн.

Можно выделить чисто информационную сторону вопроса и считать, что ЭЭГ-сигналы несут определенную и разнообразную информацию от одного участка мозга к другому по принципу «Всем! Всем!». Достоинством такой гипотетической схемы сообщения является надежность связи в условиях отсутствия множества ретрансляций по клеточным путям, но возникают трудности кодирования и декодирования независимых сигналов по ряду каналов.

Статистическая структура ЭЭГ-сигналов исследована нами при изучении временных параметров ЭЭГ человека в норме и покое на модернизированном анализаторе типа АИ-100-1 [1]. В этой работе показано, что клиппированные ЭЭГ-сигналы по своей статистической структуре резко отличаются от всех известных случайных процессов и представляют собой, по всей вероятности, сложную информационную функцию. Плотность распределения амплитуд неклиппированной ЭЭГ чрезвычайно близка к гауссовской, в то время как плотности временных интервалов клиппированного сигнала четко и стройно детерминированы. Средняя длительность «периода» ритма является функцией его порядкового номера. Эти и другие обнаруженные закономерности в структуре ЭЭГ-ритмов позволяют предположить, что спектр нулей ЭЭГ возникает раньше спектра амплитуд и последние формируются по какому-нибудь простому принципу, например, оптимальной полосе частот.

Для дальнейшего анализа сигналов ЭЭГ можно, по-видимому, исходить из следующих естественных предпосылок. Пусть имеется некоторая автономная система сигналов, роль которой, в частности, заключается в том, чтобы

а) дать возможность корреспонденту обнаружить заранее неизвестную частоту источника информации;

б) синхронизировать в известном смысле работу отдельных подсистем и органов системы;

в) непрерывно передавать по множеству каналов информацию по всем направлениям (аналог широко вещания) с помощью некоторого кода.

Проблема обнаружения источника информации, о статистических и семантических характеристиках которого заранее ничего не известно, рассмотрена в работе [2]. Предложенная фон-Хорнером система сигналов, служащая этой цели, поразительно сходна с системой клиппированных ЭЭГ-сигналов, хотя имеется и ряд существенных различий. Все же мимо этой удивительной аналогии пройти нельзя.

Второй вопрос, относящийся к синхронизации работы подсистем и органов системы, связан, очевидно, прямым образом с проблемой т. н. биологических часов. В последние годы мы стали свидетелями того, насколько плодотворной оказалась идея уплотнения каналов связи, на-

пример, в радиорелейных линиях. Вполне укладывается в это представление и наличие множества ритмов ЭЭГ, образующих параллельную и в то же время в каждом отведении последовательную систему передачи данных. Естественно предположить, что уплотнение каналов и функций в такой системе достигает высокого уровня. Мы лишь касаемся самых примитивных из них.

Наконец третий вопрос, касающийся кодовой структуры, т. е. семантических закономерностей ЭЭГ в широком смысле, изучен слабее всего. Любые мыслимые нарушения деятельности какой-либо одной из указанных сторон функционирования системы можно представить как патологию. Так, недостаточно четкое обнаружение и слежение за источником информации вызовет у корреспондента, возможно, такое же глубокое расстройство, как и отсутствие должной синхронизации или сбой в кодировании и декодировании. До сих пор изучались вопросы, связанные только с ритмикой и синхронизацией.

1. Обнаружение центральной частоты $f(0)$.

Предположим, имеется бесконечная система сигналов, средние частоты которых постоянны и определяются множеством

$0, \dots, \bar{f}_{-k}, \dots, \bar{f}_{-n-1}, \bar{f}_{-n}, \bar{f}_0, \bar{f}_{n-1}, \bar{f}_n, \dots, \bar{f}_k, \dots, \infty$,
причем

$$\bar{f}_{-n-1} < \bar{f}_{-n} < \bar{f}_{-n+1}, \bar{f}_{n-1} < \bar{f}_n < \bar{f}_{n+1}. \quad (1)$$

Примем, что функция $\bar{f}(n)$ монотонна, а, кроме того, обладает следующим свойством:

$$\bar{f}(n) \bar{f}(-n) = \bar{f}^2(0). \quad (2)$$

Если полосы частот $\Delta \bar{f}_n$ симметричны по отношению к средним частотам $\bar{f}_n$ и соприкасаются с полосами частот $\Delta \bar{f}_{n-1}$ и $\Delta \bar{f}_{n+1}$, но нигде не пересекают друг друга на интервале частот $(0, \infty)$, соответствующем интервалу порядковых номеров сигналов $(-\infty, +\infty)$, то ширина полосы $\Delta \bar{f}_n$ может быть выражена формулой

$$\Delta \bar{f}_n = 2\bar{f}(-n) - 4 \sum_{k=-\infty}^{-n-1} (-1)^{k+n-1} \bar{f}(k). \quad (3)$$

В частности, при $n = 0$ и $\bar{f}(0) = 1$ имеет

$$\Delta \bar{f}_0 = 2 - 4 \sum_{k=\infty}^{-1} (-1)^{k-1} \bar{f}(k). \quad (4)$$

Вводя условие симметрии системы в виде

$$\frac{\Delta \bar{f}_n}{\Delta \bar{f}_{-n}} = \frac{\bar{f}(n)}{\bar{f}(-n)}, \quad (5)$$

получим уравнение, содержащее неизвестную функцию

$$\bar{f}^2(n) \sum_{k=-\infty}^{-n-1} (-1)^k \bar{f}(k) - \sum_{k=-\infty}^{n-1} (-1)^k \bar{f}(k) = 0. \quad (6)$$

Из геометрических соображений следует, что предел отношения полосы частот к средней частоте ритма при стремлении номера ритма к бесконечности равен двум, т. е.

$$\lim_{n \rightarrow -\infty} \frac{\Delta \bar{f}(-n)}{\bar{f}(-n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta \bar{f}(n)}{\bar{f}(n)} = 2. \quad (7)$$

Кроме того, положим

$$\frac{\Delta \bar{f}(-n)}{\bar{f}(-n)} = F(-n), \quad \frac{\Delta \bar{f}(n)}{\bar{f}(n)} = F(n),$$

где

$$F(-n) = k(n) F(n). \quad (8)$$

Для обнаружения источника информации на частоте $f(0)$, содержание и статистические характеристики которого заранее неизвестны, необходимо, чтобы поиск велся хотя бы на двух скользящих частотах $f(-n)$ и $f(n)$. Соотношение между этими частотами определяется уравнением (6).

