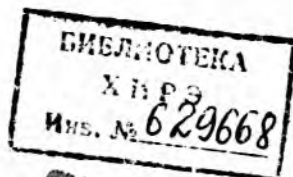


ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский
межведомственный
тематический
научно-технический
сборник

ВЫПУСК 17



2571

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ВИЩА ШКОЛА»
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
Харьков — 1976

Сборник подготовлен редакционной коллегией при Харьковском институте радиоэлектроники.

Редакционная коллегия:

Н. М. Амосов, Ю. П. Бугай (отв. секр.), А. А. Волков, В. А. Грабина, А. В. Дабагян, К. А. Иванов-Муромский, А. Г. Мурашко, Е. П. Пулятин, В. Г. Червов (зам. отв. ред.), Ю. П. Шабанов-Кушнаренко (отв. ред.).

Адрес редакционной коллегии:

Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники. Тел. 40-96-45.

Проблемы бионики. Респ. межвед. темат. науч.-техн. сборник. Вып. 17. X., «Вища школа», Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. 140 с. Списки лит. в конце статей.

Сборник посвящен вопросам построения бионических систем отображения, имеющих начальную организацию, вопросам формализации и экспликации понятий естественного языка. Рассмотрены оптические и электронные модели отдельных структур анализаторов нервной системы, описана модель кратковременной памяти на электрохемилюминесцентных элементах. Даны результаты теоретического исследования случайных временных функций, к которым относится подавляющее большинство биоэлектрограмм.

Предназначен для научных работников, специалистов в области кибернетики, вычислительной техники, биологии и медицины.

П $\frac{30\ 501 - 393}{M\ 226(04) - 76}$ 456 — 76

Редакция естественнонаучной литературы
И. о. зав. редакцией *Н. Н. Сорокун*

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р. техн. наук, *В. Я. СЕРДЮЧЕНКО*,
канд. техн. наук, *В. А. ГРАБИНА*, канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ЦВЕТОВОГО КонтРАСТА

Явление индуктивного цветового контраста зрения человека заключается в изменении цвета некоторого участка изображения под воздействием окружающего фона. Это явление существенно влияет на восприятие всей зрительной картины. Закономерности функционирования зрительной системы при индуктивном цветовом контрасте можно использовать в цветном телевидении, кинотехнике, полиграфии, при разработке приборов, воспринимающих цветные точки в различных условиях освещения (например, в системах ориентации) и т. д.

Это свойство зрения описано многими исследователями [1—4]. Большое число экспериментальных данных позволило заключить, что цвет тестового поля «сдвигается» под влиянием фона в сторону цвета, дополнительного к цвету фона. Однако более точные опыты показали, что цвет, индуктированный фоном, отличается от дополнительного по цветовому тону на 10—40 мкм в сторону меньших длин волн для синих и в сторону больших — для голубых и желто-оранжевых излучений.

Эффект цветовой индукции зависит от многих факторов: насыщенности фона, его размеров, яркости, длины волны, излучения, адекватных раздражителей и т. д. Был разработан ряд математических моделей, описывающих влияние отдельных факторов на изменение цвета тестового поля [5—8]. Анализ этих моделей показывает, с одной стороны, сложность процессов, лежащих в основе явлений цветовой индукции, с другой — необходимость их дальнейшего изучения для выяснения законов функционирования отдельных механизмов органа зрения и установления некоторых более общих закономерностей, связанных с различными индуктивными взаимодействиями в организме человека.

В настоящей работе ставится задача построить математическую модель цветовой индукции зрения на основе анализа по нульметоду психофизических реакций зрительной системы человека. Для этого применяется дедуктивный метод: вначале формулируются требования, которым должна удовлетворять функция, осуществляющая преобразование зрительных картин в зрительные ощущения. Эти требования представляют собой математические утверждения (аксиомы), справедливость которых установлена в экспе-

рименте. Затем, основываясь исключительно на этих аксиомах, определяется искомый вид функции.

В работе [9, с. 40] изложена методика построения модели исследуемого свойства зрения, согласно которой испытуемый рассматривается как система, реализующая функцию

$$y = \Phi(B_1, B_2), \quad (1)$$

где B_1, B_2 — входные сигналы органа зрения, представляющие собой распределение спектра излучения в каждой точке поля зрения $B = B(\lambda, x, y)$; λ — длина волны световых колебаний; x, y — координаты поля зрения. Совокупность функций $B(\lambda, x, y)$ образует множество M ; y — ответы испытуемого («0» или «1») после сравнения по некоторому признаку двух зрительных картин B_1 и B_2 .

Функция Φ может быть представлена в виде

$$y = \Phi(B_1, B_2) = I[F(B_1), F(B_2)], \quad (2)$$

если она обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности:

а) $\Phi(B, B) = 1$ (рефлексивность);

б) если $\Phi(B_1, B_2) = 1$, то $\Phi(B_2, B_1) = 1$
(симметричность); (3)

в) если $\Phi(B_1, B_2) = 1$ и $\Phi(B_2, B_3) = 1$, то $\Phi(B_1, B_3) = 1$
(транзитивность).

Здесь F — функция, вид которой будет определен в дальнейшем; I — функция сравнения, определяемая условиями

$$I(S_1, S_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } S_1 = S_2, \\ 0, & \text{если } S_2 \neq S_1, \end{cases} \quad (4)$$

где $S_1 = F(B_1)$; $S_2 = F(B_2)$.

При исследовании индуктивных свойств зрения условия (3) интерпретируются следующим образом. Представим себе экспериментальную ситуацию, когда испытуемому предъявляются два поля сравнения, на одном из которых сформирована зрительная картина $B_1(\lambda, x, y)$, на другом — $B_2(\lambda, x, y)$. Выберем на каждой из них произвольную точку с координатами (x_0, y_0) и предложим испытуемому сравнить цвета этих точек (на полное колориметрическое равенство). При равенстве цветов следует ответить «да», при неравенстве — ответ «нет». Условимся факт равенства цветов обозначать выражением $\Phi(B_1, B_2) = 1$.

Тогда первое из условий (3) означает, что при сравнении двух одинаковых зрительных картин наблюдатель должен ответить «да». Второе из условий (3) означает, что если имеется равенство цветов в точке (x_0, y_0) зрительных картин, сформированных на полях сравнения, то это равенство не нарушится при смене полей сравнения местами. Третье из условий (3) можно рассматривать как равенство цветов в выбранной точке зрительных картин, характеризуемых функциями B_1 и B_3 , если при сравнении каждой из них с картиной B_2 в той же точке такое равенство имеет место.

Проведенные опыты показали, что испытуемый демонстрирует в эксперименте поведение, подчиняющееся условиям (3), а это означает, что оно может быть математически описано в виде формул (2), (4). Из свойств рефлексивности, симметричности и транзитивности следует, что преобразование Φ разбивает множество входных сигналов на попарно непересекающиеся классы [10, с. 16]. Отсюда следует существование функции F , преобразующей функцию B в некоторую функцию S [9, с. 40].

Задача исследования цветовой индукции состоит в определении общего вида функции F , описывающей преобразование зрительной картины в зрительное ощущение, осуществляемое в органе зрения человека, т. е. $S = F(B)$.

Покажем, что в качестве F при определенных условиях работы органа зрения может быть принят линейный оператор. В работе [11, с. 16] приведены две системы свойств преобразования F , выполнение каждой из которых является необходимым и достаточным условием для возможности описания F в виде линейного оператора. Одна из этих систем может быть применена для решения задачи цветовой индукции.

С этой целью воспользуемся тремя аксиомами, характеризующими свойство индуктивного цветового контраста.

Аксиома аддитивности. Если $\Phi(B_1^*, B_1^*) = 1$ и $\Phi(B_2^*, B_2^*) = 1$, то $\Phi(B_1^* + B_2^*, B_1^* + B_2^*) = 1$. (5)

Эта аксиома может быть продемонстрирована в эксперименте следующим образом. Возьмем одну пару зрительных картин $B_1^*(\lambda, x, y)$ и $B_1^*(\lambda, x, y)$. Сравним цвета (на полное колориметрическое равенство) в произвольно выбранных точках с координатами x_0, y_0 . При неравенстве цветов изменяем зрительные картины (одну или обе сразу) до тех пор, пока цвета в точках (x_0, y_0) не сравняются. Затем возьмем еще одну пару зрительных картин $B_2^*(\lambda, x, y)$ и $B_2^*(\lambda, x, y)$ и для них добьемся равенства цветов в тех же точках (хотя цвет точек в этом опыте может отличаться от цвета точек в предыдущем опыте). Теперь, сложив попарно зрительные картины $B_1^* + B_2^*$ и $B_1^* + B_2^*$, получим две новые картины и будем сравнивать цвета в выбранных точках (x_0, y_0) .

Проведенные эксперименты показывают, что цвета в этих точках одинаковы (без дополнительного изменения зрительных картин после суммирования), что подтверждает достоверность аксиомы аддитивности.

Обозначим через K совокупность всех элементов $B(\lambda, x, y) \in L_2$, допускающих представление $B'(\lambda, x, y) = \mu B(\lambda, x, y)$, где $\mu \geq 0$ и $B(\lambda, x, y) \in M$. Опыты также показывают, что реакции испытуемого подчинятся еще одной закономерности.

Аксиома размерности. Существует набор функций $\{e_k\}$, $e_k = B_k^* - B_k^*$, $B_k^*, B_k^* \in K$, $k = 1, 2, 3$, такой, что для всякой функции найдется единственная совокупность чисел α_k , $k = 1, 2, 3$, удовлетворяющая условиям

$$\Phi(B, \sum_k \alpha_k e_k) = 1. \quad (6)$$

Эта аксиома в эксперименте может быть продемонстрирована следующим образом. Сформируем на одном поле сравнения произвольную зрительную картину. Кроме того, на полях сравнения предъявим зрительные картины, описываемые функцией $\sum \alpha_k e_k = \alpha_1 (B_1' - B_1'') + \alpha_2 (B_2' - B_2'') + \alpha_3 (B_3' - B_3'')$. Для этого на левом поле сформируем изображение вида $\alpha_1 B_1' + \alpha_2 B_2' + \alpha_3 B_3'$, а на правом поле — изображение $\alpha_1 B_1'' + \alpha_2 B_2'' + \alpha_3 B_3''$. Зафиксируем точку (x_0, y_0) и будем добиваться равенства цветов полей сравнения в этой точке. Для этого разрешается на поля сравнения прибавлять или вычитать одинаковые зрительные картины с умножением на числа $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Аксиома утверждает, что для любой зрительной картины B существует три функции e_1, e_2, e_3 , такие, что всегда можно добиться равенства цветов в произвольной точке (x_0, y_0) при единственной совокупности коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

Под произведением αe подразумевается результат умножения на одном поле сравнения $\alpha B'$ и $\alpha B''$ — на другом. Умножению функции e на коэффициент α соответствует перемена полей сравнения местами. В частном случае функции B_1', B_2' и B_3' могут быть тождественно равны нулю. Это соответствует колориметрической процедуре выравнивания цвета в точке (x_0, y_0) зрительной картины B с помощью линейной комбинации $\sum \alpha_k B_k'$. Известно, что предъявляя изображения B и $\sum \alpha_k B_k'$ на разных полях сравнения, не всегда удается достичь такого равенства. В этом случае приходится некоторые из изображений B_k' переносить на другое поле сравнения.

Производя такие опыты, убеждаемся, что всегда можно добиться равенства цветов в точках фиксации при единственной совокупности чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Предъявление в таких опытах лишь однородных зрительных картин $B(\lambda)$ соответствует хорошо известным колориметрическим экспериментам [12, с. 206], доказывающим трехмерность цветовых ощущений.

Сформулируем аксиому непрерывности. Непрерывному изменению функции $B(\lambda, x, y)$ соответствует непрерывное изменение чисел α_k , существование и единственность которых следует из свойства размерности.

Покажем теперь, что числа α_k являются линейными непрерывными функционалами на K . Для этого достаточно показать, что они аддитивны и непрерывны [13, с. 175]. Возьмем $B_1, B_2 \in K$. В соответствии с аксиомой размерности для этих зрительных картин всегда можно подобрать числа $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ такие, что будут иметь место равенства цветов в некоторой точке на полях сравнения, т. е. $\Phi[B_1, \sum_k \alpha_k (B_1) e_k] = 1$, $\Phi[B_2, \sum_k \alpha_k (B_2) e_k] = 1$. На основании аксиомы аддитивности

$$\Phi(B_1 + B_2, \sum_k [\alpha_k (B_1) + \alpha_k (B_2)] e_k) = 1. \quad (7)$$

Кроме того, для зрительной картины $B = B_1 + B_2$, согласно аксиоме размерности, справедливо равенство

$$\Phi[B, \sum_k \alpha_k(B) e_k] = 1. \quad (8)$$

В силу единственности наборов $\{\alpha_k\}$ имеем

$$\alpha_k(B) = \alpha_k(B_1) + \alpha_k(B_2), \quad k=1, 2, 3. \quad (9)$$

Таким образом, функционалы α_k аддитивны. Непрерывность этих функционалов непосредственно вытекает из аксиомы непрерывности, следовательно, α_k — линейные функционалы на K . Но конус K — воспроизводящий, т. е. всякий элемент $B \in L_2$ может быть представлен в виде разности $B = B' - B''$, где $B', B'' \in K$. Поэтому $\alpha_k(B)$ единственным образом продолжаются как линейные функционалы на все пространство.

Согласно теореме Фреше — Рисса [14] об общем виде линейного функционала в L_2 имеем

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) K_1(\lambda, x, y) d\lambda dx dy; \\ \alpha_2 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) K_2(\lambda, x, y) d\lambda dx dy; \\ \alpha_3 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) K_3(\lambda, x, y) d\lambda dx dy. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь K_1, K_2, K_3 — некоторые фиксированные функции, принадлежащие L_2 .

Можно показать, что функции K_1, K_2, K_3 линейно независимы. Воспользуемся доказательством от противного. Предположим, что они линейно зависимы, т. е. одну из них можно выразить в виде линейной комбинации остальных. Например, пусть

$$K_3(\lambda, x, y) = a_1 K_1(\lambda, x, y) + a_2 K_2(\lambda, x, y), \quad (11)$$

где a_1, a_2 — некоторые фиксированные вещественные числа.

Подставим уравнение (11) в последнее из равенств (10):

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) (a_1 K_1(\lambda, x, y) + a_2 K_2(\lambda, x, y)) d\lambda dx dy = \\ &= a_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) K_1(\lambda, x, y) d\lambda dx dy + a_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\lambda, x, y) K_2(\lambda, x, y) \\ &\quad \times (\lambda, x, y) d\lambda dx dy. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя первое и второе равенства системы (10), переписываем уравнение (12) в виде

$$\alpha_3 = a_1 \alpha_1 + a_2 \alpha_2. \quad (13)$$

Таким образом, для любой функции B число α_3 однозначно определяется числами α_1 и α_2 по формуле (13). Если, например, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, то должно быть также $\alpha_3 = 0$. Однако это не так, поскольку для функции $B = \alpha_3 e_3$ числа $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, но $\alpha_3 \neq 0$. Итак, пришли к противоречию. Следовательно, функции $K_1(\lambda, x, y)$, $K_2(\lambda, x, y)$ и $K_3(\lambda, x, y)$ линейно независимы.

Покажем теперь, что преобразование $F(B)$, входящее в математическую модель (2) с точностью до взаимно-однозначного соответствия, определяется функционалами $\alpha_k(B)$, $k=1, 2, 3$.

Возьмем пару зрительных картин B_1 и B_2 , для которых $\alpha_k(B_1) \neq \alpha_k(B_2)$, $k=1, 2, 3$. Из аксиомы размерности следует

$$\Phi[B_1, \sum \alpha_k(B_1) e_k] = 1, \quad \Phi[B_2, \sum \alpha_k(B_2) e_k] = 1.$$

Используя свойство транзитивности, получаем $\Phi(B_1, B_2) = 1$.

Возьмем теперь другую пару изображений B_1 и B_2 , для которых $\alpha_k(B_1) \neq \alpha_k(B_2)$. Если бы и в этом случае оказалось $\Phi(B_1, B_2) = 1$, то отсюда бы вытекало, что $\alpha_k(B_1) = \alpha_k(B_2)$, что противоречит условию. Значит, $\Phi(B_1, B_2) = 0$. Таким образом, математическая модель цветовой индукции зрения человека имеет вид

$$\Phi(B_1, B_2) = I[\alpha_k(B_1), \alpha_k(B_2)], \quad k=1, 2, 3, \quad (14)$$

где $\alpha_k(B)$ характеризуют, согласно теореме (2—1) [9, с. 43], отображение $F(B)$ с точностью до взаимно-однозначного соответствия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helmholtz H. Handbuch der physiologischen Optik. Hamburg u. Leipzig, 1909—1911. 372 p.
2. Ньюберг Н. Д. Курс цветоведения. Гизлегпром, 1932. 146 с.
3. Федоров Н. Т. Об одной из основных закономерностей в области одновременного цветового контраста. — «Докл. АН СССР», 1949, т. XVII, № 3, с. 142—145.
4. Кравков С. В. Глаз и его работа. М., «Наука», 1950. 347 с.
5. Kinney J. Factors affecting induced color. — «Vision research», 1962, vol. 2, N 12, p. 38—51.
6. Meessen A. A simple nonlinear theory of color perception and contrast effects. — «Kybernetik», 1967, 4, N 2, p. 63—70.
7. Naitani Y. Estimation of color induction by simultaneous color contrast. — «Proc. Int. Color Meeting» «Color 69», Stockholm, 1969, v. 1, p. 43—49.
8. Wassle H., Heinrich F. Non linear chromatic colour induction. — «Farbe», 1970, 19, N 1—6, p. 33—38.
9. Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Пильшиков Б. В. Математическое моделирование монокулярного зрительного восприятия. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 40—45.
10. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М., «Наука», 1972. 490 с.
11. К вопросу математического описания линейных психофизических систем. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 8, Харьков, 1972, с. 56—58. Авт.: Л. М. Майстровская, В. П. Пчилов, Е. Г. Качко, Ю. П. Шабанов-Кушнарченко.
12. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. 2. М., Госэнергоиздат, 1961. 415 с.
13. Люстерник Л. А., Соболев В. И. Элементы функционального анализа. М., Физматгиз, 1951. 518 с.
14. Леви П. Конкретные проблемы функционального анализа. М., Физматгиз, 1967. 376 с.

К АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

СООБЩЕНИЕ 5

Количественный анализ пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга, согласно теории Хартли—Шеннона, позволяет уточнить содержание (интенционал) биоэлектрических мозаик, оцениваемых при визуально-качественном анализе зачастую на интуитивном, экспликационном уровне, не исключающем значительной доли прагматического элемента. Другая крайность заключается в том, что по отобранным (селективным) параметрам оцениваются нейрофизиологические процессы в целом. Информация о пространственно-временных организациях связей головного мозга позволяет получить логическую меру их вероятностных изменений.

Содержание селективной информации определяется структурой альтернативных биоэлектрических событий, отображенных в системах синхронных и асинхронных связей головного мозга. Если противоречия отсутствуют, а степень новизны имеется, то нейрокибернетический анализ можно считать содержательным, семантическим, информативным. Селективность пространственно-временных связей головного мозга апеллирует к гомоморфности отображения.

Недостаточная определенность отображенной ЭЭГ картины, логико-семантическая интерпретация этого материала позволяет строить объемные гомоморфные модели, наделенные полномочиями тезауруса. Под тезаурусом понимается множество смысловыражающих признаков закодированных синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. В таком понимании системы синхронных и асинхронных связей головного мозга всего иерархического многообразия структур имеют смысл, если дифференцируются по весу. Критерий ценности информации об изменении системы синхронных и асинхронных связей головного мозга в однозначности заключений.

Согласно термодинамической трактовке, информация оценивается энтропией и негэнтропией. Если энтропия — мера рассеяния энергии, мера хаоса, дезорганизации материи, то негэнтропия — мера сосредоточенности, организованности, упорядоченности, вероятности, стремящейся к достоверности.

Такой подход к оценке локальных и диффузных структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга оказывается неопределенным. Вместе с тем энтропия и негэнтропия могут отображать степень эффекта негативности схождения и расхождения систем синхронных и асинхронных связей головного мозга при разных функциональных состояниях. В частности, построение моделей может быть по среднеквадратическим отклонениям (σ) веса систем связей головного мозга разных структур. При этом обнаруживается неантагонистическое

противоречие в оценке ценности пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга.

1. Увеличение σ приводит к рассеянию веса систем синхронных связей относительно центра тяжести, увеличению возможной меры хаоса, разнонаправленности, «дезорганизации» межцентральных отношений, по крайней мере, в силу размягчения структурных связей усугубляет их.

2. Уменьшение σ , сопутствующее повышению ранга систем связей головного мозга, приводит к вероятности, стремящейся к достоверности, к сворачиванию вариабельности степеней свободы, переходу к const или вырождению в нуль.

Количество полезной информации можно связать со степенью неожиданности форм и частных структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга. В таком случае ценность информации можно рассматривать в аспекте получения дополнительного полезного дешифрованного ЭЭГ материала. Прирост количества информации о характере поведения пространственно-временных организаций связей головного мозга определяется по формуле

$$I = \log \frac{P_2}{P_1} = \log P_2 - \log P_1,$$

где P_1 — полезная информация о структуре пространственно-временной организации потенциалов головного мозга до проведения анализа данной системой; P_2 — полезная информация о структурах пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга после проведения анализа данной нейрокибернетической системой.

Выбор логарифмической функции для количественной оценки прироста полезной ЭЭГ информации базируется, в основном, на аддитивности. Чем больше неопределенность P_1 , тем больше ценность информации. Если $P_1=0$, то в качестве основания суждений можно выбрать двоичное счисление: логический нуль «0» при P_1 . Логическая единица информации при $P_2/P_1 = \log_2 2 = 1$.

Синхронные и асинхронные потенциалы головного мозга, как выявлено в ранее опубликованном материале, являются событиями. Системы синхронных связей головного мозга, выраженные в форме признаков вариационных рядов иерархических рангов, несут сообщения о структуре и весе пространственно-временных связей головного мозга. Между сообщением и пространственно-временным распределением случайных биоэлектрических событий существует однозначное соответствие. Единица количества информации соответствует сообщению об одной, двух, трех и т. д. синхронных и асинхронных связях, появившихся на позициях, координируемых ЭЭГ отведениями. Единица количества информации оценивается двончной единицей (битом), обуславливая акт выбо-

ра между наличием или отсутствием потенциалов. Вследствие этого наиболее эффективным и оптимальным является кодирование структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Мерой информации систем синхронных и асинхронных связей головного мозга служит количество сведений, содержащихся в сообщениях, выраженных в форме накопленных весов признаков вариационных рядов иерархических рангов. Мерой количества сведений является изменение веса систем синхронных связей головного мозга равных ЭЭГ выборок при различных функциональных состояниях. Количество сведений, содержащихся в признаках, формирует гомоморфный образ межцентральных отношений церебральных систем. Емкость информации определяется весом систем синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Признаки всех вариационных рядов несут полезную информацию разной емкости, которая может меняться при переходе от одного функционального состояния головного мозга к другому. Особенно ярко выражено это свойство у систем синхронных связей головного мозга, имеющих высокую степень пространственно-временной лабильности.

При отборе оригинальных систем синхронных связей головного мозга из разнообразия вариационных рядов иерархических рангов производится переход к однообразию. Информация сжимается, уплотняется. Исходная система закодированных потенциалов несет неопределенную информацию. Ранжирование структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга позволяет осознать сообщения. Информация становится ценной, так как позволяет вывить и выразить в четкой форме изменения весов систем синхронных и асинхронных связей головного мозга независимо от иерархического ранга.

Направленное изменение случайных биоэлектрических событий вероятно меняет сообщения. Возникает возможность беспристрастно измерить пространственно-временные явления головного мозга. Изложенное выше дает возможность прогнозировать системы синхронных и асинхронных связей головного мозга, используя их в топодиагностике и коррегировании гомеостаза нормы.

Совокупность признаков синхронных и асинхронных связей головного мозга приводит к разнообразию избыточности сообщений о распределении биоэлектрических событий, которая даже после ранжирования является своеобразной помехой при нейрокибернетическом анализе. Отбор признаков с однонаправленно-вероятностным распределением весов систем синхронных связей головного мозга делает информацию о пространственно-временных организациях потенциалов мозга селективной.

Избыточность сообщений обусловлена, в частности, тем, что признаки одного и разных вариационных рядов взаимосвязаны. Вместе с тем избыточность структур увеличивает объем сообщений, интерполируя направленность селективной информации о пространственно-временной организации синхронных и асинхронных

связей головного мозга, сводит к минимуму возможность неправильного трактования функционирования целостного мозга. Когда сообщения о повторе систем синхронных связей головного мозга появляются, возникает необходимость упорядочить (проранжировать) их, после чего сообщения становятся информативными. Пространственно-временная организация синхронных и асинхронных связей головного мозга отображает во всей вариабельности гомеостатические реакции.

Отображение пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга производится с помощью кодирования. Кодирование дешифрирует ЭЭГ, позволяя отразить в форме признаков систему межцентральных отношений. Если при кодировании биосигналов мозга используется двоичная система счисления, то система изохронных и полихронных элементов ЭЭГ выражена оптимальным двоичным кодом.

Система счисления — совокупность обозначений и записи структур пространственно-временного распределения потенциалов головного мозга. Если система потенциалов кодируется двоичным кодом, количество биоэлектрической информации определяется как двоичное число символов «1» и «0», воспроизводя из множества ЭЭГ колебаний только те, которые превышают уровень анализа или равны ему. Положение и набор символических единиц идентифицируется (отождествляется) со структурой локальных и диффузных пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга. В определенном смысле идентификацию можно связывать с рекурсивностью, когда структуру систем связей головного мозга можно принять как первичное понятие, определяющее пространственно-временную организацию потенциалов головного мозга, в чем усматривается семантизм биоэлектрической информации.

Поскольку потенциалы, равные логическому нулю, соответствуют шуму или отсутствию ЭЭГ волн, то они могут интерпретировать второе состояние пространственно-временных организаций потенциалов, определять количество информации. Двоичное кодирование в данном случае позволяет оперировать только логической единицей. Потеря информации, лежащей в зоне логического нуля, расценивается в таком же смысле, как учет частоты, интегрированной площади, максимальных амплитуд, восходящих и нисходящих фаз и множества других параметров, анализ которых в совокупности, комплексно либо в какой-то части не предусматривается.

Системы синхронных и асинхронных связей головного мозга позиционны. Позиции потенциалов головного мозга отображаются символической структурой пространственно-временных организаций. Позиция указывает адреса компонент структуры и делает их детерминистски-жесткими, что позволяет автоматически программировать пространственно-временные организации потенциалов головного мозга, включая такую важную технологическую операцию нейрокибернетического анализа, как ранжирование структур по вариационным рядам, накопление их за ЭЭГ выборку.

Двоичный код, формализуя структуры пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов, позволяет алгоритмизировать и программировать их. Алгоритмы пооперационно, в строго стандартизированном порядке позволяют производить нейрокибернетический анализ синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. Алгоритм предложенной системы нейрокибернетического анализа пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга представляет множество правил, определяющих процесс анализа с учетом перехода от одной операции к другой, начиная от исходящей ЭЭГ системы, закодированной двоичным кодом, и кончая конструкцией гомоморфной модели, эквивалентно отображающей исходную систему.

Синтаксические правила алгоритмического языка показывают, как образуется формализованное понятие, отображающее пространственно-временную организацию потенциалов головного мозга. Семантические правила алгоритмического языка определяют свойство, приписываемые понятию, отображающему ту же пространственно-временную организацию возможных биоэлектрических связей. При количественном анализе ЭЭГ важно раскрыть эффективность отображения целостных электрических свойств головного мозга, оптимальность переработки закодированной ЭЭГ информации.

Машинный язык (например, АЛГОЛ) записывает алгоритмы анализа ЭЭГ в специфической, трудноосмысливаемой, громоздкой форме. Кодирование позволяет в данном приложении не только отразить качественные стороны равных и не равных структур пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга, но и упорядочить разнообразие переменными рядами. Структурированные пространственно-временные организации потенциалов головного мозга образуют перцептивные образы систем синхронных и асинхронных связей головного мозга. Эти системы могут быть представлены плоскими и объемными гомоморфными моделями. Плоская модель графически изображает множество систем связей, переменность которых выражена, как неоднократно отмечалось, в форме признаков вариационных рядов иерархических рангов.

Объемная гомоморфная модель строится после минимизации, т. е. отбора оригинальных признаков с лабильным, вероятностно-направленным распределением весов, основанием которой является метрическое пространство (информационное поле), указывающее зоны координат регистрации ЭЭГ. Как указано в предыдущих сообщениях, на третьей масштабной оси такой модели откладывается вес числового параметра систем синхронных и асинхронных связей головного мозга. Деление моделей условно, с целью упростить анализ, минимизацию форм многообразных систем и подсистем связей в структурном, весовом и вариационно-качественном аспектах.

Если компоненты структур символически обозначать буквами алфавита, то признаки закодированных потенциалов образуют слова. Признаки называются графически равными, если они имеют одинаковые длины слов. Графически равные признаки формируют вариационные ряды. Признаки однородного вариационного ряда представляют множество форм систем синхронных связей, имеющих равные, но не одинаковые структуры. Так как они отображают разные качества пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей в их функциональном значении, их можно назвать термами.

Множество признаков однородного вариационного ряда представляет объединение совокупности различных качеств биоэлектрического пространственно-временного синхронима, имеющих строгую меру выражения. Мера этих качеств определена одной длиной слова или, как принято, равной структурой признаков однородного вариационного ряда. Равенство структуры признаков — мера, а вариабельность структур — различие биоэлектрических пространственно-временных качеств связей.

Как видно, признак соединяет статические и семантические стороны пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга. Так как упорядоченная последовательность признаков называется кортежем, признаки вариационного ряда являются компонентами кортежа. В процессе ранжирования признаков образуются множества параллельных кортежей упорядоченных по иерархическим рангам. Иерархические ряды отображают пространственно-временные качества биоэлектрической активности разных мер. С увеличением ранга соответственно растет величина меры признаков. Иначе говоря, чем больше (диффузней) структура, тем больше мера признака, обширней площадь пространственно-временных организаций. С ростом ранга меняется качество пространственно-временных организаций, так как изменяется вариантность охвата позиционных зон головного мозга.

Кроме изменения этих двух свойств, признаки меняют вес (частоту) при различных функциональных состояниях головного мозга. Восхождение по иерархическим рангам, как правило, уменьшает вес признаков. Если бы признаки отображали не только позиции потенциалов на определенном уровне биоэлектрической активности, но и направление фаз, позволяющих судить о неустойчивости равновесности систем прямых и обратных связей, то качество структур можно было бы характеризовать размещением и перестановкой. Это позволило бы раскрыть направленность биоэлектрических полей и биотоков. Линейное размещение закодированных потенциалов связано с фазным упорядочиванием синхронных и асинхронных потенциалов на уровне анализа подобно упорядочению точек, образующих прямую.

Потенциалы, поступающие на поверхность мозга в каком-то порядке, можно выразить перестановкой. Качество признаков характеризуется сочетаниями. Сочетание из n ЭЭГ отведений по r потенциалам представляет множество r -позиционных сигналов и обо-

начается C_n^r или $\binom{n}{r}$ при $r \leq n$. При гиперсинхронизации $r = n$, в остальных случаях $r < n$. Число сочетаний из множества n синхронных потенциалов по r равно количеству признаков вариационного ряда $C_n^r = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$, где (!) — факториал, т. е. произведение натуральных чисел от 1 до n .

Каждую пространственно-временную организацию синхронных связей можно упорядочить $r!$ способами. Следовательно, $r!$ перестановок каждого из C_n^r сочетаний формируют $C_n^r \times r!$ перестановок потенциалов головного мозга относительно друг друга. В таком понимании перестановка компонент структуры признаков также меняет качество биоэлектрических архитектур. Число $C_n^r \times r!$ равно общему числу перестановок, поскольку любая перестановка из r потенциалов формируется из сочетания по r потенциалов. Признаки вариационного ряда C_n^r можно выразить

формулой $C_n^r \times r! = P_n^r = \frac{n!}{(n-r)!}$. Разделив на $r!$, получим $C_n^r =$

$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$. Вариационные ряды признаков потенциалов

сворачиваются $\binom{n}{r} = \frac{n!}{1!(n-1)!} = n$. Вариационный ряд признаков гиперсинхронных потенциалов равен

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{n!(n-n)!} = \frac{1}{0!} = 1.$$

Это граничные значения признаков вариационных рядов.

Разветвление и сворачивание признаков закодированных потенциалов вариационных рядов имеет форму гауссова распределения. Если модой обозначить максимальное множество признаков вариационного ряда, например, C_8^4 , то можно выделить множества признаков разворачивающихся рядов $C_8^2 = 28$, $C_8^3 = 56$, симметричных соответствующим множествам признаков сходящихся рядов: $C_8^6 = 28$, $C_8^5 = 56$. Эту симметричность множества признаков вариационных рядов можно выразить формулой

$$\binom{n}{n-r} = \frac{n!}{(n-r)!r!} = \binom{n}{r}.$$

При упорядочивании структур множества признаков вариационных рядов можно пользоваться перестановками, так как положение признаков в ряду не имеет принципиального значения. Достаточно произвольно выбрать любую перестановку признаков и распространить на исследуемые ЭЭГ выборки. Поэтому кортеж — условное понятие.

Признаки вариационных рядов могут сопоставляться. При этом совершенно не обязательно сравнивать все признаки вариационных рядов, достаточно характеристических. Структура анализируемых признаков выступает как способ связи между признаками одного и разных рангов вариационных рядов. Множество признаков, наделенных структурой, в кибернетике называется пространством. Множество вариационных рядов разных рангов представляет изображение всевозможной совокупности пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. Изображение является проекцией биоэлектрических мозаик. Отобранные признаки являются подмножествами по отношению к исходному и упорядоченному множествам признаков.

Критерий оптимального и эффективного отбора признаков иерархических структур — сложная и самостоятельная задача. Критерии могут быть самыми разнообразными. Отбор признаков по весам центров тяжести, среднеквадратичных отклонений и другим моментам и числовым характеристикам. Каждому критерию соответствует некоторая «добротность», позволяющая определить процент дифференцированного распознавания функциональных изменений головного мозга. Отобранные признаки изображают определенные свойства пространственно-временной синхронизации. Возникает необходимость разработать систему критериев или обобщенного критерия оценки пространственно-временного распределения потенциалов головного мозга.

Темплетное отображение пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга позволяет лаконично компоновать, типизировать вероятностные биоэлектрические качества. Отбор совмещенных и спектральных признаков рационализирует и минимизирует нейрокибернетический анализ. В соответствии с теорией распознавания образов, отбор признаков иерархических структур позволяет получить селективную ценную информацию и в результате экономии времени делает выбранный критерий оценки эффективным. Темплетное изображение форм систем синхронных связей позволяет применять дискриптор, под которым понимается организация, индексированная координатами.

Отбор типизированных признаков совпадает с поисковым маршрутом количественного анализа. Пересечение компонент иерархических структур признаков связан с дифференциацией весов разных функциональных состояний. Пересечение компонент иерархических структур может производиться параллельно по нескольким «ветвям» (маршрутам). Селективный информационный поиск связан со снятием семантической (содержательной) и статической неопределенностей.

Неопределенность о признаках систем пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга на данном этапе анализа связана с отбором из упорядоченного разнообразия оригинальных, типизированных признаков. Отбор показательных признаков называется репрезентативным отбором, так как отобранные признаки достаточно полно характеризуют все множества призна-

ов. Разумеется, как бы не удачен был репрезентативный отбор, абсолютной полноты о целостном функционировании головного мозга не будет, поскольку выборка не может заменить генеральную совокупность. Более того, некоторые особенности биоэлектрических отклонений вообще не отразятся в отобранном множестве признаков, поэтому репрезентативность отбора признаков является относительной. Фактически репрезентативный отбор показательных признаков применяется тогда, когда исследование всех разнообразных характеристик систем синхронных и асинхронных связей практически производить не целесообразно.

При репрезентативном отборе каждый переход от признаков вариационного ряда низшего ряда к высшему является поисковым шагом селективной информации. Выборка объединяет устремленность признаков к достоверному однообразию пространственно-временных биоэлектрических качеств во всей цепи переходов от локальности к диффузности. Вес — это повтор копий — однотипных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга. Выборка признаков устанавливает выразительную связь разнообразных копий пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга в различные моменты времени разных функциональных состояний мозга. Соответствие этому позволяет наделять выборку прогностическими признаками.

Таким образом, при нейрокибернетическом анализе выделяются два основных этапа: 1) кодирование и упорядочение разнообразия пространственно-временных организаций потенциалов. В результате первого этапа количественное однообразие «уничтожает» разнообразие; 2) отбор из разнообразия показательного, типичного однообразия. На втором этапе отбирается практически ценная селективная информация.

УДК 612.82.014.42.001.57

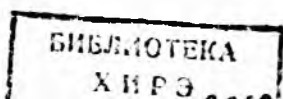
Г. А. КОЛОТЕНКО

СИНХРОННЫЕ И АСИНХРОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА.

СООБЩЕНИЕ 6

При исследовании операторской деятельности особое значение придается вопросу прогнозирования поведения оператора в условиях, при которых принятие решений и действия определяются не только профессиональной подготовкой, личным мастерством, но и чувством долга, моральной ответственностью, типологическими особенностями высшей нервной деятельности, направленностью личности, эмоциональной устойчивостью, характерологическими особенностями оператора АСУ.

В настоящее время в области эргономики проводятся исследования психофизиологических особенностей операторского труда, мотивации его трудовой деятельности, характера межличностных взаимоотношений. Однако эти исследования носят, как правило,



констатирующий характер. Большинство авторов предлагает решать проблемы операторов путем профотбора. Вместе с тем возможен дополнительный путь к разрешению указанной проблемы — физиологическое воздействие на квалифицированных операторов обученные их способам саморегуляции психических функций.

В связи с этим проф. А. Т. Филатов предложил систему эмоционально-волевой тренировки (ЭВТ) применительно к деятельности операторов АСУ.

Исследования проводились по следующему плану.

1) Отработка предложенных модификаций ЭВТ на модели имитирующей деятельность оператора. Апробация проведена на испытуемых.

2) Применение разработанных психогигиенических форм на предприятии. Исследования проводились с операторами автоматизированных систем проектирования (АСП) на базе ордена Трудового Красного Знамени государственного научно-исследовательского и проектного института основной химии (НИОХИМ).

3) Обучение системе психогигиенических мероприятий врачам-медсестрам предприятий для внедрения разработанной совместно с проф. А. Т. Филатовым формы и организации психогигиены в операторскую деятельность АСУ, контроль и объективную нейрокибернетическую оценку ЭЭГ [1].

С испытуемыми и операторами АСП проведено 24 занятия ЭВТ. Параллельно проводилась регистрация ЭЭГ. Измерялась частота пульса, артериальное давление, температура кожи рук. Регистровалась ЭКГ. Предъявлялись тесты Нечаева, Платонова, «красно-черной» таблицы, анкеты Айзенка и Тейлора. В условиях функционального состояния головного мозга, определяемого ауто suggestion покоем, нейрокибернетический анализ ЭЭГ, основанный на принципах системно-физиологического подхода, явился удобным моделью для изучения особенностей операторов АСУ.

В данной статье приводятся экспериментальные материалы, полученные в лаборатории «Электрофизиологии» Харьковского НИИ неврологии и психиатрии. Анализировались ЭЭГ 20 испытуемых при различных suggestion. Эти лица в возрасте 18—35 лет были обучены двум вариантам ЭВТ проф. А. Т. Филатовым и инженером-психологом А. Г. Лаговским. По окончании обучения ЭВТ испытуемые свободно вызвали необходимое функциональное состояние. Это было в дальнейшем подтверждено дополнительными исследованиями в лаборатории «Эргономики» Харьковского филиала ВНИИ технической эстетики [2].

Биполярная регистрация производилась по неполной международной системе: лобные, височные и затылочные ЭЭГ отведения соединены последовательно, заднетеменные — параллельно. Для снятия мышечных помех и артефактов в период регистрации ЭЭГ с помощью электроэнцефалографа французской фирмы «Альвар» испытуемые находились в положении лежа. Для анализа отобраны десятисекундные выборки. Кодирование потенциалов проведено на уровне 5 мкВ.

Для оценки ЭЭГ предложен нейрокибернетический анализ, основанный на системе способов, представляющих модификацию ранее описанного кодирования ЭЭГ [1]. Система нейрокибернетического анализа ЭЭГ реализуется автоматически и вручную.

Так как ЭЭГ анализировались в период лабораторно-отрабочных испытаний устройства, то анализ 100 ЭЭГ выборок, освещенных в данной статье, произведен с помощью ручной обработки. Делалось это следующим образом: электроэнцефалограмму укрепляли на чертежной доске. Отмечали эпоху анализа (выборку), в которой относительно нулевой оси каждого отведения проводились параллельные линии отдельно для ЭЭГ колебаний каждой полярности на уровне 0,7 максимальной амплитуды U_{\max} минимальной активности (в соответствии с расчетными данными порога срабатывания логических элементов уровень может равняться $0,9 U_{\max}$, $0,5 U_{\max}$ и т. д.). Эти линии представляют условные уровни анализа, равные логической единице.