Кроме того необходимо выполнение следующей конъюнкции:

$$A_n A_{-n} = 1, \quad (9)$$

где A_n и A_{-n} — однотипная информация, принятая на частотах $f(n)$ и $f(-n)$. Понятие однотипности в данном случае распространяется как на семантику, так и на статистику, или на то и другое вместе. Разделение во времени может быть или отсутствовать. Содержание информации на частоте $f(0)$, естественно, может не зависеть от информации, передаваемой на частотах $f(n)$ и $f(-n)$. Это объясняется особым местом центрального источника в системе, а также и симметрией системы по отношению к центральной частоте $f(0)$. Одним из простых условий выполнения конъюнкции (9) может служить условие (5). На нем сконцентрировал свое внимание фон Хорнер в упомянутой выше работе. Правда, он говорил об абсолютной полосе частот, а выражение (2) определяет равенство относительных частот, что существенно облегчает обнаружение частоты $f(0)$.

В дальнейшем после установления частот $f(n)$ и $f(-n)$ слежение может вестись на частоте $f(0)$ согласно (2).

2. Биологические часы

Можно рассматривать ритмы ЭЭГ как ритмы в системе отсчета времени. Для вычисления приближенных значений всех возможных периодов (или частот) ЭЭГ-ритмов можно воспользоваться следующей эмпирической формулой (1):

$$\frac{f(n)}{f(0)} = e^{\frac{h \log e n}{2p}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad -12 < n < 12. \quad (10)$$

В таблице даны значения частот $f(n)$, $f(-n)$ и, где это удобно, величины соответствующих периодов. Если ограничиться продолжительностью жизни человека 200 лет, то максимальная длина полупериода должна быть равна также этой величине. Но тогда период окажется равным 400 годам. Исходя из этого получим, что ритмы, лежащие за пределами данной частоты, физиологического смысла не имеют. Таким образом, весь набор ритмов ЭЭГ не должен превосходить 22 (± 11 ритмов). Альфа-ритм является при этом 23-м. по счету и нулевым по порядку.

Относительная ширина полосы 11-го ритма, согласно (7) близка к двум октавам. Самые короткие подритмы этого ритма относятся к годовым ритмам, самые длинные выходят за пределы необходимых. Тот факт, что при этом в организме могут использоваться не все компоненты, не должен нас удивлять. Экспериментальные наблюдения над ритмами ЭЭГ (минутными и часовыми) показывают, что отдельные ритмы расщепляются, проявляют себя частично или временно совсем отсутствуют. Нарисованная выше картина ритмов является устойчивой только в статистическом плане.

При частотной интерпретации биологических ритмов функциональные ограничения на амплитуды отдельных ритмов или на их средние значения не накладываются.

Иное дело, если речь идет о длительности клиппированных сигналов. В этом случае амплитуда ритмов должна монотонно и весьма определенно расти с ростом периода. В противном случае *длительность вре-*

Таблица

СРЕДНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДЫ РИТМОВ
(Частота альфа-ритма принята равной 10 гц)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Примечание
Средняя частота, гц	12,5	16,3	23,4	39,6	87	250	1840	31700	$2,5 \times 10^8$	$4,75 \times 10^8$	$7,85 \times 10^{10}$	$8,1 \times 10^{10}$	Возрастающие частоты
Инфразвуковой диапазон								Ультра-звуковой	Короткие волны	Дециметровые волны	Миллиметровый диапазон	Свет	
	Экспериментально обнаружены						Требуется эксперимент						

№ п/п	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	Возрастающие периоды
Средний период, сек	0,125	0,163	0,234	0,396	0,87	2,51	18,4	317	$2,5 \times 10^4$	$4,75 \times 10^7$	$7,85 \times 10^{10}$	$8,1 \times 10^{10}$	
	Доли секунды						Секундный диапазон	Минутный ритм	8-часовой ритм	1,718 лет	2500 лет	Без физиологического смысла	
	Экспериментально обнаружены						Требуется эксперимент						

менных интервалов клипированного сигнала станет при некоторых условиях постоянной.

Имеется экспериментальное подтверждение того, что квадрат средней амплитуды альфа-ритма равен произведению квадратов амплитуд равностоящих ритмов [3]. Учитывая результаты работы [4], можно предположить, что средние значения амплитуд ритмов ЭЭГ изменяются в зависимости от порядкового номера ритма по закону

$$\frac{\overline{U}(n)}{\overline{U}(0)} = e^{\frac{Sh \cdot nM}{6k}}, \quad M = \log e = 0,434 \dots, \quad (11)$$

$$n = 1, 2, 3,$$

где k — коэффициент, величина которого лежит в пределах 0,8—1,2.

Известно, что переменные напряжения ЭЭГ наблюдаются на фоне постоянных напряжений, величина которых может превосходить амплитуду ЭЭГ-волн в 10 тысяч раз. Принимая среднее значение амплитуды альфа-ритма равным 10 мкв, находим, что при $k = 1$ значение амплитуды 11-го ритма будет равно 50 мв. Этот результат не противоречит наблюдениям.