Из нелинейного ЭЭГ процесса выделяются случайные биоэлектрические события, имеющие импульсный характер, (потенциалы). Устанавливая вертикальную линейку перпендикулярно к уровням анализа, фиксируют количество потенциалов каждой полярности, равных или превышающих уровень анализа для всех отведений и в любых сочетаниях в соответствии с конъюнкцией. При конъюнкции (операции логического умножения) отсчет фиксируемых потенциалов производится от точки пересечения уровня анализа и переднего фронта запаздывающей фазы до точки пересечения уровня анализа и заднего фронта опережающей фазы.

Выделенный отрезок состоит из множества точек равного потенциала, поэтому любая линия, проходящая через этот отрезок, символизирует операцию логического умножения соответствующих ЭЭГ отведений и свидетельствует о временном совпадении потенциалов, возникших в зонах регистрации. Этот метод кодирует структуры пространственно-временных организаций синхронных связей между зонами регистрации ЭЭГ.

Второй метод предложенного анализа позволяет выделить расогласованные во времени, т. е. асинхронные потенциалы, появляющиеся в определенный момент времени на одном из ЭЭГ отведений. В результате отделяется полезная биоэлектрическая информация от ЭЭГ шума, образуются множества логических символов обеих полярностей. Затем синхронные и соответственно асинхронные закодированные потенциалы суммируются для каждого отведения ЭЭГ. Сочетания или иначе переключательные функции, отображающие структуры пространственно-временных организаций синхронных связей, ранжируются по вариационным рядам. Так как кодирование производится в двоичном счислении, одноразовое появление структуры соответствует единице веса и равно одному биту. За ЭЭГ выборку происходит суммирование единиц веса каждой структуры. Поэтому системы связей головного мозга характеризуются объемом веса или просто весом.

Отсортированные структуры пространственно-временных синхронных связей только между любыми переменными парами ЭЭГ отведений образуют вариационный ряд признаков C_3^2 , аналогично только из трехкомпонентных структур образуется вариационный ряд C_3^3 и т. д., наконец, формируется вариационный ряд C_8^3 , характеризующий генерализованные ЭЭГ колебаний. Переход от C_3^2 к C_8^3 соподчиняет вариационные ряды иерархическим рангам. Если структуры пространственно-временных организаций синхронны и соответственно позиции асинхронных связей рассматриваются изолированно, автономно друг от друга, тогда производится анализ спектральных систем связей головного мозга. Если же хотя бы один из компонентов структуры совмещается с системами связей других рангов, то такие системы синхронных связей головного мозга называются совмещенными.

Совмещенные и спектральные системы синхронных связей головного мозга существенно отличаются и при анализе взаимно дополняют пространственно-временные свойства ЭЭГ. Структуры совмещенных систем синхронных связей вариационного ряда C_8^2 , кроме появления на паре любых ЭЭГ отведений, войдут в состав каждого вариационного ряда более высшего ранга, начиная с C_8^3 и кончая C_8^8 . В свою очередь, структуры систем вариационного ряда C_8^3 , характеризуя синхронно-совмещенные потенциалы на любых трех переменных ЭЭГ отведениях, входят в состав каждого вариационного ряда более высокого ранга, т. е. C_8^4 , C_8^5 , ..., C_8^8 . Затем производится расчет числовых характеристик; математического ожидания веса систем синхронных и соответственно асинхронных связей, среднеквадратичного отклонения и т. д. В итоге строится гомоморфная модель спектральных и соответственно совмещенных систем синхронных связей головного мозга*. Прежде чем дать некоторые пояснения, проиллюстрируем гомоморфные модели совмещенных систем синхронных связей головного мозга.

Гомоморфная модель совмещенных систем синхронных связей двухкомпонентных структур устанавливает интенсивные и устойчивые изохронные связи между височной областью T_s левой стороны и затылочной O_d правой (диагонально-образная форма системы синхронных связей). Тенденция к появлению систем синхронных связей наблюдается для пар висок T_d — затылок O_d правой стороны, а также височными зонами обеих сторон. Системы синхронных связей T_s — O_d , хотя и интенсивны, но неустойчивы, системы T_d — O_d и T_d — T_s более стабильны, скучены и постоянны.

Системы синхронных связей трехкомпонентных структур принципиально не отличаются от систем двухкомпонентных структур. На фоне разнообразия, разнонаправленности, калейдоскопической пестроты хаотических пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга четко выражена система синхронных связей T_s — T_d — O_d . Четырехкомпонентные структуры систем син-

* Результаты доложены автором на юбилейной научной конференции Украинского института усовершенствования врачей, посвященной 50-летию образования СССР, 31 мая 1972 г. в докладе на тему: «Изменения психофизиологического состояния операторов в период эмоционально-волевой тренировки».

хронных связей раскрывают диффузную пространственно-временную синхронизацию незначительной интенсивности, охватывая «по кольцу» лобные, височные, теменные и затылочные зоны и сводя системы синхронных связей $T_s—O_d$ к разнонаправленности, неустойчивости, малой степени надежности.

Переход совмещенных систем синхронных связей головного мозга от низшего ранга к последующему, высшему, как правило, снижает вес систем в 1,5—3,0 раза. Так как распределение синхронных и асинхронных связей фоновой ЭЭГ связан с механизмом случайного выбора, зависящего от набора возмущений, то не исключена возможность возникновения вероятностных структур пространственно-временных организаций в соответствии с «нейрональной комбинацией» [3].

Системы головного мозга, входящие в различные сочетания, имеют отличимые взаимодействия. Одна и та же система головного мозга может участвовать в разных сочетаниях, образуя различные пространственно-временные организации синхронных связей головного мозга. Увеличение числа взаимодействующих структурных компонентов сопровождается уменьшением их весовых характеристик. При разных возмущениях локальная пространственно-временная синхронизация интенсивна. Диффузная синхронизация характеризуется, как правило, размытостью, нечеткой выраженностью, но даже в такой ЭЭГ картине можно уловить вероятностные элементы.

Нейрокибернетический анализ систем синхронных связей пятикомпонентных структур обнаруживает одностороннюю систему синхронной связи между височно-затылочными отведениями с акцентом на левой стороне, а также двустороннюю систему синхронных связей затылочных областей.

В период аутосуггестии покоя доминируют односторонние височно-затылочные связи $T_s—O_s$ и $T_d—O_d$. Чтобы количественно сравнивать синхронные и асинхронные связи головного мозга по направленности их появления, нужно с каждой закодированной пространственно-временной организацией потенциалов головного мозга связать определенное число, которое назовем вероятностью вариабельной структуры пространственно-временной организации синхронных и асинхронных связей головного мозга. Вероятность таких связей — численная мера степени объективной возможности их формирования. Вероятность определяется весом, поэтому структуры пространственно-временных организаций связей головного мозга, которые почти не происходят, условно названы маловероятными, случайными, стохастическими. Вероятные веса структур анализируемых систем связей головного мозга это те, что происходят, но не всегда. Вероятные события отражают тенденцию или общую направленность пространственно-временного синхронного и соответственно асинхронного функционирования церебральных систем.

В качестве единицы измерения условно принята достоверность события, подразумевающая такое идеальное, граничное состояние,

при котором структуры определенных пространственно-временных организаций головного мозга сформируются всегда. Если им присписать вероятность, равную единице, то все возможные, но не достоверные случайные биоэлектрические простые и сложные события будут характеризоваться вероятностями, меньшими единицы. Невозможными или недостоверными будут также структуры пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга, которые не формируются. Диапазон измерения веса систем синхронных и асинхронных связей головного мозга колеблется в диапазоне от нуля до единицы.

Совокупности структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга образуют множества. Каждая структура имеет вес, величина которого зависит от длительности репрезентативной ЭЭГ выборки. Системы связей головного мозга, выделенные на меньшем уровне анализа, образуют множества по отношению к подмножеству, образованному на большем уровне анализа. Множества и подмножества веса соответствующей системы связей головного мозга находятся в вероятностной прямо пропорциональной зависимости от величин уровня анализа. Совокупность структур пространственно-временных организаций связей головного мозга, выраженная последовательно во времени, связана с понятием пространства множества и в частном случае характеризуется символической длиной логических единиц.

Генеральная совокупность выражает структуру и вес бесконечной длиной, выборочные совокупности определяются вероятностными интервалами веса и ограниченностью структур. Сумма двух генеральных совокупностей равна неопределенности. Поэтому при статистическом анализе биоэлектрических мозанк можно производить алгебраические операции с параметрами выборочных совокупностей ЭЭГ колебаний.

Выборочная совокупность может состоять из: 1) рассогласованных во времени биоэлектрических событий; 2) рассогласованных во времени с частичным совпадением; 3) строго совпадающих во времени в любом варианте. Так как веса совмещенных и несовмещенных потенциалов определены границами достоверности и недостоверности, то их принято считать интерполированными, т. е. находящимися внутри вероятностного интервала значений. Случайные биоэлектрические события представляются дискретными величинами, поэтому в основу их кодирования положена булева алгебра. Связь между потенциалами равных ЭЭГ отведений рассматривается с точки зрения констатации наличия или отсутствия систем синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Структуры пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга определяются временными связками. Логические операции представляют логические связи. Каждому сочетанию пространственно-временного расположения потенциалов соответствует определенная функция алгебры логики. На основании того, что потенциалы (по словам П. К. Ано-

ина) имеют «положительную и отрицательную компоненты», логические операции производятся с потенциалами положительной соответственно отрицательной полярности. Потенциалы ниже уровня анализа соответствуют логическому нулю. Поэтому каждой комбинации можно сопоставить единичное (истинное) или нулевое (ложное) значение логической функции.

Число функции алгебры логики от двух переменных потенциалов равно $4^2=16$. Так как потенциалы могут принимать только два значения: либо существовать (1), либо отсутствовать (0), то функция переменных потенциалов, расположенных на различных ЭГ n -отведениях, имеет 2^n комбинации. При переменных потенциалах число функций алгебры логики равно 2^{2^n} .

Рассмотрим три функции алгебры логики от двух переменных. Для этого допустим, что каждое ЭГ отведение равно A, B, C . Согласно таблице истинности, используемой в технике, при конъюнкции выделялись бы только те структуры, которые отображали овпадение по длительности импульсов на пороговом уровне по сем ЭГ отведениям. В результате кодирования получили бы логическую единицу.

Операция логического сложения «ИЛИ» (дизъюнкция), используемая параллельно при логическом умножении, когда применяется система нейрокибернетического анализа, после кодирования производит аналогичные преобразования. При использовании для кодирования дизъюнкции отсчет производится от точки пересечения уровня анализа и переднего фронта опережающей фазы до точки пересечения уровня анализа и заднего фронта запаздывающей фазы. Кроме того, при дизъюнкции фиксируются не только совпадающие сигналы, но собираются одиночные, рассогласованные во времени. Синхронные потенциалы — зависимые (сложные) случайные электрические события, асинхронные — независимые (простые) события. Поэтому синхронные потенциалы могут быть получены как при конъюнкции, так и при дизъюнкции. Логическая операция «ИЛИ» отражает как бы переходный момент от одного свойства электрической активности головного мозга к другому.

Синхронные потенциалы, над которыми производятся операции логического умножения и сложения, обладают двойственным, эквивалентным (двуединным, дуальным) характером. Дуальными называются такие алгебраические выражения синхронных потенциалов головного мозга, когда одно из них может быть получено из другого путем замены знаков (\cdot) на ($+$) и знаков ($+$) на (\cdot) того же сочетания. В соответствии с эквивалентностью можно эквивалентно преобразовывать совместные (совместные, изохронные) потенциалы, синхронные потенциалы можно разделить на строго совпадающие (при конъюнкции), названные синфазными, и синхронные, полученные при дизъюнкции, когда при временном рассогласовании имеется некоторое совпадение по длительности импульсов.

Фильтрация «смешанных» множеств позволяет получить «мохроматические» множества синфазных (при конъюнкции), асин-

фазных (при дизъюнкции) и рассогласованных во времени (асинхронных) (также при дизъюнкции) потенциалов. Отделить множества закодированных структур можно при помощи переключательных логических функций. Логические переключательные функции иногда представляют соединениями ЭЭГ, в которых временный порядок потенциалов не играет роли, так как один признак отличается от другого по крайней мере положением, координатой потенциала. Если учитывать сочетательный характер структур пространственно-временных организаций, то число признаков из трех

ЭЭГ отведений по два равны: $C_3^2 = \frac{3 \cdot 2}{1 \cdot 2} = 3$. Обозначим син-

фазные S потенциалы каждой пары ЭЭГ отведений. Они соответственно равны асинфазным потенциалам ($A_s^{AB}, A_s^{AB}, A_s^{BC}$, $S^{AB} = A_s^{AB}$; $S^{AC} = A_s^{AC}$; $S^{BC} = A_s^{BC}$).

При логическом сложении происходит собирание асинхронных потенциалов O_g . К закодированным асинфазным потенциалам приплюсовываются потенциалы: $A_{s_1}^{AC} = A_s^{AC} + O_g^A + O_g^C = S^{AC} + O_{s_1}^{AC}$; $A_{s_1}^{AB} = A_s^{AB} + O_g^A + O_g^B = S^{AB} + O_g^A + O_g^B$; $A_{s_1}^{BC} = A_s^{BC} + O_g^B + O_g^C = S^{BC} + O_g^B + O_g^C$. При минимизации параллелизм счета одиночных потенциалов каждого ЭЭГ отведения устраняется и формулы преобразуются так: $A_{s_1}^{AB} = A_s^{AB} + O_g^A = S^{AB} + O_g^A$; $A_{s_1}^{AC} = A_s^{AC} + O_g^C = S^{AC} + O_g^C$; $A_{s_1}^{BC} = A_s^{BC} + O_g^B = S^{BC} + O_g^B$, откуда число асинхронных потенциалов O_g , вошедших в сумму зарегистрированных потенциалов схемой „ИЛИ“ равно $O_g^A = A_{s_1}^{AB} - A_s^{AB} = A_{s_1}^{AB} - S^{AB}$; $O_g^B = A_{s_1}^{BC} - A_s^{BC} = A_{s_1}^{BC} - S^{BC}$; $O_g^C = A_{s_1}^{AC} - A_s^{AC} = A_{s_1}^{AC} - S^{AC}$. Множества синфазных и асинфазных потенциалов, закодированных по трем ЭЭГ отведениям, равны $A_s^{ABC} = S^{ABC}$.

Множество асинхронных потенциалов равно разности между множеством потенциалов, закодированных логическим сложением всех ЭЭГ отведений и их сочетаний, и суммой асинфазных (соответственно равных синфазным потенциалам) по трем и двум в разных сочетаниях ЭЭГ отведений: $O_g^{ABC} = A_{s_1}^{ABC} - (A_{s_1}^{BC} + A_{s_1}^{AB} + A_{s_1}^{AC}) = A_{s_1}^{ABC} - (S^{ABC} + S^{AB} + S^{BC} + S^{AC}) = O_g^A + O_g^B + O_g^C$. Роль сумматора может быть перенесена на потенциалы n ЭЭГ отведений.

Анализируя ЭЭГ, любой из 2^{2^n} функций алгебры логики структуры можно записать при помощи трех элементарных логических операций: «И», «ИЛИ», «НЕ». Набор элементарных функций логики обладает свойством полноты, если любая функция может быть записана при помощи элементарных функций, входящих в этот набор. В связи с тем, что любую функцию алгебры логики можно записать при помощи конъюнкции, дизъюнкции и инверсии набор элементарных функций является функционально полным

Инверсия или отрицание «НЕ» представляет закодированные синхронные потенциалы противоположной полярности.

При анализе структур пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга достаточным является набор функций конъюнкции («И») и дизъюнкции («ИЛИ»). Можно производить нейрокибернетический анализ с использованием инверсии. Можно подсчитывать не только число совпадений, но и длительность совпадений определенных структур, выявляя их удельный вес за ЭЭГ выборку. При разработке анализирующего устройства опробованы сложные логические операции «И—НЕ» («штрих Шеффера») и «ИЛИ — НЕ» («стрелка Пирса»), полученные за счет соединения двух элементарных логических функций.

«Штрих Шеффера» позволяет фиксировать синфазные потенциалы в любом варианте ЭЭГ отведений, кроме случая совпадения потенциалов по всем ЭЭГ отведениям. «Стрелка Пирса», известная в электронике под названием равнозначности или эквивалентности, фиксирует отсутствие асинфазных и асинхронных потенциалов на всех отведениях. Для упрощения схемы логического устройства был принят набор логических функций «И», «ИЛИ». Поэтому при кодировании руководствовались следующими аксиомами.

1. Если $A, B, C...$ входят в состав множеств потенциалов своего ЭЭГ отведения, то логическое произведение этих потенциалов $A \cdot B \cdot C...$ характеризует строгое синхронное функционирование соответствующих зон головного мозга.

2. Если $A, B, C...$ входят в состав множеств любых потенциалов своего ЭЭГ отведения, то логическая сумма потенциалов $A + B + C...$ наряду с синхронизмом характеризует асинхронизм функционирования соответствующих участков головного мозга.

3. Перестановка синхронных потенциалов с одного ЭЭГ отведения на другое значения не имеет: $A + B + ... = B + A + ...$; $AB... = BA...$ Группирование синхронных потенциалов иллюстрирует абсолютную симметрию относительно операций дизъюнкции и конъюнкции. Набор логических функций «И», «ИЛИ» в предельном случае можно свести к операции логического умножения, на основании которого была разработана конъюнктивная методика нейрокибернетического анализа, описанная в данном сообщении.

В свете изложенного, анализ исследованных ЭЭГ традиционными амплитудным, частотным, спектральным методами, получение энергетических показателей представляется явно недостаточным для более и менее полного представления о сущности перестройки на уровне регуляторных, центрально-нервных механизмов. Такой локальный количественный анализ не удовлетворяет требованиям системно-физиологической оценки, так как не обеспечивает возможности контроля функциональных, лабильных изменений, установления и исчезновения систем синхронных связей головного мозга, самое существо которых наиболее полно отвечает представлению об устойчивом состоянии мозга, коррелирование

которого возможно только при улавливании уточненных отклонений в их зарождении и дозировании.

Вероятностно-статистическая концепция Шеннона-Винера, положенная в основу предложенного нейрокибернетического анализа, при проведении исследований в системно-физиологическом плане позволяет оценивать формально-логические эффекты с позиций нейрофизиологии, основываясь на учете, главным образом вероятностных соотношений между различными системами головного мозга. В этом отличие от известных подходов количественного анализа, в этом несомненная практическая ценность. Применение предложенного нейрокибернетического анализа ЭЭГ позволяет уточнить динамику лабильных функциональных отношений между различными системами головного мозга. Объективизация методов психогигиены и применение их оценки в кибернетическом аспекте для решения эргономических задач создает предпосылки для раскрытия жизненно важных особенностей механизмов управления и регуляции функциональных состояний операторов в системе «человек—машина — внешняя среда».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов А. Т., Колотенко Г. А., Лаговский А. Г. Оценка эмоционально-волевой тренировки по данным ЭЭГ и психологических тестов. — В кн. Психотерапия и деонтология в комплексе лечения и реабилитации больных на курорте. Харьков, 1972, с. 77—78.
2. Колотенко Г. А., Лаговский А. Г. К вопросу о влиянии эмоционально-волевой тренировки на функции внимания, кратковременной памяти. — В кн. Эргономика и художественное конструирование. Харьков, 1972, с. 14—16.
3. Мисюк Н. Модели механизма мозга человека. Минск, «Беларусь», 1972, с. 75—87.

УДК 62.506.2

С. Ф. МАРЧЕНКО

БИОНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ

Одной из причин несовершенства разрабатываемых человеком технических систем являются несовершенные знания. Это несовершенство компенсируется обычно самим человеком в процессе эксплуатации систем (настройка, управление, ремонт, выбор соответствующих условий среды и т. п.). Чтобы функционирование системы оставалось эффективным в непредвиденных знаниями ситуациях и при минимальном участии человека, она должна обладать возможностью самостоятельно выявлять и устранять несоответствия структурно-функциональных характеристик системы и среды в процессе их взаимодействия при достижении определенного результата. Другими словами, задача состоит в том, чтобы несовершенство создаваемых систем, которое часто является непреодолимым в процессе разработки, автоматически компенсиро-

налось адаптивными процессами самокоррекции, самоуправления, самонастройки, самоорганизации и т. п.

Варианты таких систем в настоящее время разрабатываются в основном на базе современной технологии и кибернетических концепций. Однако в этом отношении мы находимся еще очень далеко от желаемых решений. Современный этап кибернетических исследований характеризуется поиском эффективных путей, генеральной линии разработок адаптивных систем.

Одним из таких путей является бионическая концепция, в основе которой лежит представление о том, что поиски решения технических задач могут быть гораздо эффективнее при условии использования опыта природы в аналогичных ситуациях. Однако накопленный за последнее время опыт в развивающихся бионических представлениях убеждает в наличии здесь серьезных препятствий объективного характера. Одним из них является способ представления результатов исследований биологических систем. Во-первых, они носят обычно описательный характер. Во-вторых, несмотря на указания основоположников кибернетики на общность процессов управления и преобразования информации в живых организмах и машинах, сама суть кибернетических процессов и их механизмов в биосистемах долгое время оставалась нераскрытой. Эти выводы следуют из анализа результатов бионических исследований, полученных до последнего времени.

Так, в работах нейробионического направления самое сильное предположение состоит в том, что достаточно сконструировать систему, элементы которой и характер их связей будут аналогичны в определенном отношении соответствующим прототипом, как такая система автоматически будет обладать свойствами целостных структур нервной системы или даже мозга в целом. Однако достаточно убедительных теоретических или экспериментальных доказательств истинности этого предположения найдено не было, и мы до сих пор не можем с уверенностью сказать, какие свойства элементов мозга и даже какие образования в функциональном отношении являются этими элементами и какие характеристики их связей необходимо учитывать при разработке мозгоподобных машин.

В рамках этого предположения развиваются представления о пороговых, частотных свойствах нейронов, геометрических особенностях их дендритов, изменяемых весах входов, представления о перцептронных схемах, о нейронных ансамблях и сетях с вероятностной и детерминированной структурой, рецепторных полях различного уровня сложности и др. Некоторые из этих представлений получили теоретическое развитие в соответствующих научных концепциях (работы У. Мак-Каллока, М. Минского и С. Пейперта, Н. М. Амосова, А. Б. Когана, В. Д. Глезера и др.). Другие носили в основном характер инженерного поиска, в рамках которого предложено множество моделей нейронов и нейроподобных сетей различного типа.

В последнее время развитие нейробионических разработок было стимулировано роботной проблематикой и проблемами искусственного интеллекта. Эти проблемы порождены потребностями в автоматизации производства с часто меняющейся технологией и ассортиментом выпускаемой продукции, когда условия и цели функционирования автоматических систем заранее не могут быть полностью определены. В бионическом плане эти направления в настоящее время находятся в стадии развития, теоретических и лабораторных разработок. Имеющиеся уже промышленные варианты разработаны традиционными инженерными методами.

Одной из серьезных причин малоэффективности существующих бионических разработок является и то, что используемые данные о биологических прототипах имеют обычно сугубо аналитический характер и оказываются недостаточными. Попытки физиологов восполнить этот недостаток в системных представлениях о целом характере функционирования биологических систем (П. К. Анохин, Л. фон Бергалауфи и др.) носят полемический характер и пока не являются конструктивными.

В поисках принципов адаптивного функционирования автоматических систем возникло еще одно направление, базирующееся на представлениях о самоорганизации. Результаты исследования в этой области появляются спонтанно, поэтому невозможно судить о его истинных достижениях. Существующие представления, по видимому, не выходят за рамки работ, изложенных в двух сборниках [4, 5]. Суть их за редким исключением сводится к тому, что почти все они апеллируют к аналогичным способностям самоорганизующихся систем естественного происхождения. Оценка этих работ и анализ некоторых аспектов проблемы в целом даны в работе [3], а также в других статьях этого сборника.

Анализ литературных источников, в которых обсуждается проблема самоорганизации, свидетельствует о существовании довольно разноречивых представлений. Они лежат в широком диапазоне от приписывания всей природе свойства самоорганизации до полного отрицания его смысла [5, с. 331]. Единодушие здесь можно найти, пожалуй, только в желаниях получить ответы на следующие вопросы: какие принципы лежат в основе гармонического развития природы, почему ее элементы так хорошо «подогнаны» друг к другу; суждено ли творениям человека так же гармонично вписываться в бесконечный процесс самодвижения, или они обречены на вечную зависимость от способностей человека поддерживать и существование, воспроизведение и совершенствование; какие методы познания и творчества использовала природа для создания столь эффективных адаптивных систем, вершиной которых является человек разумный?

Развитие бионических аспектов самоорганизации предполагает наличие результатов кибернетического анализа самоорганизующихся систем естественного происхождения. В литературе эти результаты освещены в настоящее время недостаточно полно. В предлагаемой работе делается попытка в некоторой степени

восполнить этот пробел, причем основное внимание уделяется анализу структуры средств организации взаимодействия различных естественных самоорганизующихся систем (ЕСС) с окружающей средой.

В грандиозном мироздании человек различает множество материальных элементов (атомы, молекулы, вещества, клетки, организмы и т. д.). Все они существуют в составе целостных объектов, переходят из одной системы в другую в процессе взаимодействия последних. В результате обмена происходят изменения состояний систем и их переходы из одной формы существования в другую. Характер этих изменений и переходов не одинаков для систем различной природы.

Для неживых систем характер обменных процессов определяется фактически только вещественно-энергетическими характеристиками взаимодействующих систем. Особенностью такого обмена является спонтанный характер восстановительных процессов и существенное преобладание необратимых переходов. При восстановлении неорганических систем их элементы часто должны пройти через горнила космических и геологических эпох, не всегда обозримых даже теоретически.

Взаимодействие живых систем с окружающей средой определяется не только их вещественно-энергетическими характеристиками, но и информационными. Эта особенность позволяет им обеспечивать себе самостоятельно часть условий существования, избегать необратимых результатов взаимодействия и делать возможным достижение благоприятных условий для восстановительных процессов. Формирование и поддержание условий существования достигается различными путями: изменением собственной структуры, динамических характеристик элементов, их параметров, преобразованием характеристик окружающей среды и др.

В данной работе будут рассмотрены характеристики средств, которыми живые системы обеспечивают себе условия существования. Всех известных представителей с этими способностями можно расположить в ряд по степени их самостоятельности. Нулевую степень самостоятельности имеют, по-видимому, те органические системы, возникновение которых обязано счастливому стечению факторов среды, благодаря которым они появились (аминокислоты, нуклеиновые кислоты и др.). В этом случае все условия их существования должны присутствовать в окружающей среде, автоматически поддерживаться и воспроизводиться ею. Они полностью определяются космическими, геологическими, физико-химическими и другими факторами.

Простейшим из объектов органического мира, который обеспечивает себе часть условий своего собственного существования, является вирус. Он состоит из вещества оболочки белкового происхождения и набора нуклеиновых кислот (НК). Первый компонент взаимодействует с окружающей средой на физико-химическом уровне, и при появлении соответствующих условий (например, попадание в клетку) он растворяется. Далее последовательность со-

бытий определяется структурой второго компонента, набором веществ в протоплазме и условиями внешней среды.

Схематически в интересующем нас плане этот процесс можно представить так. При наличии соответствующих условий среды т. е. определенных веществ клетки, сигнальным образом включаются соответствующие нуклеотиды генетической НК, которые возбуждаются и управляют образованием информационной РНК. Эта последняя поступает на рибосомы и управляет синтезом белков ферментов из аминокислот. НК здесь выступает как управляющая система, работающая по жестким программам синтеза необходимых веществ из вещества клетки с использованием для этого средств последней. Образовавшаяся при этом система специфических белков-ферментов участвует наряду с НК в обеспечении химической координации метаболических процессов клетки, синтеза белков и воспроизведения самой генетической структуры НК. Эта система ферментов является более гибкой управляющей системой, приуроченной к данным специфическим условиям существования вируса. Специфика этой программы определяется текущим набором факторов среды (температура, радиация, состав органических и неорганических веществ и др.).

Таким образом, взаимодействие вируса с окружающей средой 1 (см. схему) обеспечивается биохимическим уровнем его вещества 2, специфической чувствительностью его генетического материала 3, генетической программой 5, совокупностью управляющих воздействий 4 от нуклеотидов генетической НК на вещество клетки в процессе синтеза биополимеров, совокупностью ферментов (способных координировать специфический обмен клетки, образование необходимых веществ и репликацию генетической НК вируса, а также воспроизведение самого вируса. С другой стороны результат взаимодействия определяется текущими параметрами среды 7, которые вместе с параметрами цитоплазмы клетки определяют характер программ шестого уровня.

Итак, уровни 2, 3, 4 и 5 принадлежат самому вирусу. В процессе его взаимодействия со средой второй уровень достраивается за счет деятельности программы 5 и 6 уровней. Уровни 1, и 7 принадлежат среде. Действия первого и седьмого уровней и пятый и шестой являются источником мутаций и преобразования программ, т. е. источником приспособления, адаптации.

К более высокому уровню самостоятельности в обеспечении условий существования принадлежит одноклеточные организмы. Основными их структурно-функциональными компонентами являются мембраны, состоящие из специфических белков, цитоплазма, состоящая из органических и неорганических веществ, и ядро с генетическими структурами. Для жизнедеятельности и размножения клетки необходимы вполне определенные условия окружающей среды и средства их обеспечения 1 (см. схему). Эти условия сводятся в основном к наличию ряда специфических веществ органического и неорганического происхождения, источников энергии, температуры и т. п. Взаимодействие клетки с окружающей средой

на вещественно-энергетическом уровне осуществляется через ограничивающую ее мембрану. Состав и структуру последней обеспечивает регулировка содержимого цитоплазмы.

Взаимодействуя избирательно со средой, мембрана обеспечивает неравномерное распределение специфических ионов и веществ между цитоплазмой и средой. Благодаря этому клетка имеет определенный запас веществ и потенциальной энергии, которые она использует для обмена с внешней средой и управляемых воздействий на нее. Структура мембраны, ее форма и физико-химические характеристики, а также содержимое цитоплазмы обеспечивают взаимодействие клетки со средой на вещественно-энергетическом уровне 2. Характер этого взаимодействия может изменяться благодаря управляющим воздействиям 4 генетической 5 и ферментативной программ 6 на синтез веществ в клетке.

Характер программы 6 как и в предыдущем случае определяется физико-биологическими факторами среды 7. Мембрана имеет чувствительные к различным химическим и физическим раздражителям элементы белковой природы 3, вкрапленные в ее структуру и обеспечивающие ей избирательные реакции на соответствующие сигналы. В частности, благодаря этому клетка может реагировать на определенные раздражители возбуждением, освобождая часть своей потенциальной энергии и воздействуя таким образом на окружающую среду (связь 3—4). Воздействие адекватных раздражителей на эти входы может приводить к электрическому возбуждению клетки (для нейронов), механическому сокращению (мышечные волокна) и секреции биоактивных веществ (железы). Эти выходы обеспечивают управляемые воздействия 4 клетки на среду. Благодаря функционированию генетических и ферментативных комплексов структура мембраны и ее рецептивные участки могут перестраиваться, что обеспечивает адаптивное функционирование клетки.

Таким образом, для эффективного обеспечения условий существования клетка имеет собственные 2, 3, 4, 5 и 6 уровни средств организации взаимодействия со средой. Адаптивные свойства клетки в онтогенезе обеспечиваются перестройкой 2, 3, 4 и 6 уровней. Шестой формируется под действием факторов внешней среды на клетку. Остальные перестраиваются пятым и шестым. Пятый формируется в филогенезе. Все остальные условия существования клетки, связанные с сохранением характеристик физических, химических и других средств, а также параметров окружающей среды обеспечиваются самой средой обитания.

На следующем уровне автономности находятся многоклеточные организмы. Клетки в организме имеют строгую специализацию и по этому принципу объединены в различные структурно-функциональные единицы — ткани и органы (эпителиальная, мышечная, соединительная, нервная, репродуктивная ткани; сердце, печень, легкие, желудок, кости и т. д.), Ткани и органы объединены в более сложные единицы — системы органов (кровообращения, дыхания, пищеварения, скелетная система и т. д.).

Результаты взаимодействия организма со средой определяются вещественно-энергетическими особенностями его тела 2 (см. схему) и окружающей среды 1, эффекторикой 4 и управляемой организацией их функционирования, осуществляемой с помощью сенсорики 3, генетической, инстинктивной, эндокринной, гуморальной системами 5 уровня, условнорефлекторной системой 6 и психикой 7 для высших животных. Все эти системы с различной степенью готовности возникают в процессе онтогенеза в пре- и постнатальный период.

Сразу же после рождения организм животного имеет определенное число инстинктивных реакций, обеспечивающих ему адекватное взаимодействие с окружающей средой. Они базируются на врожденных жестких связях сенсорных и эффекторных комплексов через нервную систему. Система этих связей обеспечивает инвариантность результатов взаимодействия организмов со средой только в том случае, если в среде существуют факторы, поддерживающие определенные параметры — температуру, влажность, состав химических и биологических веществ, уровни различных излучений в допустимых для жизни границах и др. До определенного возраста необходимые условия поддерживаются жизнедеятельностью других организмов, в том числе и родителей, или временными благоприятными условиями самой внешней среды. Это означает, что механизм шестого уровня организации взаимодействия системы и среды находится в этом случае в среде.

К моменту изменения этих условий в среде в организме должны созреть собственные возможности для обеспечения существования в новых условиях. Некоторые организмы при этом могут изменять свою собственную природу и переходить в другие стадии развития (личинки, куколки и т. п.); другие организмы включают программы выработки соответствующих защитных веществ (растения и т. п.). Но все подобные механизмы не вырабатываются этими организмами в процессе онтогенетического развития, а запрограммированы генетически.

У человека и высших животных время до наступления изменений в окружающей среде используется для выработки новых приспособительных программ поведения в окружающей среде. Материальной основой для этого является нервная система. Жесткие врожденные безусловнорефлекторные связи пятого уровня при этом обогащаются условными, приуроченными только к данным конкретным условиям. Они образуют шестой уровень средств организации взаимодействия организма со средой. Таким образом в многоклеточных организмах в данном случае шестой, адаптивный уровень принадлежит системе и формируется ею в процессе индивидуального функционирования.

Из совокупности условнорефлекторных программ, их элементарных структурно-функциональных единиц и способов их формирования, а также соответствующей им информации о внешней среде и ее изменениях в результате их реализаций формируются элементы психического уровня 7 организации взаимодействия сист

мы и среды. Высшей формой проявления этого уровня является сознание. Этот уровень организации формирует новые программы управления взаимодействием организма со средой только в новых, ранее не встречавшихся условиях. В готовом виде эти программы проявляются на шестом уровне. Содержание седьмого уровня может определяться не только опытом данного организма, но и опытом других, получаемом через информационные системы.

Каждый уровень организации взаимодействия может входить в определенные функциональные гомеостатические системы и сам быть объектом их управления. Например, управление может состоять в выработке такой совокупности воздействий на среду и систему, которая обеспечивает постоянство некоторых их параметров, состава вещества, или таких процессов в нервной системе, которые поддерживали бы целостность, постоянность восприятий, адекватную настройку рецепторики и эффекторов и обеспечивали надежность функционирования программ пятого и шестого уровней. Благодаря наличию седьмого уровня организм приобретает неограниченные возможности формировать новые программы, усовершенствовать средства организации управления как собственные, так и принадлежащие среде.

Схематический анализ примеров самоорганизующихся систем закончим самым последним, пожалуй, достижением природы в этом отношении, имеющим социальную природу. Достижение определенного результата любым коллективом людей всегда начинается с какой-либо производственной операции каждого его члена с помощью имеющихся у них орудий труда 2 (см. схему). Их поведение состоит из множества определенных действий 4, направленных на преобразование предметов труда 1 и орудий производства 2, на организацию измерительной техники, наблюдений и средств регистрации их результатов 3.

Эта деятельность должна сопровождаться вполне определенными благоприятными условиями, которые обеспечиваются средствами внешней среды 1. Вся совокупность операций, которая совершается в процессе достижения данного результата, представляет собой первую программу, по которой начал работать коллектив в данных условиях. В процессе этой деятельности характер операций и средства производства могут усовершенствоваться и изменяться в связи с конкретными изменяющимися условиями производства. Это ведет к образованию множества программ, приуроченных к некоторым конкретным условиям. Множество этих программ и операций образует шестой уровень организации взаимодействия социальной системы со средой. Образование этого уровня обеспечивается наличием специальных исследовательских и научных комплексов (уровень 7), которые разрабатывают более эффективные способы и средства организации производства.

Из предыдущих примеров можно видеть, что тенденция в эволюции самоорганизующихся систем шла в сторону увеличения независимости, автономности организмов от условий среды путем увеличения числа средств организации взаимодействия и измене-

ния их качества. В развитой психике человека эволюция демонстрирует, по-видимому, свое последнее достижение в этом отношении.

С развитием коллективных способов и средств взаимодействия социальных групп со средой можно наблюдать тенденцию, обратную рассмотренной выше. В самом деле, с развитием технологии сначала вещественно-энергетический уровень систем стал приобретать статус условий естественной среды, например, в виде культуры сельского хозяйства (растения, домашние животные), в виде искусственно созданных энергетических систем, веществ, одежды, жилищ и т. п. Здесь общество еще оставляет за собой функции контроля, управления, разработки и внедрения новых программ технологии и т. п., т. е. 3, 4, 5, 6, 7 уровни. С развитием автоматизации сначала переходят 3, 4 и 5 уровни, которые реализуются в конструкциях автоматов с жесткими программами. Затем появляются системы управления со сменными программами, принимая на себя шестой уровень. В последнее время развиваются средства автоматизации и седьмого уровня, призванные решить задачу автоматической разработки адаптивных программ для шестого уровня и целеобразования. Таким образом, в этой тенденции естественная природа получает возможность организованного и целесообразного с точки зрения человека развития. Эти тенденции находят воплощение в теории и практике АСУ, а также в разработке автономных адаптивных систем и в частности роботов.

Что же дает нам для решения этих задач проведенный схематический, крайне упрощенный анализ самоорганизующихся систем естественного происхождения? В начале анализа мы исходили из предположения, что в процессе эволюции были отобраны такие самоорганизующиеся системы, жизнедеятельность которых эффективна именно в данных земных условиях, т. е. их вещественно-энергетические характеристики, элементный состав, структура, организация способов и средств взаимодействия со средой и т. п. уже отобраны и эффективность их доказана на практике. В связи с этим такой успешный опыт эволюции мог бы быть использован для решения аналогичных задач при разработке технических систем. Поскольку анализу были подвергнуты в основном состав и структура средств организации адаптивного взаимодействия системы со средой, то обсуждения и выводы будут касаться только этих свойств самоорганизующихся систем.

Во всех рассмотренных выше примерах самоорганизующаяся система достигает определенного результата взаимодействия со средой только при наличии соответствующих условий и средств их обеспечения, содержащихся в данной среде. Вирус может реализовывать свои программы только в том случае, если он находится в цитоплазме клетки; одноклеточные организмы — при наличии в среде соответствующих веществ, температуры и т. д.; многоклеточный организм предъявляет уже менее жесткие требования к среде обитания, обеспечивая себе определенные запасы питательных веществ и т. п.; социальные системы еще менее критичны

к внешним условиям, но как и все предыдущие, они нуждаются в определенных природных ресурсах, климатических условиях и т. п.

Во всех этих случаях средства организации взаимодействия и обеспечения жизнедеятельности распределены между средой и системой. Отсюда можно сделать такой вывод: о самоорганизующейся системе можно говорить только как о части некоторой более общей системы, например, организм—среда. Этот вывод подтверждает представления Эшби о самоорганизации, полученные им в результате логического анализа данного понятия: «Только в этом частном и строго определенном смысле мы можем признать, что система является «самоорганизующейся», не будучи одновременно и «самопротиворечивой» [3, с. 331]. Степень автономности системы и ее качество в этом плане можно оценить количеством и типом присущих ей самой средств и способов обеспечения условий жизнедеятельности.

Во всех рассмотренных примерах самоорганизующихся систем естественного происхождения они только в процессе взаимодействия со средой начинают приобретать средства, обеспечивающие им определенную степень автономности. В процессе функционирования вирусной программы формируется ферментный уровень организации взаимодействия 6 и соответствующий строительный материал 2 из первичного вещества цитоплазмы чужой клетки.

Клетки и многоклеточные организмы, имея до начала взаимодействия со средой в законченном виде фактически только генетические комплексы, безусловные программы и средства их реализации вещественно-энергетические 2, сенсорные 3 и эффекторные образования 4, в процессе взаимодействия со средой формируют новые средства, эффективные в данных конкретных условиях среды. Клетки формируют уровень адаптивных программ 6, а сложные организмы кроме этого и более совершенные средства их организации — психику, интеллектуальные способности 7.

Аналогичные выводы можно сделать и в отношении социальных систем. Здесь кроме желания иметь результат члены социальной группы должны обладать некоторыми производственными навыками, умением взаимодействовать с предметами и орудиями труда, а также друг с другом. Начальная совокупность этих способностей реализуется в производственных операциях и составляет содержание программы первоначального функционирования 5. В процессе деятельности изменяются и совершенствуются способы и средства 4 управляемого воздействия на среду, орудия труда и энергооборуженность 2, способы и средства организации наблюдений и измерений 3, возникают более совершенные и гибкие программы управления в изменяющихся условиях 6 и накапливается социальный опыт организации производства 7.