Самые длинные периоды физиологических ритмов могут быть образованы из более коротких периодов с помощью простых схем, подобных триггерным и составленным из нейронов. Этому предположению противоречит, однако, тот факт, что по крайней мере, 11 ритмов ЭЭГ человека имеют некротные частоты и выглядят как статистически независимые колебательные процессы. Однако нельзя отрицать возможность отклонений от этого правила для самых низких периодов.

Известно, что электрические ритмы мозга синхронизируются с внешними световыми и звуковыми сигналами, а также под влиянием электрических и магнитных полей. В работе [5] показано, что ЭЭГ и ЭКГ человека в известной степени синхронизируются со звучащей музыкой. Особенно отчетливо эта синхронизация проявляется у любителей джазовой музыки. Не исключено, что наша любовь к музыке связана с механизмами синхронизации биологических процессов. Возможно, что «хорошая музыка» — это та, при которой мозг максимально разгружен от забот по синхронизации сложной системы. В другой работе сказано [6], что при воздействии на оба глаза прерывистым светом с некротными частотами происходят тяжелые нарушения в нервной системе.

Естественно предположить при этом нарушение синхронизации на ряде ритмов, расстройство биологических часов, сбой в коде, большие ошибки в системе слежения за частотой альфа-ритма. Все это в целом и приводит к гибели экспериментальных животных. Видимо, организм компенсирует помеху, если она одна. Но если в мозг проникают через каждый глаз в отдельности две независимые помехи, то компенсации не происходит.

В заключение следует вспомнить слова известного ученого А. С. Залманова [7]: «Бывают случаи — и они нередки — когда смерть больного не может быть объяснена ни развитием болезненных явлений, ни недостаточностью важнейших видов деятельности организма (дыхание, кровообращение, выделение), ни серьезными предсмертными осложнениями. Остается вероятной гипотеза: это нарушение синхронной эуритмии» (т. е. нормальной ритмики. — С. Л.).

Но не только синхронность частот (в статистическом плане) является необходимым условием нормальной деятельности организма. Существенным может оказаться также сдвиг фаз биологических ритмов. Так, сдвиг по фазе во времени, возникающий при перелете из Европы в Америку, требует большего приспособления, чем полет по меридиану. Считается, например, что совпадение во времени усиленной дея-

тельности желудка и печени приводит к гастриту и язве желудка. Все это указывает на необходимость изучения фазовых соотношений и в электроэнцефалограммах. Учитывая сложность организма, можно понять, что для синхронизации и управления множеством органов и функций требуется значительное количество различных частот. Многие из этих ритмов, вплоть до радиочастот, уже зарегистрированы. Отрицать возможность обнаружения ритмов на других частотах нельзя. Нужны тщательно поставленные эксперименты, специальная аппаратура.

3. Биологический код электроэнцефалограммы

Полимодальный характер плотности распределения «полупериодов» «периодов» и более длинных цепочек клиппированного сигнала ЭЭГ человека при открытых глазах указывает на возможность отнесения каждого из мод распределения к соответствующему разряду позиционного кода.

Характерным признаком, указывающим на то, что наблюдаемые сочетания разрядов кода отражают не случайное блуждание, а подчинены некоторому ограниченному числу правил, является последовательное изменение кривых распределения все более длинных цепочек из временных интервалов. Дискретный и стройный характер распределений для очень длинных цепочек служит убедительным доказательством существования кода в статистическом смысле.

Вычисление вероятностей перехода от одного разряда к другому показало, что наибольшую вероятность для наблюдаемых 11 разрядов имеет нулевой разряд (альфа-ритм). Вероятность перехода на нулевой разряд после любого из данных разрядов, является наибольшей в том случае, когда задержка не превышает нескольких единиц. Уже теперь можно сказать, что существуют блоки с длиной порядка секунд. Эти блоки скользят относительно друг друга. Нет сомнения, что перед нами чрезвычайно сложный код, который можно охарактеризовать как несистематический, т. е. с разным числом знаков в блоке; блоковый, так как существуют строго постоянные по длительности длинные группировки; неравномерный, так как число знаков в группе разное; рекуррентный, так как блоки имеют различную длительность и скользят относительно друг друга; неполный (большая избыточность по сравнению с языком); условно-двоичный для каждой из позиций.

В здоровом организме число разрядов кода не превышает повидимому, 44. Используя кодовые соотношения ЭЭГ-сигнала, можно значительно увеличивать чувствительность ЭЭГ-метода исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. К. Лисицын. Статистическая обработка инфразвуковых процессов на амплитудном дифференциальном анализаторе импульсов типа АИ-100-1. Автореф. канд. дисс., Харьков, ХИРЭ, 1966.
2. И. С. Шкловский. Вселенная, жизнь, разум, изд-во, «Наука», 1966.
3. А. Д. Лиман. О постоянстве соотношений средних амплитуд основных ритмов ЭЭГ человека. «Вопросы гигиены труда и профпатологии в химической и машиностроительной промышленности. Тезисы докладов», Харьков, 1966.
4. В. А. Ильенко. Частотные спектры ЭЭГ разных областей мозга человека. «Журнал высшей нервной деятельности им. Павлова», т. 15, вып. 5, 1965.
5. R. Frances. Rev. Laryngol., otol., rhinol., 1956, 77, Suppl. mai, 482—489 (фр.).
6. И. В. Данилов. Нарушение высшей нервной деятельности собак при асинхронном световом раздражении. «Журнал высшей нервной деятельности», т. 8, № 4 1958.
7. А. С. Залманов. Тайная мудрость человеческого организма (перев. с фр. под ред. акад. В. Н. Черниговского) изд-во «Наука», 1966.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА НЕЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ НА ВХОДЕ МОДЕЛИ АДАПТАЦИИ АХРОМАТИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

*Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, Е. П. Пуятин,
М. Ф. Бондаренко*

Экспериментальное исследование адаптации ахроматического зрения приводит к зависимости

$$B_2 = B_1^k B_0^{1-k}, \quad (1)$$

где B_1 — яркость, к которой орган зрения был длительно адаптирован; B_2 — яркость, которая скачкообразно сменяет яркость B_1 ; B_0 — яркость, которая при длительном воздействии на орган зрения порождает то же ощущение, что и яркость B_2 в первый момент ее действия [1].