Таким образом, для всех рассматриваемых здесь самоорганизующихся систем естественного происхождения мы можем сделать вывод о том, что все они закладываются и возникают в виде определенных, фактически одинаковых для всех, начальных структур

с потенциальными возможностями, которые разворачиваются и превращаются в процессе взаимодействия со средой в самоорганизующиеся системы. Важной особенностью таких начальных структур является то, что развитие каждой из них приурочено только к среде с определенными характеристиками, которые она может «узнать» через рецепторные свойства 3 своего субстрата 2 и проявить действие 4 своей программы 5 на окружающую среду 1 (см. схему).

Для всех этих схем характерным является то, что в процессе развития самоорганизующейся системы формируются только те средства, которые необходимы для достижения адекватного взаимодействия со средой в процессе достижения какого-либо результата. В случае вируса это проявляется в виде конкретного состава вырабатываемых ферментов и биополимеров, необходимых для воспроизводства в условиях данной цитоплазмы. Клетки многоклеточных организмов специализируются в процессе эмбриогенеза. Средства их жизнеобеспечения могут быть в одних случаях сильно редуцированы, а в других — гипертрофированы, усилены для выполнения специфических функций в организме.

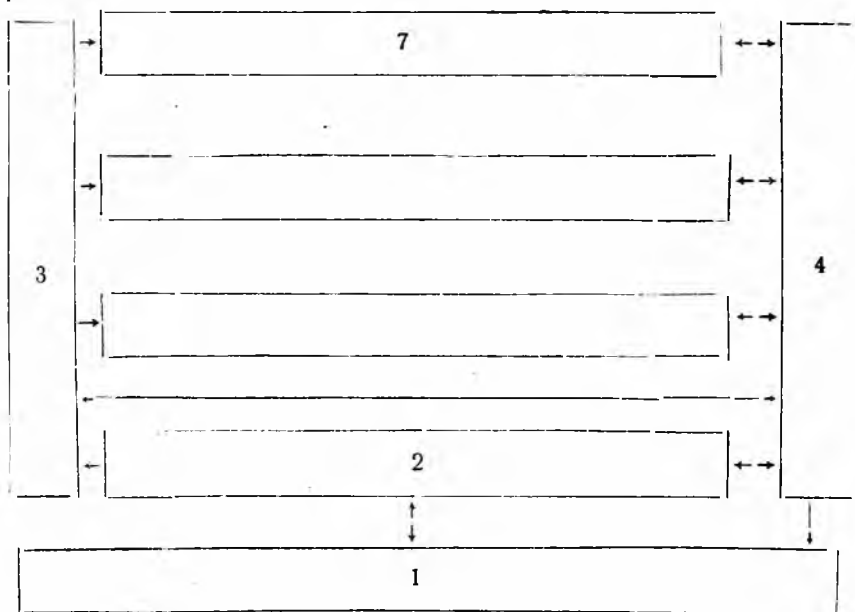
Например, эритроциты в этой связи не имеют ядра и имеют много гемоглобина, нервные клетки имеют характерные геометрические формы и способность передавать электрическое возбуждение и т. д. Организмы в процессе эволюционного отбора приобретают или развивают те качества, которые способствуют их гармоническому отношению со средой в процессе обеспечения жизнедеятельности. У различных животных к моменту рождения созревают только те функциональные системы, которые обеспечивают ему выживание в условиях родительской опеки.

Исследования П. К. Анохина на эмбриональном уровне показали, что созревают и включаются в функциональную систему не все компоненты одновременно, а несколько структурных единиц, но так, что они готовы объединиться в какую-то минимальную, не совершенную, но тем не менее архитектурно полную функциональную систему [1, с. 95]. Человек в процессе онтогенеза приобретает определенную совокупность социально значимых ролей. Какой-либо социальный производственный коллектив тоже специализируется на выпуске определенной продукции и т. д.

Анализируемое свойство очень важно с точки зрения механизмов консолидации, объединения этих элементов в адаптивные системы. Логически этот процесс можно представить следующим образом. Характеристики среды и развивающихся элементов самоорганизующейся системы всегда представлены неравномерно в пространственно-временном континууме. В силу этого каждый элемент будет развивать или проявлять те средства организации взаимодействия, которые дополняют уже существующие в его окружении до той полноты, которая обеспечивает достижение необходимого данному элементу результата взаимодействия.

Из предыдущего анализа рассмотренных примеров самоорганизующихся систем следует вывод, что организация управления:

взаимодействием между автономными системами и средой обеспечивается одной и той же структурой функциональных средств, распределенных между системой и средой. В обобщенном варианте структурно-функциональная схема элементов и средств самоорганизации имеет такой вид:



На схеме цифрами обозначены уровни организации средств взаимодействия системы со средой, а стрелками — действия этих уровней друг на друга: 1 — всевозможные средства организации воздействий среды на систему; 2 — уровень организации, характеризующий вещественно-энергетические особенности субстрата системы; 3 — сенсорно-измерительный уровень получения, преобразования и передачи информации о состояниях среды и системы; 4 — эффекторный уровень управляемого воздействия системы на среду и функциональных систем друг на друга; 5 — уровень жестких врожденных программ управления; 6 — уровень адаптивных программ организации взаимодействия; 7 — уровень формирования и отбора адаптивных программ для шестого уровня.

Все эти уровни состоят из множества функциональных элементов и блоков. В среде — это органические и неорганические вещества, климатические условия, социальные, геологические и космические факторы и т. п. В системе — это вещественно-энергетические, физические, геометрические, биологические и другие факторы, т. е. природа тела системы, а также сенсорные, эффекторные и информационные управляющие блоки. Организация этих средств при достижении какого-либо результата в процессе взаимодействия системы и среды осуществляется путем их объединения в функциональные системы и взаимной координацией последних. Характер

воздействий элементов и блоков друг на друга в функциональных системах определяются вещественно-энергетическими (например, 1—1, 1—2, 2—2, 2—3, 2—4, 4—1, 4—3 и др.) и информационными (например, 1—3, 2—3, 3—5, 3—6, 6—6, 7—7 и др.) свойствами связей.

Функциональные системы обеспечивают условия достижения результата при взаимодействии организма и среды. Функциональная система, согласно учению П. К. Анохина, является единицей интегративной деятельности целого организма. Она представляет собой конкретный физиологический аппарат саморегуляции и гомеостазиса. Она осуществляет избирательное вовлечение и объединение структур и процессов на выполнение какого-либо очерченного акта поведения или функции организма [1, с. 212].

В процессе достижения какого-либо результата функциональной системой условия внешней среды и характеристики самой системы могут изменяться. В связи с этим функциональные системы должны иметь возможность оперативно перестраиваться и оказывать соответствующие влияния друг на друга, чтобы обеспечивать адаптивный характер функционирования организма в изменяющейся среде. В этом случае мы вправе говорить об инвариантности результата по отношению к изменяющимся воздействиям системы и среды друг на друга. Это представление вытекает непосредственно из понятия результата как системообразующего фактора, введенного П. К. Анохиным [12], и является его расширением, так как позволяет говорить не только о данной функциональной системе, замкнутой на данный результат, а о любом из числе и типе, которые могут включаться в процессе его формирования. В этих представлениях не исключаются также и условия среды, влияющие на формирование результата.

Таким образом, понятие инвариантности результата позволяет говорить не только об образовании некоторой функциональной системы, жестко приуроченной к достижению данного результата, но и о самоорганизации функциональных средств системы, которой принципиально чужда жесткая структура. Инвариантность результата определяет критерий качества объединения средств организации и управления в функциональные системы, а также степени их взаимной координации.

Развиваемые здесь обобщенные представления о структуре средств организации адаптивного взаимодействия системы со средой в процессе достижения какого-либо результата позволяют осуществить системный анализ взаимодействующих системы и среды с точки зрения самоорганизации уже на более высоком уровне когда элементами самоорганизации являются всевозможные функциональные системы, сложившиеся в фило- и онтогенезе, а также их информационные отображения на седьмом уровне обобщенной схемы. Следующая таблица дает представление о некоторых функциональных системах и комплексах, которые могут возникать при взаимодействиях самоорганизующейся системы со средой в процессе достижения какого-либо результата. В первой графе записа

ны воздействия одного уровня на другой, во второй — всевозможные функциональные системы и образования, через которые различные уровни могут влиять друг на друга.

I	II
1-1	1-1, 1-2-1, 1-3-5-4-1, 1-3-4-1, 1-3-6-4-1, 1-3-7-4-1
1-2	1-2, 1-3-4-2, 1-3-5-4-2, 1-3-6-4-2, 1-3-7-4-2
1-3	1-3, 1-2-3, 1-2-4-3
1-4	1-2-4, 1-3-4, 1-3-5-4, 1-3-6-4, 1-3-7-4
1-5	1-2-4-5, 1-2-3-5, 1-3-5
1-6	1-2-4-6, 1-2-3-7, 1-3-7
1-7	1-2-4-7, 1-2-3-7, 1-3-7
2-1	2-1-2-4-1, 2-3-4-1, 2-3-5-4-1, 2-3-6-4-1, 2-3-7-4-1
2-2	2-1-2, 2-3-4-2, 2-1-3-4-2, 2-1-3-5-4-2, 2-3-6-4-2, 2-2
2-3	2-3, 2-4-3, 2-1-3
2-4	2-4, 2-1-3-4, 2-1-3-5-4, 2-1-3-6-4, 2-3-4, 2-3-6-4
2-5	2-4-5, 2-3-5, 2-1-3-5, 2-4-3-5,
2-6	2-4-6, 2-3-6, 2-1-3-6, 2-4-3-6
2-7	2-4-7, 2-3-7, 2-1-3-7, 2-4-3-7
3-1	3-4-1, 3-4-2-1, 3-5-4-1, 3-5-4-2-1, 3-6-4-2-1
3-2	3-4-2, 3-4-1-2, 3-5-4-2, 3-5-4-1-2, 3-6-4-2-2, 3-6-4-2
3-3	3-4-3, 3-4-2-3, 3-4-1-3, 3-5-4-3, 3-5-4-2-3, 3-6-4-1-3
3-4	3-4, 3-5-4, 3-6-4, 3-7-4
3-5	3-5, 3-6-4-5, 3-4-5
3-6	3-6, 3-4-6, 3-5-4-6, 3-7-4-6
3-7	3-7, 3-4-7, 3-5-4-7, 3-6-4-7
4-1	4-1, 4-2-1
4-2	4-2, 4-1-2
4-3	4-3, 4-1-3, 4-2-3, 4-1-2-3, 4-2-1-3
4-4	4-4, 4-3-4, 4-2-3-4, 4-1-3-5-4, 4-2-3-6-4, 4-1-3-7-4
4-5	4-5, 4-3-5, 4-1-3-5, 4-1-2-3-5, 4-2-3-5, 4-2-1-3-5
4-6	4-6, 4-3-6, 4-2-1-3-6, 4-2-1-3-6, 4-1-3-6, 4-1-2-3-6, 4-2-3-6
5-1	5-4-1, 5-4-2-1
5-2	5-4-2, 5-4-1-2
5-3	5-4-3, 5-4-1-3, 5-4-2-3, 5-4-2-1-3, 5-4-1-2-3
5-4	5-4
5-5	5-5, 5-4-3-5, 5-4-2-3-5, 5-4-1-3-5, 5-4-2-3-6-4-5
5-6	5-4-3-6, 5-4-2-3-6, 5-4-1-3-6, 5-4-1-3-7-4-6
5-7	5-4-1-3-7, 5-4-2-3-7, 5-4-3-7
6-1	6-4-1, 6-4-2-1
6-2	6-4-2, 6-4-1-2
6-3	6-4-3, 6-4-1-3, 6-4-2-3, 6-4-2-1-3, 6-4-1-2-3
6-4	6-4
6-5	6-4-3-5, 6-4-2-3-5, 6-4-1-3-5
6-6	6-6, 6-4-3-6, 6-4-2-3-6, 6-4-1-3-6
6-7	6-4-3-7, 6-4-2-3-7, 6-4-1-3-7, 6-4-1-2-4-7
7-1	7-4-1, 7-4-2-1
7-2	7-4-2, 7-4-1-2
7-3	7-4-3, 7-4-1-3, 7-4-2-3, 7-4-1-2-3, 7-4-2-1-3
7-4	7-4, 7-4-3-6-4, 7-4-1-2-4
7-5	7-4-5, 7-4-3-5, 7-4-1-3-5, 7-4-2-3-5, 7-4-1-2-4-5
7-6	7-4-6, 7-4-3-6, 7-4-1-3-6, 7-4-2-3-6, 7-4-1-2-4-6
7-7	7-7, 7-4-3-7, 7-4-2-3-7, 7-4-1-3-7, 7-4-1-2-4-7.

Из этой таблицы видно, что некоторый результат может быть достигнут благодаря работе одной из функциональных систем или некоторой их совокупности. Например, если результатом является определенное изменение состояний элементов первого уровня, то

оно может быть достигнуто такими путями: 1—1, 2—3—4—1 и т. д. т. е. теми функциональными системами из таблицы, которые заканчиваются единицей. При этом должны быть соответствующими состояния элементов других уровней и пересекающихся функциональных систем. Поскольку взаимодействие системы и среды должно обеспечивать инвариантность результата, то функциональные системы должны объединять элементы различных уровней во взаимодействующее множество элементов адаптивной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М. «Медицина», 1968. 547 с.
2. Анохин П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. М., Изд-во АН СССР, 1971. 61 с.
3. Коган А. Б. Самоорганизация как ведущий принцип адаптивного управления. — В сб.: Проблемы адаптивного управления. Ростов-на-Дону, Изд-во РГУ 1974, с. 3—12.
4. Самоорганизующиеся системы. Сборник статей. М., «Мир», 1964. 435 с.
5. Эшби У. Р. Принципы самоорганизации. — В сб.: Принципы самоорганизации. М., «Мир», 1966, с. 314—343.

УДК 62.506.2

Ю. П. БУГАЙ, канд. техн. наук

СВОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ И БИОНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ 5. СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ С НАЧАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

При чувственном отображении объективной реальности субъект выделяет в ней такие элементы как объекты, процессы, события, их свойства и отношения. Будем предполагать, что способность расчленять реальность на перечисленные выше и другие элементы действительности является одной из важнейших особенностей отображающей деятельности субъекта.

В отличие от этого на низших уровнях отображение может быть предельно свернутым, редуцированным, не расчленяющим реальность на объекты, свойства и отношения. Так, один материальный объект дан другому (существует для другого) не иначе как в форме изменения этого другого объекта под действием первого. Процесс соответствующего изменения второго объекта под действием первого есть процесс отображения, который в соответствии с предложенной ранее классификацией* был обозначен как объектно-объектное отображение. При таком отображении перечисленные элементы действительности сливаются в одно целое. Эту нерасчлененность и «некомпетентность» объектно-объектного отображения необходимо учитывать при анализе и синтезе искусственных систем отображения.

* Бугай Ю. П. Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение 4. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 15. Харьков, 1975, с. 123—130.

Для расширения своих возможностей в обработке больших потоков информации и данных, непосредственно не воспринимаемых без предварительного преобразования в приборах, человек вынужден строить искусственные системы отображения (ИСО). Если результат работы ИСО предназначен непосредственно для человека, то этот результат должен быть представлен в естественной для человека форме, в виде структуры, включающей перечисленные выше СЭД.

В основу построения систем искусственного интеллекта, работающих на бионических принципах, должны быть, по нашему мнению, положены системы отображения с достаточно высокой начальной организацией. Атрибутом этой организации предполагается способность искусственных систем оперировать широким набором субъективных элементов действительности. Исследуемая ситуация представляется субъекту тем более сложной, чем разнообразнее элементы действительности.

При анализе свойств отображения появляется необходимость вводить достаточно четкие критерии сложности, уровня организации, реальных объектов и систем в отображаемом, отображающем и отображенном. Если предположить, что уровень организации — это некоторая многопараметрическая характеристика, включающая описание объектов, процессов, событий, отношений и свойств реальной системы, исследуемой на некотором уровне разрешения, то оказывается, что в настоящее время только естественный язык в какой-то мере пригоден для введения такой характеристики. Ни в одной из существующих наук, уделяющих специальное внимание анализу структуры исследуемых объектов, элементам этих объектов и отношениям между ними, нет необходимого арсенала четко определенных понятий, с помощью которых можно было бы провести формальное описание широкого класса реальных объектов и ситуаций с такой полнотой, как это необходимо в задачах отображения.

Но естественный язык в обычном виде не пригоден для формального описания реальных объектов и ситуаций, а без формализации описания становится невозможной физическая реализация или какая-нибудь другая интерпретация систем отображения, представляющих практический интерес. Единственным выходом является, вероятно, создание формализованного естественного языка, пригодного для выполнения своих функций на всех этапах анализа и синтеза систем.

Совершенно ясно, что такой язык не может возникнуть сразу, но его можно и нужно формировать сознательно. Формирование такого языка естественно осуществлять как на основе чувственного опыта отображения действительности человеком, так и на базе опыта построения формализованных языков. Этот язык должен быть пригоден для описания любых ситуаций, в том числе и желаемых, целевых ситуаций и состояний систем, и для описания способов перевода систем в необходимое конечное состояние.

Наиболее сложным этапом в процессе формализации любого языка является выбор исходных понятий, которые не подлежат какому-либо другому определению, кроме остенсивного, апеллирующего к интуиции и индивидуальному чувственному опыту, через указание на примеры. Но прежде чем переходить к более детальному анализу особенностей чувственного восприятия человека, лежащих в основе формирования первичных понятий естественного языка, рассмотрим некоторые общие особенности отображения субъектом окружающей действительности.

Общие особенности отображения реальности субъектом

Последовательное применение используемого нами положения о необходимости проведения различных рассуждений в сфере различных форм существования требует, чтобы все, что может существовать, рассматривалось с точки зрения конкретной формы существования. При анализе разнообразных форм отображения недостаточно утверждать, что объекты, свойства и отношения существуют. Перечисленные элементы действительности вообще невозможно эффективно различать без указания на объективный или субъективный характер их существования. Например, свойства и отношения могут быть рассмотрены как идеальные объекты, обладающие свойствами и способностью вступать в отношения в отображенном. Эти новые свойства абстрактных объектов, так же как и новые отношения, снова могут быть рассмотрены как объекты нового уровня абстракции и т. д. Но свойства и отношения рассматриваемые как объекты, — это уже другие, идеальные объекты, и свойства этих идеальных объектов — идеальные свойства. Различие материальных и идеальных объектов, материальных и идеальных свойств не может быть установлено в рамках существования вообще. Учитывая сказанное, будем рассматривать не свойства и отношения вообще, а, например, свойства объектов (неживой природы) для таких же объектов, свойства материальных объектов для субъекта, отношения материальных или идеальных объектов для субъекта и т. д. для каждой формы существования и отображения отдельно.

Субъект всегда рассуждал о свойствах объектов, исходя из некоторого интуитивного представления о свойстве. Под свойством материального объекта для субъекта в наиболее распространенном смысле понимают нечто принадлежащее внешнему объекту, непосредственно или косвенно (например, через приборы) вызывающее у субъекта появление соответствующей особенности (особенностей) ощущения, но не зависящее от факта существования относительно субъекта. При этом предполагается возможность пренебрегать обратным влиянием субъекта или прибора на объект. Но, как теперь твердо установлено, такое представление о свойстве имеет ограниченную применимость. Там, где имеет место существенное взаимное влияние субъекта или прибора на объект, нельзя говорить о свойстве объекта в чистом виде. Во взаимодействии

возникает система прибор — объект и говорить нужно уже о свойствах всей системы в целом. В существенном взаимодействии элементов при возникновении системы возникают и свойства этой системы, которых не было у ее компонентов.

Выясним, что лежит в основе представлений субъекта об объектах, процессах, событиях, свойствах и отношениях.

Основные элементы объективной реальности даны субъекту косвенно, через его ощущения. Субъекту непосредственно доступны его внутренние состояния, возникающие под действием внутренних и внешних факторов, — ощущения субъекта. Пользуясь этими непосредственными знаниями своих ощущений, субъект опосредствует для себя элементы внешнего мира. В соответствии со спецификой его отображающих структур субъект имеет ограниченный набор качественно различных ощущений, модальностей ощущений.

Ощущения классифицируются либо по анатомическому признаку, указывающему какой орган воспринимает раздражитель (глаз, ухо), либо в соответствии с физической характеристикой раздражителя (механорецепция, хеморецепция, фоторецепция), либо по локализации раздражителя во внешней или внутренней среде организма (экстерорецепция, интерорецепция), либо по характеристике ощущений (зрительные, слуховые, вкусовые, обонятельные) [1, с. 17]. Хотя единой общепринятой и обоснованной классификации в настоящее время еще нет, можно выделить такие основные виды ощущений: зрение, слух, вкус, обоняние, осязание, терморецепция, проприорецепция (мышечно-суставная чувствительность), интерорецепция, вестибулярная чувствительность, ощущение боли и т. д.

Рассмотрим некоторые особенности ощущений, непосредственно доступные субъекту. Субъект с нормально развитыми ощущениями легко различает их по модальности (светлое, теплое, горькое и т. д.), по интенсивности (холодное, теплое, горячее), по длительности и протяженности в пространстве, по характеру изменения интенсивности. Субъекту доступно фиксировать возникновение (начало) и исчезновение (окончание) ощущения — границы ощущения во времени и пространстве. Благодаря памяти субъект отличает ощущения прошлые и настоящие, длительные и кратковременные.

Выделим основные компоненты содержания одномодального ощущения субъекта (и соответствующего этому ощущению понятия) — элементы ощущений, их особенности и отношения.

К *элементам* ощущения можно отнести: 1) начало (возникновение) ощущения во времени; 2) существование ощущения (факт наличия ощущения); 3) окончание ощущения (исчезновение) во времени.

Особенности ощущения: 1) модальность, 2) интенсивность, характер изменения интенсивности, 3) продолжительность (длительность) ощущения, 4) пространственная протяженность (одновременное наличие ощущения в различных местах пространственно

протяженного анализатора), 5) непрерывность (или прерывность) ощущений и т. д.

Отношения между элементами и особенностями ощущений: 1) начало ощущения раньше окончания ощущения, 2) интенсивность одного отдельного ощущения больше (меньше) интенсивности другого той же модальности, 3) изменение интенсивности быстрее (медленнее).

Особое значение в специфическом разбиении субъектом реальности на субъективные элементы действительности имеют упомянутые выше «начало» и «окончание» ощущений, которые играют роль границ ощущений. Границы ощущений различного рода являются одним из необходимых компонентов представления субъекта об объекте.

Наряду с рассмотренной способностью субъекта расчленять реальность на субъективные элементы действительности, необходимо отметить его способность отделять себя от этой реальности. Субъект в той или иной степени осознает себя как особый объект. Для высокоорганизованного субъекта говорят о его способности выделять свое собственное «Я» из остального мира. Сформировавшемуся субъекту свойственно отличать свои ощущения от их внешнего источника. Таким образом, «Я» субъекта является еще одним важнейшим и необходимым элементом рассмотренных выше субъективных элементов действительности. Представление субъекта о внешнем мире (субъектная модель этого мира) — есть структура, включающая в качестве необходимого элемента «Я» субъекта.

Сделаем предварительные выводы относительно происхождения представлений субъекта об объектах, свойствах и отношениях. Особенности ощущений, отнесенные к внешнему источнику без учета его пространственно-временных границ, составляют основу представлений субъекта о *свойстве* внешнего. При этом предполагается возможным возникновение представления о свойстве внешнего без возникновения представления о существовании локализованного в пространстве и во времени отдельного объекта. Субъект может испытывать ощущение тепла, света, тяжести и т. п., не имея возможности соотнести эти ощущения каким-либо локализованным в пространстве и во времени объектам. Если условия восприятия таковы, что субъект может выделить в пространстве и во времени границы ощущений, т. е. установить в пространстве и во времени место и момент возникновения и исчезновения ощущения, то у него появляется основа для возникновения представления об *объекте*.

Имея представление о свойстве и объекте, субъект может соотносить свойства и отдельные объекты, т. е. получить представление о *свойстве объектов*.

Анализаторы субъекта и процессы, в них протекающие, представляют собой некоторые структуры, упорядоченные в пространстве и во времени. Эти особенности отображающих структур субъекта определяют его способность непосредственно воспринимать (подробнее об этом будет сказано ниже) некоторые простейшие

отношения, такие как отношения порядка в пространстве, отношения порядка при различении интенсивностей ощущений (больших, меньших), отношения равенства интенсивностей ощущений и т. д.

Можно предположить, что источником представления субъекта об отношении объектов является именно его способность непосредственно воспринимать свойство системы двух, трех и более объектов. Отношение объектов для субъекта отличается от свойства отдельного объекта для субъекта тем, что отношение — это свойство нескольких объектов системы, не присущее каждому объекту в отдельности. Такая интерпретация отношений объектов для субъекта, по крайней мере, внешних материальных объектов, представляется нам конструктивной, так как помогает понять возможный способ восприятия субъектом отношений реальности через непосредственно доступные субъекту особенности ощущений, через свойства пар, троек, энок внешних объектов.

Интересно отметить, что при определении математического понятия «отношение» (см. сообщение 4 настоящей работы) в явном виде присутствует апелляция к таким способностям субъекта: различать отдельные объекты, свойства этих объектов, множества объектов, подмножества объектов, пары, тройки и энки объектов, различать упорядоченность элементов в паре, выделять подмножество пар на их множестве [2, с. 14]. В этом смысле известное математическое определение отношения абстрактных математических объектов более походит на констатацию ряда способностей субъекта. Постулируемая способность субъекта выделять подмножество пар на их множестве как необходимый момент в определении отношения предполагает способность субъекта определять по характеристическому свойству пары ее принадлежность к подмножеству пар данного отношения, т. е. предполагается способность субъекта непосредственно воспринимать свойство пары.

Итак, все, что субъект узнает о внешнем мире в процессе его непосредственного отображения, приходит к нему через особенности ощущений. Если субъект относит эти особенности к нерасчлененному на элементы внешнему, то в нем формируется представление о свойстве отображаемого как целого, в котором еще не выделены отдельные объекты. Если субъект относит особенности своих ощущений к элементам внешнего, имеющим пространственно-временные границы, данные субъекту через элементы его ощущений, у него возникает представление об отдельном внешнем объекте. Благодаря наличию памяти субъект может выделять поочередно несколько объектов и множество этих объектов. Воспринимая через особенности ощущений свойства пар, троек и т. д. объектов, данных ему в памяти или непосредственно, субъект получает возможность сформировать представление об отношении как свойстве группы объектов.

Рассмотренные особенности отображения реальности субъектом должны быть учтены при построении бионических искусственных систем отображения (БИСО). Такие системы должны подобно субъекту обладать способностью выделять в отображенном свой-

ства, объекты и отношения. Но как уже отмечалось выше, в структуру представлений субъекта об элементах действительности входит в качестве необходимого элемента «Я» субъекта. Субъект четко разделяет действительность на все, что относится к его собственному «Я» и на все остальное, «не — Я». Поэтому содержание представления субъекта, например, о внешнем материальном объекте можно описать следующим образом: материальный объект — это нечто вне меня (нечто принадлежащее «не — Я»), что вызывает соответствующие особенности моих ощущений (обуславливая особенности моих ощущений), имеет определенные пространственно-временные границы, существующее независимо от моего восприятия как нечто устойчивое целое. Независимость свойств внешних объектов и самого существования объекта от условий наблюдения справедлива, как отмечалось выше, лишь при несущественном влиянии субъекта (прямом или косвенном, через приборы) и отображаемые элементы действительности.

В приведенном примере описания представления субъекта о внешнем материальном объекте обращает на себя внимание сложная структура представления субъекта об объекте. От субъекта требуется умение оперировать отношением принадлежности обусловленности, способность выделять пространственно-временные границы ощущений и т. д., в то время как представление о внешнем материальном объекте только формируется. Однако мы предполагали, что представление об отношении формируется на основе возникшего представления о свойстве группы объектов. Еш раз в связи с этим необходимо напомнить, что без точной дифференцировки элементов действительности по форме их существования практически невозможно однозначно сказать, чем являются для субъекта (объектами, свойствами или отношениями) те или иные структуры в отображенном. К этому необходимо добавить, что объекты для субъекта существуют и на уровне представления, и на уровне воображения.

Отображение на уровне восприятия завершается формированием целостной системы ощущений в единый интегральный образ соответствующей части отображаемого. Образ, сохраняемый в памяти субъекта, может быть активизирован внутренними средствами отображающей системы без воздействия извне, т. е. в отображенном объекте могут существовать в форме представлений, без непосредственного воздействия раздражителей, обусловивших возникновение того или иного изменения в отображенном.

Субъект четко различает воспринимаемые и представляемые объекты. Будем считать, что такое различие воспринимаемых и представляемых объектов в отображенном является принципиальной особенностью высокоорганизованных естественных систем отображения, которую в какой-то форме необходимо воспроизвести в бионических системах отображения (БСО). Образы — результаты восприятия, представления и воображения в естественных системах и их аналоги в искусственных системах должны иметь специальные признаки, так как в реальном процес-

се отображения возникают и вступают в отношения идеальные объекты всех указанных типов.

Важнейшие отношения реальности, такие как пространственно-временные отношения, отношения обусловленности, причинности, эквивалентности и другие становятся доступными субъекту именно благодаря его способности оперировать воспринимаемыми, представляемыми и воображаемыми объектами. Сама целенаправленная познавательная деятельность субъекта становится возможной благодаря его способности оперировать объектами указанного вида. При этом особую роль в отображающей деятельности субъекта играет его память. Она предоставляет субъекту уникальную возможность оперировать как несколькими различными состояниями одного и того же объекта в различные интервалы времени, так и состояниями различных объектов, наблюдавшимися в различных областях пространства одновременно или в разные интервалы времени, делая эти состояния сосуществующими в отображенном субъективном.

В искусственных бионических системах отображения представлению субъекта о свойстве отображаемого может быть поставлено в соответствие состояние некоторого датчика, изменяющего свое состояние под действием входных сигналов. Это состояние, зафиксированное в запоминающем устройстве искусственной системы, может быть рассмотрено как аналог субъективного образа свойства отображаемого. Сигналы, непосредственно поступающие от датчиков, и «машинные» образы этих же или других сигналов, вызванные из запоминающего устройства, в искусственной системе можно легко снабдить соответствующими признаками для четкого разделения «воспринимаемых» и «представляемых» машинных объектов. Более сложной является имитация в искусственной системе (ИС) отображения способности субъекта выделять внешние объекты. Для этого ИС отображения необходимо наделить возможностью различать пространственно-временные границы поступающих сигналов и формировать в отображенном интегральный сигнал о наличии целостного и относительно устойчивого внешнего объекта.

В нервной системе животных и человека обнаружены структуры, обеспечивающие выделение пространственных и временных границ сигналов. К ним относятся, например, так называемые детекторы контуров, детекторы включения, выключения и включения — выключения сигналов, обнаруженные в зрительном и других анализаторах. Детекторы включения — выключения делают для субъекта непосредственно доступными временные границы ощущения (возникновение и исчезновение ощущения). Акт возникновения ощущения (или исчезновения), фиксированный в памяти субъекта, является для субъекта источником его представления о внешнем событии. Образ этого события уже может выполнять для субъекта роль простейшего объекта, идеального объекта. Представляя пару таких объектов, субъект может устанавливать между ними отношение временного порядка, т. е. свойство пары таких

идеальных объектов выступает для субъекта уже как простейшее отношение, которое следует называть идеальным отношением по типу соотносящихся объектов. Это отношение, несомненно, имеет в нервном субстрате соответствующий материальный носитель, так же как и идеальным объектам соответствуют некоторые состояния нервных структур.

Сигнал о целостности воспринимаемого объекта может возникнуть в отображающих структурах субъекта на основе непрерывности ощущений субъекта. В зрительном анализаторе человека есть механизм, который мог бы обеспечить выделение отдельного целостного зрительного объекта. Эта возможность подробнее обсуждается в другой нашей работе [3]. Фиксация взгляда в характерных точках контуров воспринимаемого объекта в процессе зрительного восприятия обеспечивает возможность формирования в проекционной зоне зрительной коры локального максимума возбуждения, соответствующего максимуму автокорреляционной функции, от функции, описывающей входной сигнал.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные особенности отображения субъектом объективной реальности могут быть положены в основу построения бионических систем отображения (БСО), в функциональном отношении подобных субъекту. Но для построения БСО не только нужно знать, на какие элементы расчленяет субъект отображаемое, но и как он это делает. Анализ непосредственно доступных субъекту компонент ощущения показывает, что им можно поставить в соответствие особенности функционирования искусственных систем отображения. Для воспроизведения способности субъекта отображать свойства, объекты и отношения внешнего мира необходимо, чтобы ИС отображения осуществляли следующие операции над входными сигналами.

1. Идентификацию внешних сигналов по модальности (путем использования соответствующих специализированных датчиков).

Выходные сигналы датчиков можно преобразовать в форму, по которой субъект легко найдет соответствие между сигналами с датчиков и своими ощущениями. Если субъект и исполнительные органы датчиков будут включать в табло надписи «теплое», «синее», «мягкое» и т. п., то реакцию датчиков легко сделать такой же, как и реакция у субъекта на идентичные возмущения.

2. Выделение в сигнале момента его появления и исчезновения (путем и пользования специальных датчиков-детекторов включения и выключения).

Такие детекторы включения-выключения легко реализуются на основе дифференцирующих блоков и пороговых устройств.

Сигнал одной и той же модальности может много раз появляться и исчезать, а субъекту необходимо знать, принадлежит ли сигнал одному или различным источникам, т. е. имеет ли он дело с несколькими объектами, обладающими аналогичными свойствами, или с одним и тем же объектом с дискретно проявляющимися свойствами.

Некоторую гарантию того, что сигнал принадлежит одному и тому же источнику, субъект получает на основе непрерывности ощущения.

3. Выявление в сигнале признаков непрерывности его существования в их которых пространственно-временных границах.

4. Запоминание сигнала, имеющего определенную модальность и интенсивность.

5. Сравнение различных сигналов и одного и того же сигнала, изменяющегося во времени, для фиксированных моментов времени.

6. Оценка сигнала по интенсивности и его измерение.

7. Установление одновременной принадлежности сигналу определенной модальности, интенсивности, непрерывности, границ, определяемых моментом включения.

чения и выключения сигнала, и формирование целостного образа отдельного сигнала.

8. Выявление в сложном сигнале одного или нескольких целостных сигналов, соответствующих наличию внешних событий, процессов, объектов или ситуаций.

Другие операции и действия, которые целесообразно воспроизводить в бионических системах отображения, будут рассмотрены в следующих сообщениях после более детального анализа функционального назначения первичного этапа обработки информации в анализаторах нервной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров П. О. Биофизика органов чувств. Л., «Знание», 1971. 17 с.
2. Шрейдер Ю. А. Равенство, сходство, порядок. М., «Наука», 1971. 14 с.
3. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П. Применение принципов обобщенной голографии к проблеме синтеза образа. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 12. Харьков, 1974, с. 38—45.

УДК 62.506.2

И. А. ВОЛ

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ОБОБЩЕННОГО ВЕТВЯЩЕГОСЯ ПРОЦЕССА, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОЦЕСС ЭВОЛЮЦИИ ПОПУЛЯЦИИ.

СООБЩЕНИЕ 1

Среди задач, возникающих на границе биологии и техники, важное место занимают проблемы управления эволюцией популяций и видов, которая по естественным законам протекает в природе, а при селекции животных, растений, микроорганизмов и вирусов направляется волей человека. В последнее время все чаще биологические объекты включаются, как объект управления в сложные биотехнические комплексы при производстве кормов, выработке дрожжей, антибиотиков, а также в лабораторных условиях при биохимических и генетических исследованиях. В связи с этим большое значение приобретает анализ изолированной популяции, находящейся под действием искусственного или естественного отбора, как объекта управления или, иными словами, исследование траекторий процесса эволюции такой популяции в координатах ее численности и генетической структуры в процессе смены поколений.

В своих работах и выступлениях Феллер [1], Барлет [2] и многие другие исследователи отмечали, что наиболее адекватным природе этих процессов является описание их как обобщенных случайных ветвящихся процессов в дискретном времени с конечным числом типов частиц. В этом случае наибольший интерес представляют следующие вопросы.

1. При каких условиях популяция жизнеспособна (с положительной вероятностью не выродится) и какие типы частиц могут сохраняться в ней неограниченное время?

2. При каких условиях может в популяции существовать с положительной вероятностью стабильная структура (стабильный полиморфизм)?

Исследование этих свойств траекторий обобщенного ветвящегося процесса можно вести с помощью вспомогательных функций — стохастических аналогов функций Ляпунова [3, 4].

Пусть процесс определен на множестве $X = \{x\}$ — неотрицательных целочисленных векторов с компонентами x_i — численность частиц типа i ; $i \in I = \{1, 2, \dots, l\}$ — множеству типов частиц и время дискретно $t \in T = \{0, 1, 2, \dots\}$. Как обычно, t — номер поколения. Справедливо следующее утверждение, вытекающее из известного неравенства для супермартингалов [5].

Теорема 1. Для того чтобы, попав во множество $V \subset X$, процесс с положительной вероятностью его не покинул, необходимо и достаточно, чтобы существовала такая $V(x, t)$, что

$$r = \inf_{x \in v, t \in T} V(x, t) > V(x, t) \geq 0 \quad (1)$$

и для всех $(x, t) \in V \times T$

$$LV(x, t) = M\{V(x, t+1)/x(t)\} - V(x, t) \leq 0, \quad (2)$$

причем, если $q_{x^0, t_0}(v)$ — вероятность для процесса, начавшегося в точке $(x^0, t_0) \in X \times T$, попасть в V и не покинуть ее, то имеет место

$$\text{оценка } q_{x^0, t_0}(V) \geq 1 - \frac{1}{r} M\{V(x, t_0+1)/x^0(t_0)\}.$$

Доказательство. Необходимость очевидна, так как если для $(x, t) \in V \times T$ $F_v(x, t) < 1$ — вероятность того, что выйдя из состояния (x, t) , процесс за конечное время покинет V , то функции

$$V(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \in \bar{V} \\ F_v(x, t) & \text{при } x \in V \end{cases}, \text{ удовлетворяет условиям теоремы}$$

Достаточность. Пусть $x^0(t_0) \in X$; τ_v — момент первого после t_0 выхода траектории из множества V ; $\tau_v \wedge t = \min\{\tau_v, t\}$.

Из (1) и (2) следует, что для $t > t_0$ и процесса, остановленного в момент времени τ_v , $V(x, \tau_v \wedge t)$ — неотрицательный супермартингал. Легко видеть, что для всех $x^0(t_0)$

$$\begin{aligned} 1 - q &= P \left\{ \text{mp}_{t > t_0} V(x, t) \geq r/x^0(t_0) \right\} = P \{ V(x, t_0+1) \geq r/x^0(t_0) \} + \\ &+ \sum_{x^1 \in v} P \left\{ \text{mp}_{t > t_0+1} V(x, t) \geq r/x^1(t_0+1) \right\} P \{ x^1(t_0+1)/x^0(t_0) \}. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как для всех $x^1 \in V$ $P \left\{ \text{mp}_{t > t_0+1} V(x, t) \geq r/x^1(t_0+1) \right\} = P \left\{ \text{mp}_{t > t_0+1} V(x, \tau_v \wedge t) \geq r/x^1(t_0+1) \right\}$, то учитывая, что $V(x, \tau_v \wedge t)$ — неотрицательный супермартингал, имеем (2.2.25) [5] для всех

$$x^1 \in V; \quad P \left\{ \text{mp}_{t > t_0+1} V(x, t) \geq r/x^1(t_0+1) \right\} \leq \frac{1}{r} M \{ V(x, t_0+2)/x^1 \times (t_0+1) \} \leq \frac{1}{r} V(x^1, t_0+1). \text{ Подставляя это в (3), получаем}$$

$$1 - q = \frac{1}{r} (P \{V(x, t_0 + 1) \geq r/x^0(t_0)\} + \sum_{x^1 \in v} V(x^1, t_0 + 1) \cdot P \{x^1(t_0 + 1)/x^0(t_0)\}) \leq \frac{1}{r} M \{V(x, t_0 + 1)/x^0(t_0)\},$$

что и доказывает теорему.

В дальнейшем, для упрощения записи, мы ограничимся стационарными процессами, что соответствует, как правило, реальным условиям работы рассматриваемых объектов, и будем опускать номер поколения t в случаях, где это не может привести к путанице.

Теорема 2. Область $V \subset X$ возвратна с вероятностью 1 для процесса $x(t)$, т. е. траектория процесса почти наверное проведет в области V бесконечное время, если существует такая неотрицательная $V(x)$, что для всех $x \in V = X \setminus V$

$$LV(x) \leq -\alpha < 0. \quad (4)$$

Эта теорема — сужение теоремы 2.5.1 из [4] для стационарных процессов и областей.

Пусть переходные вероятности обобщенного ветвящегося процесса заданы в виде семейства условных производящих функций $\Phi(z, x)$; $\Phi(z, x)$ — производящая функция вероятности состава популяции в $l+1$ -м поколении при условии, что в поколении t состав ее описывался вектором x ; z — l -мерный вектор; компонента z_i соответствует компоненте x_i .

Пусть также Γ, Γ_1 — подмножества из совокупности индексов $\Gamma = I \setminus \Gamma, l(\Gamma)$ — вектор с компонентами $l_i(\Gamma)$, где $\forall i \in \Gamma, l_i(\Gamma) = 1; \forall j \in \Gamma, l_j(\Gamma) = 0; l(\Gamma, \Gamma_1)$ — вектор с компонентами $l_i(\Gamma, \Gamma_1)$, где $\forall i \in \Gamma \setminus \Gamma, l_i(\Gamma, \Gamma_1) = 1; \forall j \in \Gamma_1, l_j(\Gamma, \Gamma_1) = 0; \forall i \in \Gamma \cup \Gamma_1, l_i(\Gamma, \Gamma_1) = 0$.