Введем в рассмотрение обобщенную модель адаптации ахроматического зрения в виде следующих равенств:

$$U = f(B), \quad (2)$$

$$V(t) = U(t) - \lambda \int_{-\infty}^t U(\tau) G(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

$$S = \varphi(V), \quad (4)$$

где B — яркость; S — светлота; U , V — промежуточные сигналы адаптационного преобразования; f — взаимнооднозначная функция, определенная для всех $B > 0$ и непрерывная, по крайней мере, в одной точке; φ — взаимнооднозначная функция; G — функция Грина [2], для которой

$$\int_0^{\infty} G(\tau) d\tau = 1;$$

λ — некоторое вещественное число.

Частный случай обобщенной модели адаптации ахроматического зрения был предложен в работе [3].

В настоящей работе доказывается, что функция f обобщенной модели имеет вид

$$U = c \lg dB, \quad (5)$$

где c , d — вещественные числа, и что число λ равно

$$\lambda = k. \quad (6)$$

Подадим на вход модели скачкообразно меняющуюся яркость $B(t)$, равную

$$B(t) = \begin{cases} B_1 & \text{при } t < 0, \\ B_2 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Значения сигналов модели $U_1 = U(-0)$, $U_2 = U(+0)$, $V_2 = V(+0)$, $S_2 = S(+0)$ равны

$$\begin{aligned} U_1 &= f(B_1), \quad V_2 = U_2 - \lambda U_1, \\ U_2 &= f(B_2), \quad S_2 = \varphi(V_2). \end{aligned}$$

Подавая на вход модели постоянную яркость $B(t) = B_0$, определим значения сигналов модели $U(t) = U_0$, $V(t) = V_0$, $S(t) = S_0$:

$$\begin{aligned} U_0 &= f(B_0), \\ V_0 &= (1 - \lambda) U_0, \quad S_0 = \varphi(V_0). \end{aligned}$$

Пусть $S_0 = S_2$; тогда в силу взаимной однозначности функции φ имеем

$$V_0 = V_2;$$

следовательно,

$$f(B_2) = \lambda f(B_1) + (1 - \lambda) f(B_0). \quad (7)$$

Наша дальнейшая задача будет состоять в том, чтобы, используя формулу (1), решить функциональное уравнение (7) и установить общий вид функции f .

Введем функцию Θ равенством

$$\theta(x) = f(10^x) - f(1). \quad (8)$$

Заметим, что

$$\theta(0) = 0. \quad (9)$$

Запишем равенство (7) в виде

$$\theta(\lg B_2) = \lambda \theta(\lg B_1) + (1 - \lambda) \theta(\lg B_0).$$

Заменяя B_2 согласно (1) и вводя новые обозначения

$$x_0 = (1 - k) \lg B_0, \quad x_1 = k \lg B_1,$$

имеем

$$\theta(x_1 + x_0) = \lambda \theta\left(\frac{x_1}{k}\right) + (1 - \lambda) \theta\left(\frac{x_0}{1 - k}\right).$$

Учитывая (9), получим

$$\text{при } x_0 = 0 \quad \lambda \theta\left(\frac{x_1}{k}\right) = \theta(x_1), \quad (10)$$

$$\text{при } x_1 = 0 \quad (1 - \lambda) \theta\left(\frac{x_0}{1 - k}\right) = \theta(x_0).$$

Таким образом,

$$\theta(x_1 + x_0) = \theta(x_1) + \theta(x_0),$$

т. е. функция Θ аддитивна.

Кроме того, в силу (8) функция Θ непрерывна, по крайней мере, в одной точке. Следовательно [4], функция Θ имеет вид:

$$\theta(x) = cx, \quad (11)$$

где c — вещественное число, не равное нулю.

Воспользовавшись формулой (8), находим

$$f(B) = c \lg B + f(1).$$

Полагая $f(1) = c \lg d$, приходим к формуле (5).

Справедливость равенства (6) вытекает из соотношений (10), (11).

Заметим, что из равенств (2) — (6) вытекает зависимость (1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушваренко, Н. Я. Какурин, Е. П. Пуятин. Модель статики адаптации зрения человека. Сб. «Научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, секция бионики. Тезисы докладов», изд. ИТОР и Э, Харьков, 1966.
2. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. Уравнения математической физики Гостехтеоретиздат, М., 1953.
3. Ю. П. Шабанов-Кушваренко. О моделировании преобразования яркости в светлоту. Сб. «Пятое совещание по физиологической оптике. Тезисы докладов», Изд-во АН СССР, М. — Л., 1966.
4. Л. А. Люстерник, В. И. Соболев. Элементы функционального анализа, изд-во «Наука», М., 1965.

ОШИБКИ В ОПОЗНАНИИ РАЗНООРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕСТОВ

Т. Я. Штейншайдер

Зрительный анализатор человека является весьма совершенной информационной системой, поэтому изучение характера ошибок, встречающихся при решении зрительных задач, не только представляет интерес для физиологии зрения, но и может дать важные отправные идеи для разработки распознающих технических систем. Нами изучались количество и характер ошибок при различных условиях опознавания разноориентированных колец Ландольта.