Таким образом, $\Phi(l(\Gamma), x)$ — вероятность вырождения частиц типов Γ за единицу времени (одно поколение) при условии, что в предыдущем поколении популяция описывалась вектором x ; $\Phi(l(\Gamma, \Gamma_1), x)$ — производящая функция, умноженная на $\Phi(l(\Gamma \cup \Gamma_1), x)$, численность частиц типов Γ_1 при условии, что в предыдущем поколении популяция описывалась вектором x , а частицы типов $\Gamma \cup \Gamma_1$ вымрут за одно поколение.

В ряде случаев при исследовании проблемы жизнеспособности отдельных типов частиц может быть использована следующая теорема, существенно упрощающая применение теоремы 1.

Теорема 3. Если существуют такие $N > 0; f_i(z_0), (i \in I); \Gamma$, что $\forall i \in \Gamma, z_0 \in [0, 1], f_i(z_0) \geq 0; \forall j \in \Gamma, z_0 \in [0, 1], f_j(z_0) \leq 0$ и $\forall x \in \{V(N) = \{x: \forall i \in \Gamma, x^i > N; \sum_{j \in \Gamma} x_j = 0\}\}$ и существуют конечные интегралы

$$\forall i \in \Gamma, \int_0^1 f_i(z_0) \Phi(l(\Gamma, i), x) dz_0 \cdot \int_0^1 f_i(z_0) z_0^{x^i} dz_0 = V_i(x) \neq \text{const}(x).$$

(5)

$$V_j \in \bar{\Gamma}, \int_0^1 f_j(z_0) [\Phi(l(\Gamma, j), x) - 1] dz_0$$

$$\text{и } \forall x \in V(N), \sum_{i \in I} \int_0^1 f_i(z_0) [\Phi(l(\Gamma, i), x) - z_0^{x_i}] dz_0 \leq 0, \quad (6)$$

то существует такое $r > 0$ и $V(x)$, что для

$$V_1(r) = \{x : V(x) < r\} \subset V(N) \quad (7)$$

выполняются условия теоремы 1.

Доказательство. Пусть $V^* \subset X$ — множество состояний, достижимое из V .

Выберем

$$V \in \Gamma \quad V_i(x) = \begin{cases} \int_0^1 f_i(z_0) \cdot z_0^{x_i} dz_0 > 0 & \text{при } x \in V^*(N), \\ A & \text{при } x \in V^*(N), \end{cases} \quad (8)$$

$$V_j \in \bar{\Gamma} \quad V_j(x) = \begin{cases} \int_0^1 f_j(z_0) \cdot (z_0^{x_j} - 1) dz_0 > 0 & \text{при } x \in V^*(N), \\ A & \text{при } x \in V^*(N), \end{cases}$$

$$A > \inf_{x \in V^* \setminus V} \sum_{i \in I} V_i(x) = r.$$

Нетрудно видеть, что так как для всех $i \in \bar{\Gamma}$ $V_i(x)$ — строго убывающая функция x_i , а для всех $j \in \Gamma$ $V_j(x)$ — строго возрастающая функция x_j , то имеет место строгое неравенство $r > 0$.

Выберем теперь $V(x)$ в виде $V(x) = \sum_{i \in I} V_i(x)$. Легко видеть, что для всех $x \in V(N)$, так как интегралы (5) существуют и конечны, неравенство (6) эквивалентно неравенству $LV(x) \leq 0$.

Из определения r и $V(x)$ следует, что в (7) $V_1(r) \subset V(N)$ и не пусто, а значит можно применить теорему 1.

Так как точка 0 не принадлежит $V(N)$, то теорема 3 формирует достаточные условия того, что и популяция, состоящая только из особей типов Γ , может быть жизнеспособна и с положительной вероятностью не вымрет.

Замечание. Очевидно, что в теореме 3 можно заменить условия (5), (6) на условия существования такого линейного функционала на множестве производящих функций вероятности, что выполняются условия теоремы 1, если в качестве $V(x)$ выбрать значение функционала в точке $z^x = \prod_{i \in I} z_i^{x_i}$, как функцию параметра x .

В частности для $i \in \Gamma$ таким функционалом может быть $\frac{\partial}{\partial z_i}(\cdot)|_x =$
 $= l(i)$, что соответствует функции

$$V(x) = \sum_{i \in \Gamma} V_i(x) + \sum_{i \in \Gamma} x_i. \quad (9)$$

При изучении процессов эволюции большое значение имеет динамика структуры популяций, т. е. динамика l -мерного вектора

$$\rho \text{ с компонентами } \rho_i = \begin{cases} \frac{x_i}{|x|} & \text{при } |x| > 0, \\ 0 & \text{при } |x| = 0, \end{cases} \quad |x| = \sum_{i \in \Gamma} x_i. \quad \text{Имеет}$$

место следующая

Теорема 4. *Процесс $x(t)$ с вероятностью 1 покидает область V , если существуют такие $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $i \in I$, что справедливо*

$$a) U = \{U_1 \cup V_3\} \setminus \{0\};$$

$$\text{или} \quad б) U = \{V_2 \cup U_3\} \setminus \{0\}; \quad (10)$$

где

$$a) U_1 = \{x : L\rho_i(x) \geq \alpha\};$$

$$б) U_3 = \{x : L\rho_i(x) \leq -\alpha\}; \quad (11)$$

$$в) U_3 = \{x^0 : P\{x(t+1) = 0 | x(t) = x^0\} \geq \beta\}.$$

Для доказательства *a* достаточно выбрать

$$V(x) = \begin{cases} \max\{(1+\alpha)\beta^{-1}, 1\} - \rho_i(x) & \text{при } x_i > 0; \\ \max\{0, [1 - (1+\alpha)\beta^{-1}]\} & \text{при } x_i = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Из (10, *a*) и (12) нетрудно видеть, что выполняются условия (4) теоремы 2, а для доказательства *б* достаточно выбрать

$$V(x) = \begin{cases} \rho_i(x) + (1+\alpha)\beta^{-1} & \text{при } x_i > 0; \\ 0 & \text{при } x_i = 0 \end{cases}$$

и также применить теорему 2.

Теорема 4 утверждает, что стабильная структура, т. е. структура, которая может с положительной вероятностью сохраняться неограниченное время, возможна только в области

$$\{x^0 : |M\{\rho(t+1) | x(t) = x^0\} - \rho(x^0)| < \alpha; P\{x(t+1) = 0 | x(t) = x^0\} \geq \beta\}. \quad (13)$$

Поскольку в обобщенном ветвящемся процессе нулевое состояние достижимо из любого состояния, то (13) можно придать вид

$$\{(\rho^0 | x) : |M\{\rho(t+1) | \rho^0, |x(t)\} - \rho^0| < \alpha; |x(t)| > N\}. \quad (14)$$

Здесь мы для наглядности заменили x на $(\rho, |x|)$ в соответствии с (9).

В детерминированных моделях эволюции, как правило, разделяют уравнения для структуры популяции $\rho(t)$ и ее численности $|x(t)|$. Предложение о возможности такого разделения связано с тем, что при большой численности $|x(t)| \gg 1$ структура популяции в поколении $t+1$ зависит от структуры популяции в поколении t и очень слабо зависит от общей численности ее $|x(t)|$. Мы сделаем несколько более слабое предположение: $\lim_{|x(t)| \rightarrow \infty} M\{\rho(t+1) | \rho(t), |x(t)|\} = \omega^\circ(\rho(t))$, где $\omega^\circ(\rho)$ — непрерывна на симплексе $\sigma = \{\rho : \sum \rho = 1\}$. Существование предела дает возможность окончательно сформулировать вывод из теоремы 4.

Стабильная структура популяции может с положительной вероятностью сохраняться неограниченное время только в области

$$U = \{(\rho, |x|) : |\omega^\circ(\rho) - \hat{\rho}| \leq \alpha, |x| > N\}, \quad (15)$$

где $\alpha > 0$ и $N > 0$ произвольны, а $\hat{\rho}$ — неподвижная точка отображения $\omega^\circ(\rho(t)) = \rho(t+1)$.

С помощью легко проверяемого свойства производящих функций

$$M\{\psi(x_i(t+1) + 1) | x(t)\} = \int_0^1 [1 - \Phi(l(I, i), x)] \frac{dz_0}{1 - z_0} - C\Phi(l(I \setminus i), x), \quad (16)$$

где $\psi(\cdot)$ — логарифмическая производная гамма функции, $C = -\psi(0)$, и теоремы 1 могут быть сформулированы достаточные условия существования стабильной структуры, аналогичные теореме 3. При $x_i \gg 1$, используя асимптотическое разложение $\psi(x)$ из [6], легко получить что

$$\int_0^1 [\Phi(l(I, i), x) - \Phi(l(I, I), x)] \frac{dz_0}{1 - z_0} + C[\Phi(l(I, \setminus i), x) - \Phi(l(\emptyset), x)] = M\left\{-\ln \rho_i + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{|x|} - \frac{1}{x_i}\right) + O(x_i^{-2}/x(t)\right\}, \quad (17)$$

где $O(x_i^{-2})$ — члены порядка малости x_i^{-2} .

Поскольку с помощью (17) можно вычислить $LV(x)$ для вспомогательных функций только конкретного вида, по-видимому, имеет смысл использовать его в каждом конкретном случае, не доказывая соответствующей теоремы. В следующем сообщении (17) будет использовано для отыскания достаточных условий существования стабильной структуры конкретного процесса эволюции.

С помощью утверждений, приведенных в настоящей работе, удастся получить ответы на вопросы, поставленные в начале сообщения для достаточно широкого класса конкретных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Feller W. Proc. 2-nd Berkeley Symp. Math. Statist and Probab. p. 1951, p. 227—246.
- Vodmer W. E. (with discussion) J. Roy Statist Soc., (London), 1960, v. 22, N 2, p. 28—39.
- Кушнир П. Дж. Стохастическая устойчивость и управление. М., «Мир», 1969. 185 с.
- Несельсон М. Б., Хасьяминский Р. З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. М., «Наука», 1972. 128 с.
- Гихман И. И., Скороход А. В. Теория случайных процессов. Т. I. М., «Наука», 1971. 211 с.
- Янке Е., Эмде Р., Леш Ф. Специальные функции. М., «Наука», 1968. 143 с.

ДК 62.506.2

И. А. ВОЛ

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ОБОБЩЕННОГО ВЕТВЯЩЕГОСЯ ПРОЦЕССА, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОЦЕСС ЭВОЛЮЦИИ ПОПУЛЯЦИИ.

СООБЩЕНИЕ 2

В работе (1) была поставлена задача о качественном исследовании траекторий стохастического процесса эволюции и сформулированы вопросы, представляющие наибольший интерес для исследователя. Там же было приведено и доказано ряд утверждений, ающих достаточные условия того, что процесс с положительной вероятностью не покинет некоторое множество состояний V (теоремы 1 и 3) и условия, необходимые для существования стабильной структуры.

В этом сообщении мы с помощью результатов, полученных (1), будем исследовать наиболее широко встречающийся процесс эволюции. В дальнейшем мы сохраним обозначения (1) и при ссылках на теоремы из (1) не будем этого оговаривать, а при ссылках на формулы и литературу будем писать, например, (1. n) — формула (n) работы (1) или, соответственно, (1. n).

Так же, как и в работе (1), пусть обобщенный ветвящийся процесс задан с помощью семейства условных производящих функций вероятности $\Sigma \omega_i(x)(z_i - 1)$

$$\Phi(z, x) = e_i^{i \in I}, \quad (1)$$

т. е. численный состав популяции в $t+1$ -м поколении (при условии, что в поколении t он описывался вектором x) представляет собой случайный вектор, компоненты которого распределены в соответствии с законом Пуассона, но, в отличие от обычных ветвящихся процессов, вектор математических ожиданий произвольным образом зависит от состава популяции в t -м поколении и равен $\omega_i(x)$.

Пусть

$$0 \leq \omega(x) < \infty, \quad (2)$$

$$|\omega(x)| = \sum_{i \in I} \omega_i(x) \begin{cases} \leq 0 & \text{при } |x| > 0, \\ = 0 & \text{при } |x| = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При различных явных заданиях вектор-функции $\omega(x)$ процесс (1) описывает эволюцию популяции, находящейся под действием отбора с учетом мутаций, миграции и других микрогенетических процессов.

Очевидно, что в случае, когда популяция является объектом управления, то ω зависит и от управления $U(t, x)$ или в частном случае стационарной системы $U(x)$. Мы не будем заниматься вопросами синтеза и поэтому вместо $\omega(x, U(x))$ будем и дальше писать просто $\omega(x)$. Используя теоремы 1, 3 и 4 можно получить некоторые качественные характеристики траекторий процесса эволюции и в ряде случаев ответить на вопросы, сформулированные в начале нашей статьи.

Предложение 1. Если существуют такие $\Gamma \subset I$, $N > 0$, $\rho > 0$, $\kappa > 0$, что $\forall x \in U(N) = \{x: \forall i \in \Gamma, x_i > N; \sum_{j \in \bar{\Gamma}} x_j = 0\}$, справедливы неравенства

$$\forall i \in \Gamma \quad \omega_i(x) > x_i + \frac{1}{2} + \kappa, \quad (4)$$

$$\forall j \in \bar{\Gamma} \quad \omega_j(x) \leq |x|^{-(1+\delta)}, \quad (5)$$

то существуют такие $N^* \geq N$ и $\gamma > 0$, что для области $U_1 \times \times (N^*\gamma) = \left\{ x: \frac{N^*\gamma}{(\gamma-1)!} \sum_{i \in \Gamma} \beta(x_{i+1}, \gamma) + \sum_{j \in \bar{\Gamma}} x_j < 1 \right\}$ выполняются условия

теоремы 1, причем $q_x(U_1) > 1 - \frac{N^*\gamma}{(\gamma-1)!} \sum_{i \in \bar{\Gamma}} \omega_i(x)^{-\gamma}$, $\omega_i(x) \times$

$\times (x)! - \sum_{i \in \bar{\Gamma}} \omega_i(x)$, где $(\gamma, \omega_i(x))! = \int_0^{\omega_i} e^{-t} t^{\gamma-1} dt$ — неполная гамма-функция.

Справедлива оценка

$$q_x(U_1) \geq 1 - \sum_{i \in \Gamma} \left(\frac{N^*}{\omega_i(x)} \right)^\gamma - \sum_{i \in \bar{\Gamma}} \omega(x) - \sum_{i \in \bar{\Gamma}} O \left(\left(\frac{N^*}{\omega_i} \right)^{-\gamma-2} \right), \quad (6)$$

где $O \left(\left(\frac{N^*}{\omega_i} \right)^{-\gamma-2} \right)$ — члены порядка малости $\left(\frac{N^*}{\omega_i} \right)^{-\gamma-2}$.

Доказательство. Утверждение теоремы следует из теоремы 3, если выбрать $\forall i \in \Gamma, f_i(z_0) = \frac{N^*}{(\gamma-1)!} (1-z_0)^{\gamma-1}$, а $V(x)$ в виде (1.8). Неравенство (1.6) и оценка (6) следуют из асимптотических разложений функций $(\gamma, \omega_i(x))!$ (1.6) и $x_i!/(x_i + \gamma)!$ (2) при $x_i, \omega_i \gg 1$. Следует отметить, что с положительной вероятностью

частицы типов $\bar{\Gamma}$ не появятся в популяции, несмотря на то, что в любом состоянии, принадлежащем V_1 , вероятность возникновения этих частиц может быть положительна.

Пусть

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{\omega_i}{|\omega|} & \text{при } |\omega| > 0 \\ 0 & \text{при } \omega = 0. \end{cases}$$

В теореме 4 условия (1.10) можно для процесса (1) переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} a) U_1 &= \{x : \omega_i(x) \geq \rho_i(x) + \alpha; \\ b) U_2 &= \{x : \omega_i(x) \leq \rho_i(x) - \alpha\}; \\ в) U_3 &= \{x : |\omega(x)| < \beta\}. \end{aligned} \quad (1.10')$$

Нетрудно видеть, что (1.10, в) эквивалентно (1.10, б), а для доказательства (1.9, а, б) необходимо выбрать

$$\begin{aligned} a) V(x) &= \begin{cases} \max\{(1 + \alpha)e^\beta, 1\} - \rho_i(x), & \text{при } x_i > 0 \\ \max\{1 + \alpha, e^\beta\} - (1 + \alpha)e^\beta, & \text{при } x_i = 0 \end{cases} \\ б) V(x) &= \begin{cases} \rho_i(x) + (1 + \alpha)e^\beta, & \text{при } x_i > 0 \\ 0 & \text{при } x_i = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

соответственно и прямым вычислением $LV(x)$ можно убедиться, что так же выполняются условия теоремы 2.

Естественно предположить, как это делается в детерминистских моделях эволюции, что при фиксированной структуре популяции $\rho(t) = \rho^0(t)$ и большом объеме ее $|x(t)| \gg 1$, $\rho(t+1)$ — структура популяции в следующем поколении не зависит от общей численности, а зависит только от $\rho^0(t)$, т. е.

$$\forall i \in I \lim_{|x| \rightarrow \infty} \omega_i(\rho, |x|) = \omega_i^0(\rho), \quad (7)$$

где $\omega_i^0(\rho)$ — непрерывна на симплексе $\sigma = \{\rho : \sum_{i \in I} \rho_i = 1\}$. Это предположение эквивалентно (1.15).

Пусть $\hat{\rho}$ — неподвижная точка отображения

$$\rho(t+1) = \omega^0 \rho(t), \quad (8)$$

т. е.

$$\hat{\rho} = \omega^0(\hat{\rho}). \quad (9)$$

В этом случае, как видно из (3), условий (1.10) и теоремы 4, стабильная структура популяции может сохраняться только в областях

$$U(\alpha, N) = \{x : \forall i \in I, |\omega_i^0(\rho) - \hat{\rho}_i| < \alpha', |x| > N\}, \quad (10)$$

где $\alpha > 0$ и $N > 0$ произвольны.

Пусть

$$\Gamma = \{i : \widehat{\rho}_i > 0\}; \quad (11)$$

$$f(\rho, y) = \frac{\omega(\rho_i | x)}{\omega^0(\rho)} \Big|_{|x| = \frac{1}{y}},$$

$$\rho - \widehat{\rho} = \Delta = (\rho_1 - \widehat{\rho}_1, \rho_2 - \widehat{\rho}_2, \dots, \rho_e - \widehat{\rho}_e), \quad (12)$$

очевидно, что $\forall \rho, \rho \in \sigma, \sum_{i \in \Gamma} \Delta_i = 0$.

Кроме того, пусть индекс i или y сверху обозначают производную по соответствующей компоненте ρ_i или по y в точке

$$\rho = \widehat{\rho}, y = 0, \text{ т. е. } \omega_i^{0jk} = \frac{\partial \omega_i^0(\rho)}{\partial \rho_j \partial \rho_k} \Big|_{\rho = \widehat{\rho}}; \quad f_i^{jy} = \frac{\partial f(\rho, y)}{\partial \rho_j \partial y} \Big|_{\substack{\rho = \widehat{\rho} \\ y = 0}}$$

Имеют место следующие достаточные условия для существования стабильной структуры.

Предложение 2. Если существуют такие $0 < \alpha < \min_{i \in \Gamma} (\widehat{\rho}_i, 1 -$

$-\widehat{\rho}_i)$ и $N > 0$, что на множестве $U(\alpha, N)$, определяемом (7)–(11), выполняются следующие условия:

а) $\omega^0(\rho)$ и $f(\rho, y)$ — непрерывные со своими производными до второго порядка включительно;

б) $\sum_{i \in \Gamma} \left| \sum_{j, k \in \Gamma} \left(\frac{1}{\rho_i} \omega_i^{0j} \omega_i^{0k} - \omega_i^{0jk} \right) \Delta_j \Delta_k - \Delta_i^2 \right|$ определено отрицательно,

в) $\forall j \in \bar{\Gamma}, \sum_{i \in \Gamma} \omega_i^{0j} < 1$,

г) $|\omega(x)| > (1 + \rho)|x|$; $\rho > 0$,

то существуют такие $0 < \alpha^* \leq D, N^* \geq N$ и $U(\alpha^*, N^*)$, что

1) процесс с положительной вероятностью попадает в область $U(\alpha^*, N^*)$ и не выйдет из нее;

2) с вероятностью 1 процесс проведет в области $V(\alpha^*, N^*) \setminus V(\alpha^{**}, N^{**})$ только конечное время, если $0 < \alpha^{**} \leq \alpha^*, N^{**} \geq N^*$;

3) справедлива оценка при $N^* \gg 1, q_x(U(\alpha^*, N^*)) \geq 1 -$

$$- \frac{1}{D_0} \left[\sum_{i \in \Gamma} [\widehat{\rho}_i \ln \omega_i^0(x) + D_1 |\omega(x)|^{-1} + O(|\omega|)^{-2} \right].$$

Условия, налагаемые предложением 2, распадается на две группы. Условия б и в — это условия, достаточные для устойчиво-

ти неподвижной точки отображения (8). Нужно отметить, что так же, как и в случае нелинейного дифференциального оператора, отображаемого симплекс в себя, рассматриваемого в (3), произошло разделение достаточных условий устойчивости на две группы. Одна группа определяет устойчивость переменных, соответствующих нулевым координатам положения равновесия, а вторая группа определяет устойчивость остальных переменных. Условие ε налагает на среднюю скорость размножения частиц. Это условие много жестче, чем достаточное условие невырождения (4).