Опыты проводились на тесте Крживоглава [1], состоящем из 49 колец Ландольта, расположенных квадратом 7×7 (рис. 1). От аналогичных тестов других авторов — Вестона [2], Шека М. [3] — тест Крживоглава отличается точно разработанными параметрами. Угловой размер кольца Ландольта в использованном нами тесте был равен 7, контраст кольца с фоном 0,7, освещенность 300 лк. Кольца имели восемь положений разрыва, при наличии 49 колец условная информационная емкость таблицы составляла 147 бит.

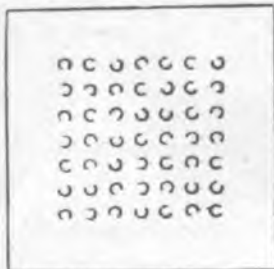


Рис. 1. Тест Я. Крживоглава.

Чтобы наблюдатель не мог запомнить последовательности расположения колец, тестовую таблицу ставили в одно из четырех положений.

В опытах участвовало семь человек с нормальным зрением, прошедших предварительную тренировку. Наблюдатели были разделены на две группы: четыре человека называли положение разрыва кольца цифрами часового циферблата (часовой код), три — предварительно выученными номерами (цифровой код). Четверо наблюдателей — трое по часовому коду и один по цифровому — работали в удобном им темпе. Три других наблюдателя работали и в удобном для них темпе, и в принудительном. Принудительный ритм работы задавался ударами метронома, частота которых повышалась от опыта к опыту. Это обуславливало не только принудительный ритм, но и повышенный темп работы. При обработке данных учитывались ошибки в определении положения разрыва кольца, включая и ошибки, замеченные наблюдателем.

Всего проведено 1127 опытов, опознано более 552 000 колец.

Число ошибок при опознании тестовых колец в зависимости от условий наблюдения представлено в табл. 1.

Из таблицы видно, что при свободном темпе работы число ошибок не превышало 0,0054 от числа предъявленных тестов. Переход к принудительному темпу работы увеличивал число ошибок до 0,022—0,044. Это указывает на связь темпа работы с количеством ошибок, ибо при работе в принудительном темпе число ошибок увеличивается примерно на порядок.

Заметим, что наблюдатели, делавшие 2—4% ошибок, при принудительном темпе работы не сделали ни одной ошибки при предъявлении им 1000 тестов, когда время опознавания не ограничивалось.

Таблица 1

Темп работы	Код	Наблюдатель	Число предъявлений теста	Число ошибок	Частость ошибок
Свободный	Часовой	М-ч	11025	38	0,0034
	»	Ц-а	11025	32	0,0029
	»	М-к	11025	20	0,0018
	Цифровой	Е-в	14700	80	0,0054
Принудительный	Часовой	Б-а	2500	56	0,022
	Цифровой	Г-я	2500	91	0,036
	»	Ш-д	2500	111	0,044

Из табл. 1 видно также, что у работавших по часовому коду число ошибок было примерно в два раза меньше, чем у работавших по цифровому коду. Используя код, более привычный наблюдателю, можно также добиться сокращения числа ошибок.

Ошибки наблюдателей при опознании тестов отчетливо разделялись на три типа: ошибки, получающиеся зеркальным отражением теста относительно вертикальной оси, относительно горизонтальной оси и остальные ошибки. Соотношение этих типов ошибок представлено в табл. 2.

Таблица 2

Темп работы	Код работы	Общее число ошибок		Ошибки									Наблюдатель
				Отражение от вертикальной оси			Отражение от горизонтальной оси			Остальные			
				Число ошибок	Доля от		Число ошибок	Доля от		Число ошибок	Доля от		
общего числа ошибок	числа предъявлений	общего числа ошибок	числа предъявлений		общего числа ошибок	числа предъявлений							
свободный	Часовой	38	36	0,95	0,0032	—	—	—	2	0,05	0,0002	М-ч	
	»	32	31	0,97	0,0027	1	0,03	0,0002	—	—	—	Ц-а	
	»	20	18	0,90	0,0016	2	0,10	0,0002	—	—	—	М-к	
	Цифровой	80	56	0,70	0,0038	21	0,26	0,0014	3	0,04	0,0002	Е-в	
принудительный	Часовой	56	47	0,84	0,018	2	0,04	0,0008	7	0,12	0,003	Б-а	
	Цифровой	91	61	0,67	0,024	8	0,09	0,003	22	0,24	0,009	Г-я	
	»	111	85	0,77	0,034	12	0,11	0,004	14	0,12	0,006	Ш-д	

Данные этой таблицы показывают, что ошибки, отнесенные к графе «остальные», при свободном темпе работы составляют в среднем менее 1% общего числа ошибок, т. е. менее 0,00005 числа предъявленных колец. Количество ошибок в этом случае столь незначительно, что классифицировать их невозможно. При переходе к принудительному темпу работы число ошибок, когда названное кольцо не является зеркальным отра-

жением тестового относительно вертикальной или горизонтальной оси, резко возрастает и составляет в среднем 16% — общего числа ошибок или 0,007 — числа предъявленных тестов.

Две трети ошибок при принудительном темпе работы, отнесенных к графе «остальные» в табл. 2, состоят в том, что наблюдатель путал тест с таким, у которого положение разрыва отличалось на 45° .

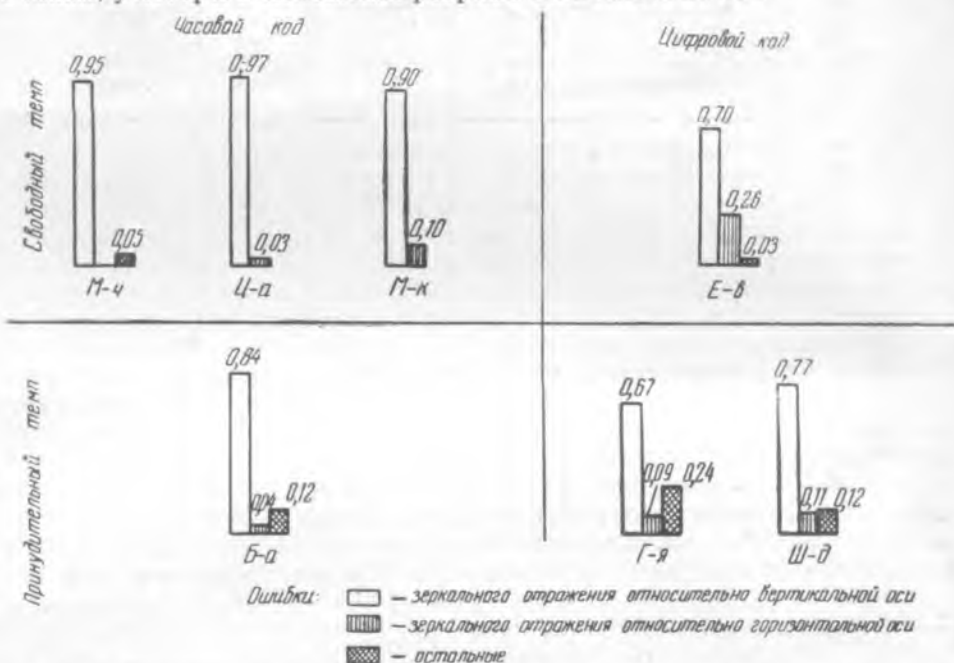


Рис. 2. Соотношение числа различных ошибок при опознании тестовых колец в зависимости от условий наблюдения.

Вероятность ошибки, когда наблюдатель путает тест с его зеркальным отображением относительно горизонтальной оси, заметно зависит от кода. Из рис. 2 видно, что при работе по часовому коду число таких ошибок составляет 4% общего их числа, а при работе по цифровому коду — около 15%. Однако полностью такие ошибки не исключаются ни при одном из исследовавшихся нами условий.

Наиболее часты ошибки (0,91 от общего числа ошибок при часовом коде и 0,71 при цифровом), когда наблюдатель называет вместо теста его зеркальное отображение относительно вертикальной оси.

Столь явная зависимость числа ошибок от ориентации теста по отношению к двум взаимно перпендикулярным осям и четко выраженный максимум числа ошибок, получающихся зеркальным отражением относительно вертикальной оси, свидетельствуют о некоторых особенностях зрительного анализатора, выработавшихся в процессе эволюции. Значительное число предметов окружающего мира и все наземные животные имеют вертикальную плоскость симметрии. Поэтому процесс опознавания может быть ускорен, если вместо осмотра правой и левой половин изображения экстраполировать любую из них отражением относительно вертикальной оси. Разумеется, ускорение опознавания достигается ценой ухудшения дифференцировки правой и левой ориентаций. Можно предположить, что ошибки такого рода редко имеют жизненно важное значение, и, следовательно, такая особенность зрительного восприя-

тия биологически целесообразна. Напротив, симметрия относительно горизонтальной плоскости встречается редко, и дифференцировка ориентаций вверх и вниз, по-видимому, имеет большее значение.

Сказанное подтверждается результатами сравнительно-физиологических исследований Н. В. Праздниковой [4] на собаках. Ею показано, что собаки почти всегда реагируют на стимул, повернутый относительно вертикальной оси, и очень редко на тот же стимул, повернутый относительно горизонтальной оси. Неравнозначность поворота относительно вертикальной и горизонтальной оси отмечена А. А. Невской [5] в опытах на людях. При повороте изображений геометрических фигур относительно вертикальной оси наблюдатель называл их так же, и только после значительного увеличения времени предъявления замечал различие. Поворот тех же фигур относительно горизонтальной оси не только резко увеличивал время опознавания, но и приводил к ошибкам в определении.

Проведенные исследования позволяют сделать следующее заключение.

При создании распознающих технических систем, в том числе самообучающихся, важно учитывать свойство зрительного анализатора в какой-то мере игнорировать различие изображений, получаемых одно из другого зеркальным отображением относительно некоторых осей. Сравнительная значимость и направления этих осей выявляются в процессе обучения.

Естественно, что адаптация такого типа ускоряет опознавание, но за это приходится расплачиваться увеличением вероятности ошибки в тех случаях, когда зеркальные отображения нужно отличать одно от другого.

Выбор числа осей и вероятностей отождествления зеркальных отображений определяется характером и статистикой зрительных задач и в каждом конкретном случае реализуется как решение задачи оптимизации.

Автор благодарит В. К. Кагана за подробное обсуждение рукописи статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Крживоголав. Методы измерения скорости переноса информации при различении зрительных сигналов. «Вопросы психологии», 1966, № 2.
2. Х. Вестон. Цит. по Г. Хартриджу. Современные успехи физиологии зрения. Изд-во иностр. лит., 1952.
3. М. П. Шек. Потери информации в зрительном анализаторе в зависимости от характера утомления. «Вопросы психологии», 1963, № 1.
4. Н. В. Праздникова. Исследование инвариантности опознавания зрительных изображений у собак. Сб. «Механизмы опознавания зрительных образов», изд-во «Наука», Л., 1967.
5. А. А. Невская. Исследование инвариантности зрительного опознавания у человека. Сб. «Механизмы кодирования зрительной информации», изд-во «Наука», М.—Л., 1966.

РЕФЕРАТЫ

УДК 62.506.2.

Принципы оптимального приема информации в зрительной системе человека. Каган В. К., Штейншнайдер Т. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 3-12.

По мнению авторов, зрительный анализатор человека реализует наиболее целесообразные принципы приема информации и алгоритмы ее переработки. В работе обсуждается вопрос, в каком смысле зрительный анализатор представляет собой оптимальную систему, иными словами, почему он реализует именно один, а не другие алгоритмы. Рисунков 7, библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2.

О применении характеристик типа относительной спектральной чувствительности к описанию нелинейных систем. Каган В. К. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 13—17.

В статье рассматривается применение относительной спектральной чувствительности к характеристике сложных нелинейных систем, основанная на повсеместном применении относительной спектральной чувствительности к описанию свойств линейных систем.

Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2.

Алгоритм поиска объектов, заданных полным набором признаков. Ловицкий В. А. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 18—24.

Изучается алгоритм поиска информации человеком. На основании анализа результатов психологического эксперимента, раскрывающего особенности поиска информации человеком, составляется алгоритм поиска слов в древовидном словаре. Алгоритм описан на языке ассоциативного программирования. Приводятся результаты испытания алгоритма на ЭЦВМ «Урал-2».

Рисунков 1, таблиц 1, библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2.

О ценности информации. Ловицкий В. А. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 25—30.

Изучается возможность оценивать входную информацию некоторой системой, получившей некоторый определенный объем «знаний» в результате обучения.

На конкретном примере рассматривается такая система и приводится оценка ее входных последовательностей. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что возможности системы по оценке предъявляемых ей последовательностей определяются обучением.

Рисунков 2, таблиц 4, библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2.

Некоторые обобщения математической модели зрения. Грушко Г. С. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 31—32.

В статье предлагается обобщенная математическая модель зрения, описываемая системой линейных неоднородных уравнений.

Библиографических ссылок 1.

УДК 62.506.2.

Избыточность и пропускная способность памяти. Невельский П. Б., Фланчик В. Л. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 33—35.

Экспериментально показано положительное влияние избыточности запоминаемого материала на память человека. Предполагается, что эта особенность человеческой памяти может быть использована при бионическом моделировании и создании запоминающих устройств.

Таблиц 2, библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2.

Обобщенная модель возбуждения в нервных и мышечных элементах. Бугай Ю. П., Червов В. Г., Нефедов Ю. И., «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 36—48.

В работе описана функциональная и структурная схема аналоговой модели, выполненной на стандартных блоках. Описаны переходные и установившиеся режимы модели для различных входных возмущений, соответствующих скачкообразному и ритмическому раздражению возбудимых элементов. Показана роль адаптации и аккомодации при подпороговых и надпороговых процессах в развитии местного и распространяющегося возбуждения. Обсуждается возможность использования устройств, подобных рассматриваемой модели при построении технических нейроподобных элементов.

Рисунков 11, библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2.

Моделирование электротонических изменений возбудимости при подпороговых раздражителях. Бугай Ю. П., Червов В. Г. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 49—58.

В работе рассмотрена математическая модель процессов суммирования следовых поляризационных изменений при ритмическом раздражении адаптирующихся и неадаптирующихся нервных и мышечных элементов. Описаны электротонические изменения возбудимости для импульсных и скачкообразных возмущений. Показан характер изменения порога возбудимости при длительном раздражении постоянной силой, необходимой для выполнения закона Вебера.

Рисунков 4, библиографических ссылок 1.

УДК 62.506.2.

К вопросу о вибрационной чувствительности кожи человека. Мурашко А. Г., Тищенко В. В. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 59—61.

Рассмотрена в широком аспекте биологическая модель вибрационного анализатора. Рекомендован метод построения математической модели вибрационного анализатора, предложены законы, которые являются основанием для исследования.

Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2.

Исследование психофизиологических особенностей оператора. Утеуш Э. В. «Проблемы бионики» вып. 2, 1969, стр. 62—67.

Изучение человека как звена кибернетической системы «человек и автомат» связывается с изучением его памяти. Предлагается учитывать интегральный критерий, характеризующий процессы памяти. Использование взаимно корреляционных функций позволит судить о различных рассогласованиях во времени Δt , характеризующих индивидуальные особенности.

Рисунков 8, библиографических ссылок 17.

УДК 62. 506. 2

Регистровая структура как модель памяти и ее роль в процессах восприятия. Утеуш Э. В. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 68—81.

Рассматриваются вопросы моделирования биологической памяти. Кибернетический подход позволил автору обосновать регистровую структуру памяти. Регистр является наиболее общей моделью, в которой отражены процессы приема, хранения и выдачи слов. Модель объясняет некоторые особенности регуляторных физиологических функций. Рассматривается модель для обоснования процессов восприятия и установления понятия о длине слова памяти, равного длине регистра.

Рисунков 5, библиографических ссылок 17.

УДК 62. 506. 2

Об одном перспективном направлении в вычислительной технике. Белявский В. П., Василенко Ю. А., Какурин Н. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 82—87.

В статье рассматриваются преимущества пороговых элементов, которые являются технической реализацией математических моделей биологических нейронов, перед обычными логическими элементами «И», «ИЛИ», «НЕ» современных цифровых вычислительных машин.

Рассмотрены кратко этапы развития структур пороговых элементов. Показаны перспективы их применения для создания новых устройств в дискретной технике.

Библиографических ссылок 13.

УДК 62. 506. 2

Анализ поведения формального нейрона. Василенко Ю. А., Белявский В. П., Какурин Н. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 88—91.

В статье рассматривается модель формального нейрона (ФН) в смысле Мак-Класки, в которую введены запрещающие волокна типа «запрет запрета». Введено понятие «глубины запрета», т. е. показано, что ФН Мак-Класки является частным случаем рассматриваемой модели с глубиной запрета, равной 1.

Дан алгоритм анализа ФН, сущность которого заключается в преобразовании ФН к соответствующему пороговому элементу (ПЭ), анализ полученного ПЭ и обратное преобразование ПЭ в ФН. Дан пример ФН. Метод может быть легко реализован на ЦВМ.

Рисунков 1, библиографических ссылок 5.

УДК 62. 506. 2

О технической реализации алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека. Мурашко А. Г. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 92—101.

В работе рассмотрена возможность технической реализации математической модели обработки информации в глазу человека в целом — построение искусственной системы, которая должна облегчить проведение дальнейших исследований с целью выяснения алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека.

Рисунков 5.

УДК 62. 506. 2

Математическое моделирование константности восприятия величины объекта. Белик Я. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 102—106.

В статье рассматривается математическая модель константности восприятия величины объекта, которая необходима для правильной ориентации человека в ближнем пространстве. В исследовании применен метод математического моделирования формирующихся функциональных систем. Полученные результаты являются исходным пунктом для построения систем моделей, знание которых даст возможность управлять зрительным восприятием человека.

Библиографических ссылок 4.

УДК 62. 506. 2

Математическое моделирование функциональных систем оценки удаленности по видимой величине ориентира, ее градиенту и видимой скорости. Белик Я. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 107—110.

В статье рассматриваются математические модели восприятия оператором удаленности летательного аппарата от поверхности по видимой величине ориентира, ее гра-

денту и видимой скорости. В исследовании применен метод математического моделирования формирующихся функциональных систем. Полученные результаты являются исходным пунктом для построения систем моделей, знание которых даст возможность управлять зрительным восприятием оператора.

Рисунков 1, библиографических ссылок 1.

УДК 62. 506. 2

Электронная модель распознавания цветов органом зрения человека. Пчелинов В. П., Путятин Е. П. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 111—116.

Рассмотрена функциональная схема электронной модели для распознавания 560 цветовых оттенков. Указаны пути увеличения числа распознаваемых цветовых оттенков и способы увеличения точности распознавания.

Рисунков 2, библиографических ссылок 4.

УДК 62. 506. 2

К вопросу моделирования явлений краевого контраста. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Сердюченко В. Я. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 117—125.

В настоящей работе предлагается математическая модель обработки зрительной информации, лежащей в основе явления краевого контраста.

Рисунков 8, библиографических ссылок 2.

УДК 62. 506. 2

Некоторые результаты экспериментального исследования модели построения планов двигательного поведения. Касаткина Л. М. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 126—130.

В работе описана модель построения планов двигательного поведения. Приводятся результаты экспериментов с ней. Показана возможность моделирования влияния типологических особенностей характера человека на выработку планов поведения.

Рисунков 5, библиографических ссылок 3.

УДК 62. 506. 2

Новый подход к анализу электроэнцефалограмм. Лисицын С. К. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 131—137.

В работе описываются результаты исследования электроэнцефалограмм. Предполагается, что роль ЭЭГ сигналов заключается в том, чтобы обнаружить неизвестную частоту источника информации, синхронизировать работу нейросетей, передавать информацию по нейросетям.

Таблиц 1, библиографических ссылок 7.

УДК 62. 506. 2

Определение вида нелинейной функции на входе модели адаптации ахроматического зрения. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Путятин Е. П., Бондаренко М. Ф. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 138—140.

В работе доказывается, что функция f обобщенной модели адаптации ахроматического зрения имеет вид $U = C \lg dB$, где B — яркость; U — промежуточный сигнал адаптационного преобразования; C , d — вещественные числа.

Библиографических ссылок 4.

УДК 62. 506. 2

Ошибки в опознании разноориентированных тестов. Т. Я. Штейншнайдер. «Проблемы бионики», вып. 2, 1969, стр. 141.

Описываются результаты изучения количества и характера ошибок, встречающихся при решении человеком таких зрительных задач, как опознавание разноориентированных колец Ландольта.

Рисунков 2, таблиц 2, библиографических ссылок 5.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
В. К. Каган, Т. Я. Штейншнайдер. Принципы оптимального приема информации в зрительной системе человека	3
В. К. Каган. О применении характеристик типа относительной спектральной чувствительности к описанию нелинейных систем	13
В. А. Ловицкий. Алгоритм поиска объектов, заданных полным набором признаков	18
В. А. Ловицкий. О ценности информации	25
Г. С. Грушко. Некоторые обобщения математической модели зрения	31
П. Б. Невельский, В. Л. Фланчик. Избыточность и пропускная способность памяти	33
Ю. П. Бугай, В. Г. Червов, Ю. И. Нефедов. Обобщенная модель возбуждения в нервных и мышечных элементах	36
Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Моделирование электротонических изменений возбудимости при подпороговых раздражителях	49
А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко. К вопросу о вибрационной чувствительности кожи человека	59
Э. В. Утеуш. Исследование психофизиологических особенностей оператора	62
Э. В. Утеуш. Регистровая структура как модель памяти и ее роль в процессах восприятия	68
В. П. Белявский, Ю. А. Василенко, Н. Я. Какурин. Об одном перспективном направлении в вычислительной технике	82
Ю. А. Василенко, В. П. Белявский, Н. Я. Какурин. Анализ поведения формального нейрона	88
А. Г. Мурашко. О технической реализации алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека	92
Я. Я. Белик. Математическое моделирование константности восприятия величины объекта	102
Я. Я. Белик. Математическое моделирование функциональных систем оценки удаленности по видимой величине ориентира, ее градиенту и видимой скорости	107
В. П. Пчелинов, Е. П. Путятин. Электронная модель распознавания цветов органом зрения человека	111
Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, В. Я. Сердюченко. К вопросу моделирования явлений краевого контраста	117
Л. М. Касаткина. Некоторые результаты экспериментального исследования модели построения планов двигательного поведения	126
С. К. Лисицын. Новый подход к анализу электроэнцефалограмм	131
Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, Е. П. Путятин, М. Ф. Бондаренко. Определение вида нелинейной функции на входе модели адаптации ахроматического зрения	137
Т. Я. Штейншнайдер. Ошибки в опознании разноориентированных жестов	140