Доказательство. Пусть для всех $i \in \Gamma$

$$V_i(x) = \begin{cases} \widehat{\rho}_i [\psi(|x| + 1) - \psi(x_i + 1)] & \text{при } x_i > 0 \\ A & \text{при } x_i = 0 \end{cases} \quad (13)$$

и

$$V_1(x) = \begin{cases} \frac{D_1}{|x|} & \text{при } |x| > 0 \\ 0 & \text{при } |x| = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $\psi(\cdot)$ — логарифмическая производная гамма-функции. Нетрудно проверить, что

$$\forall i \in \Gamma, M\{V_i(x(t+1))/x(t)\} = \widehat{\rho}_i \int_0^1 [\Phi(e(I, l), x) - \Phi(e(I, i), x)] \times$$

$$\frac{dz_0}{1-t_0} + A \Phi(e(I_0 \setminus i), x) = -\widehat{\rho}_i [\ln \omega_i(x(t)) + E_i(-|\omega(x(t))|) - E_i(-\omega_i(x(t)))] + Ae^{-\omega_i(x(t))}, \quad (15)$$

где $E_i(\cdot)$ — интегральная показательная функция

$$M\{V(x(t+1))/x(t)\} = D_1 e^{-1\omega(x(t))} E_i^*(1\omega(x(t))). \quad (16)$$

Функции $\widehat{f}_i(\rho, y)$ — непрерывны и ограничены на $U(\alpha, N)$, а значит равномерно непрерывны и, следовательно,

$$\widehat{f}_i = \widehat{f}_i^k = \widehat{f}_i^y = 0. \text{ Теперь, выбрав } V(x) = \sum_{i \in \Gamma} V_i(x) + V_1(x), \text{ пе-}$$

рейдя к асимптотическому разложению функций $E_i(\cdot)$ и $\psi(\cdot)$ при $|\omega|, \omega_i, |x|, x_i \gg 1$ и учитывая только члены до второго порядка малости, получим из (13) — (16)

$$\forall x \in U(\alpha, N), LV(x) \leq \left[\frac{1}{2} (|e(\Gamma)| - 1) - D_1 \frac{\sigma}{1+\delta} \right] y + \sum_{i \in \Gamma} (\Delta_i -$$

$$- \sum_{i \in I} \omega_i^{0j} \Delta_j) + \sum_{i \in \Gamma} \left[\sum_{j,k=1} \left(\frac{1}{\rho_i} \omega_i^{0j} \omega_i^{jk} - \omega_i^{0/k} \right) \Delta_j \Delta_k - \Delta_i^2 \right] + 0(y^2) +$$

$$+ \sum_{i \in \Gamma} 0(\Delta_i y) + \dots \quad (17)$$

Чтобы не загромождать запись, члены порядка малости $O(\Delta_i y)$ и $O(y^2)$ мы не вычислили, так как их явный вид в дальнейшем не потребуется.

Из определения ρ , (9) и (12) легко видеть, что $\forall x \in U(\alpha, N)$

$$\sum_{i \in \Gamma} \left(\Delta_i - \sum_{j \in I} \omega_i^{0j} \Delta_j \right) = \sum_{i \in \Gamma} \left(\sum_{j \in I} \omega_i^{0j} \Delta_j - \Delta_i \right),$$

и так как $\omega_i^{0j} \geq 0$ непрерывны со своими производными, то $\forall j \in \Gamma$ $\forall i \in \bar{\Gamma}$, $\omega_i^{0j} = 0$ и окончательно (27) примет вид

$$\forall x \in U(\alpha, N), LV(x) \leq \left[\frac{1}{2} (|e(\Gamma)| - 1) - D_1 \frac{\delta}{1 + \delta} \right] y + \sum_{j \in \bar{\Gamma}} \left(\sum_{i \in \bar{\Gamma}} \omega_i^{0j} - 1 \right) \times \\ \times \Delta_j + \sum_{i \in \Gamma} \left| \sum_{j, k \in I} \left(\frac{1}{\rho_i} \omega_i^{0j} \omega_i^{0k} - \omega_i^{0jk} \right) \Delta_j \Delta_k - \Delta_i^2 \right| + \dots \quad (18)$$

Из (18) видно, что в некоторой окрестности точки $\rho = \hat{\rho}$, $y = 0$ знак $LV(x)$ будет определяться членами только первого порядка малости относительно y и $\Delta_i (i \in \bar{\Gamma})$ и членами только второго порядка малости относительно $\Delta_i \cdot \Delta_j$, ($j, k \in \Gamma$). Это в свою очередь означает, что в условиях теоремы найдутся такие $0 < \alpha_1 \leq \alpha$,

$N_1 \geq N$ и $D_1 > \frac{1}{2} (|e(\Gamma)| - 1) \frac{1 + \delta}{\delta}$, что в области $U(\alpha_1, N_1)$,

$LV(x) = LV(\Delta, y)$ — отрицательно определенная функция Δ и y .

Из асимптотического представления $V(x)$ легко видеть, что при достаточно больших A функция $V(x) = V(\rho, y)$ достигает

абсолютного минимума в точке с координатами $\rho = \hat{\rho}$, $y = 0$ что в свою очередь, означает, что существуют такие $D_2 >$

$> \sum_{i \in \Gamma} \rho_i \ln \rho_i = \mu$, $0 < \alpha^* \leq \alpha_1$, $N^* > N$, что $U(\alpha^*, N^*) \subset \{x: V(x) <$

$< D_2\} \subset U(\alpha_1, N_1)$ и $\sup_{x \in U(\alpha^*, N^*)} V(x) = D_0 > \mu$.

Таким образом, можно применить к области $\{x: V(x) < D_0\}$ теорему 1 и доказать первое и третье утверждение. Для любого $\alpha^{**} < \alpha^*$, $N^{**} \geq N^*$ и $\forall x \in U(\alpha^{**}, N^{**})$, $q_x(U(\alpha^{**}, N^{**})) \geq q^{**} > 0$. Из известной теоремы 1.2.6 (1.5) можно получить второе утверждение, учтя, что из отрицательной определенности $LV(\Delta, y)$ в области $U(\alpha^*, N^*)$ и теоремы 2 следует, что траектория покидает область $U(\alpha^*, N^*) \setminus U(\alpha^{**}, N^{**})$ с вероятностью 1 за конечное время.

Итак, при исследовании траекторий обобщенных ветвящихся процессов, моделирующих процесс эволюции популяций, достаточно успешными оказываются методы, основанные на вспомогательных функциях. При этом трудности, связанные с вычислением значений производящего оператора, могут быть отчасти обойдены

если использовать аппарат условных производящих функций вероятности. Плодотворность такого подхода продемонстрирована при анализе наиболее интересных качественных свойств траекторий процесса (2), моделирующего достаточно широкий класс частных задач. Для этого процесса найдены достаточные условия того, что популяция, состоящая из частиц типов Г, жизнеспособна, а также необходимые (теорема 4 (1.10')) и достаточные (предложение 2) условия существования в популяции стабильной структуры.

Используя доказанные утверждения, можно исследовать аналогичные свойства траекторий процесса эволюции, построенного в (9) как результаты суперпозиции отдельных микрогенетических процессов.

В заключение выражаю благодарность Р. А. Полуэктову за постановку задачи и обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вол И. А. О некоторых свойствах обобщенного ветвящегося процесса, моделирующего процесс эволюции. *Сообщение 1*. См. статью в настоящем сборнике.
2. Бейтмен Г., Эрдейн А. Высшие трансцендентные функции. Т. I. М., «Наука», 1972. 173 с.
3. Пых Ю. А. — «Докл. АН СССР», 1972, т. 203, № 4, с. 766—768.
4. Вол И. А. Исследования по теоретической генетике. Новосибирск, 1972, с. 44—51.

УДК 62.506.2

В. И. ПОТАПОВ, канд. техн. наук, С. Г. БРАТЦЕВ

О СРЕДНЕМ ВРЕМЕНИ «ЖИЗНИ» ИЗБЫТОЧНЫХ СИСТЕМ С АДАПТИВНЫМИ НЕЙРОПОДОБНЫМИ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИМИ ОРГАНАМИ

В статье * описан принцип работы двух типов адаптивных нейроподобных восстанавливающих органов (ВО). Первый тип ВО характеризуется однонаправленным ступенчатым изменением порога и бинарным изменением весовых коэффициентов входов, второй тип — реверсивным ступенчатым изменением порога и весовых коэффициентов входов. Там же, в предложении простейшего потока отказов, приведены системы дифференциальных уравнений, описывающие поведение систем с обоими типами адаптивных нейроподобных ВО для алгоритмов адаптации, при которых в последнем адаптивном состоянии у каждого типа ВО остаются неотключенными два входа, а порог срабатывания ВО равен 2.

* Поталов В. И., Доценко М. Ф. Нейроподобные элементы в режиме восстанавливающих органов. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 10, Харьков, 1973, с. 27—32.

Для указанных алгоритмов адаптации графы состояний резервированных систем с каждым типом n -входового ВО топологически эквивалентны (рис. 1) и отличаются лишь вероятностями перехода из состояния E_i в состояние E_{i+1} ($0 \leq i \leq n-3$), где i — число отказавших резервированных блоков, а все остальные обозначения на графе соответствуют обозначениям, введенным в указанной работе. Над дугами графа без квадратных скобок указаны вероятности переходов для ВО первого типа, а в квадратных скобках — вероятности переходов для ВО второго типа, отличные от вероятностей соответствующих переходов для ВО первого типа.

Очевидно, что характеристики надежности избыточных систем с нейроразличными ВО при равной кратности резервирования за-

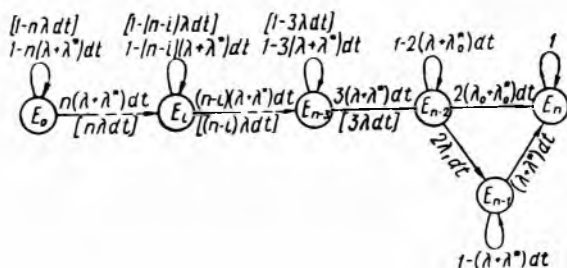


Рис. 1.

висят не только от типа ВО, но и от алгоритма адаптации. В связи с этим представляет определенный интерес сравнение обоих типов ВО при указанном выше алгоритме адаптации и при таком алгоритме адаптации, когда в последнем адаптивном состоянии у каждого типа ВО остаются неотключенными три входа, а порог срабатывания ВО равен 2. В этом случае графы состояний резервированных систем с каждым типом ВО также топологически эквивалентны (рис. 2) и отличаются лишь вероятностями переходов от состояния E_0 до состояния E_{n-3} , система обозначений которых соответствует графу на рис. 1.

Для сравнения избыточных систем с адаптивными ВО, описываемых графами, изображенными на рис. 1 и 2, целесообразно воспользоваться таким параметром как среднее время «жизни» избыточной системы $T = \sum_{i=0}^{n-1} T_i$, где T_i — среднее время работы между i -м и $(i+1)$ -м отказами резервируемых блоков, подключенных ко входам соответствующего адаптивного ВО. Однако в силу структурной неоднородности графов представляется более удобным разбить диапазон изменения i , равный $(0, n-1)$, для первого графа на участки $(0, n-3)$, $n-2, n-1$, а для второго графа — на участки $(0, n-4)$, $n-3, n-2, n-1$ и сравнить T_i внутри каждого участка.

В силу принятого предположения о том, что поток отказов является простейшим, время возникновения отказов удовлетворяет условиям стационарности, ординарности и отсутствия последствия. Следовательно, для расчета T_i на i -м участке любого графа можно воспользоваться выражением

$$T_i = \int_0^{\infty} \sum_{k=k_1}^{n-1} p_k(t) dt, \quad (1)$$

где k_1 — начальный номер состояния системы внутри k -го участка; $p_k(t)$ — вероятность нахождения резервированной системы в состоянии E_i , вычисленная при начальных условиях $p_{k_1}(0) = 1$, $p_{k_1+1}(0) = p_{k_1+2}(0) = \dots = p_{n-1}(0) = 0$.

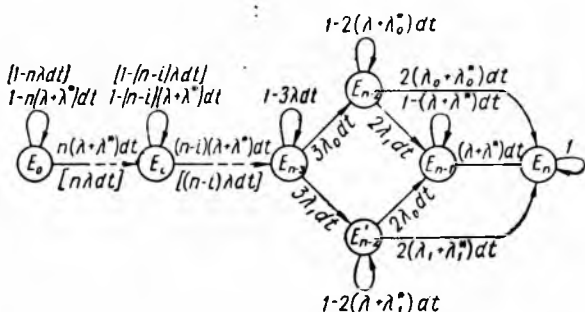


Рис. 2.

Для резервированной системы с первым типом ВО, описываемой графом на рис. 1 ($ВО_1$) и графом на рис. 2 ($ВО_2$), введем соответствующие обозначения T_{1i} и T_{2i} , а для системы со вторым типом ВО ($ВО_3$, $ВО_4$) — соответственно T_{3i} и T_{4i} . Тогда, используя (1), нетрудно получить для $ВО_1$

$$T_{1i} = X_{1i} + \frac{\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{2(\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda_0^*)} \prod_{j=i}^{n-3} \alpha_j \sum_{p=i}^{n-3} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m \neq p)}}^{n-3} (\alpha_m - \alpha_p)}. \quad (2)$$

$$0 \leq i \leq n-3$$

где $\alpha_i = (n-i)(\lambda + \lambda^*)$,

$$X_{1(n-2)} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{v=i+1}^{n-3} \prod_{j=i}^{v-1} \alpha_j \sum_{p=i}^v \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m \neq p)}}^v (\alpha_m - \alpha_p)}, \quad (3)$$

$$T_{1(n-2)} = \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda^*} \right) \frac{1}{\lambda + \lambda^*}, \quad T_{1(n-1)} = \frac{1}{\lambda + \lambda^*}. \quad (4)$$

Для VO_2 имеют место равенства $T_{2(n-2)} = T_{1(n-2)}$, $T_{2(n-1)} = T_{1(n-1)}$, а T_{2i} ($0 \leq i \leq n-3$) по форме совпадает с T_{1i} и отличается от него лишь значением α_i , которое для VO_2 равно $\alpha'_i = (n-i)\lambda$. Очевидно, что $\alpha_i > \alpha'_i$, так как $\lambda^* > 0$.

Аналогичным образом для VO_3 получены следующие значения:

$$T_{3i} = X_{3i} + \left[\frac{4(\lambda + \lambda^*)}{3\lambda} + \frac{2(3\lambda + \lambda^*)}{2\lambda + \lambda^*} \right] \prod_{l=i}^{n-5} \alpha_j \sum_{p=l}^{n-4} \frac{1}{\alpha_p \prod_{m=l}^{n-4} (\alpha_m - \alpha_p)_{(m+p)}},$$

$$0 \leq i \leq n-4, \quad (5)$$

где

$$X_{3i} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{v=i+1}^{n-4} \prod_{l=i}^{v-1} \alpha_j \sum_{p=l}^v \frac{1}{\alpha_p \prod_{m=l}^v (\alpha_m - \alpha_p)_{(m+p)}};$$

$$T_{3(n-3)} = \frac{1}{3\lambda} + \frac{3\lambda + \lambda^*}{2(2\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda^*)}, \quad (6)$$

$$T_{3(n-2)} = \frac{4\lambda + \lambda^*}{2(\lambda + \lambda^*)(2\lambda + \lambda^*)}, \quad (7)$$

$$T_{3(n-1)} = \frac{1}{\lambda + \lambda^*}. \quad (8)$$

Для VO_4 имеют место равенства $T_{4(n-3)} = T_{3(n-3)}$, $T_{4(n-2)} = T_{3(n-2)}$, $T_{4(n-1)} = T_{3(n-1)}$, а T_{4i} ($0 \leq i \leq n-4$) вычисляется по следующей формуле:

$$T_{4i} = X_{4i} + \frac{3\lambda + \lambda^*}{2(2\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda^*)} \prod_{l=i}^{n-3} \alpha'_j \sum_{p=l}^{n-3} \frac{1}{\alpha'_p \prod_{m=l}^{n-3} (\alpha'_m - \alpha'_p)_{(m+p)}},$$

$$0 \leq i \leq n-4, \quad (9)$$

где $\alpha'_i = (n-i)\lambda$, а

$$X_{4i} = \frac{1}{\alpha'_i} + \sum_{v=i+1}^{n-3} \prod_{l=i}^{v-1} \alpha'_j \sum_{p=l}^v \frac{1}{\alpha'_p \prod_{m=l}^v (\alpha'_m - \alpha'_p)_{(m+p)}}. \quad (10)$$

из приведенных выше выражений следует, что при $\lambda^* > 0$

$$T_{1i} < T_{2i} \quad (0 \leq i \leq n-1) \text{ для любых } n \geq 3,$$

$$T_{3i} < T_{4i} \quad (0 \leq i \leq n-1) \text{ для любых } n \geq 4.$$

Используя очевидные равенства

$$\prod_{j=i}^{n-3} \alpha_j = \alpha_{n-3} \prod_{j=l}^{n-4} \alpha_j, \quad \sum_{v=i+1}^{n-3} \prod_{j=i}^{l-1} \alpha_j \sum_{p=i}^v \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m+p)}}^v (\alpha_m - \alpha_p)} =$$

$$= \prod_{j=l}^{n-4} \alpha_j \sum_{p=i}^{n-3} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m+p)}}^{n-3} (\alpha_m - \alpha_p)} + \sum_{v=l+1}^{n-4} \prod_{j=i}^{v-1} \alpha_j \sum_{p=l}^v \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=1 \\ (m+p)}}^v (\alpha_m - \alpha_p)},$$

приведем (2) к виду

$$T_{li} = X_{3i} + (1 + M\alpha_{n-3}) \prod_{j=i}^{n-4} \alpha_j \sum_{p=i}^{n-3} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m+p)}}^{n-3} (\alpha_m - \alpha_p)}, \quad (11)$$

де
$$M = \frac{\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{2(\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda_0^*)}.$$

Из выражений (5) и (11) ясно, что

$T_{li} \leq T_{3i}$ ($0 \leq i \leq n-4$), если

$$(1 + M\alpha_{n-3}) \prod_{p=i}^{n-4} \alpha_j \sum_{p=i}^{n-3} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=l \\ (m+p)}}^{n-3} (\alpha_m - \alpha_p)} \leq N \prod_{j=i}^{n-5} \alpha_j \sum_{p=l}^{n-4} \times$$

$$\times \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=l \\ (m+p)}}^{n-4} (\alpha_m - \alpha_p)}, \quad \text{где } N = \frac{4(\lambda + \lambda^*)}{3\lambda} + \frac{2(3\lambda + \lambda^*)}{2\lambda + \lambda^*}.$$

связи с тем, что
$$\prod_{j=i}^{n-4} \alpha_j \sum_{p=l}^{n-3} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=i \\ (m+p)}}^{n-3} (\alpha_m - \alpha_p)} = \int_0^{\infty} p_{n-3}^{(i)}(t) dt,$$

$$\prod_{j=i}^{n-5} \alpha_j \sum_{p=l}^{n-4} \frac{1}{\alpha_p \prod_{\substack{m=1 \\ (m+p)}}^{n-4} (\alpha_m - \alpha_p)} = \int_0^{\infty} p_{n-4}^{(i)}(t) dt, \quad \text{где } p_{n-4}^{(i)} \text{ — вероят-}$$

ность нахождения системы в состоянии E_{n-i} при условии, что при $t = 0$ она находится в состоянии E_i , то вследствие очевидного неравенства $\int_0^{\infty} p_{n-4}^{(i)}(t) dt > \int_0^{\infty} p_{n-3}^{(i)}(t) dt$ знак неравенства $T_{1i} < \leq T_{3i}$ ($0 \leq i \leq n-4$) будет совпадать со знаком неравенства $1 \rightarrow Ma_{n-3} \leq N$. Следовательно, $T_{1i} \leq T_{3i}$ ($0 \leq i \leq n-4$) при

$$1 + \frac{3\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{2(\lambda + \lambda_0^*)} \leq \frac{4(\lambda + \lambda^*)}{3\lambda} + \frac{2(3\lambda + \lambda^*)}{2(\lambda + \lambda^*)}. \quad (12)$$

Из выражения (2) при $i = n-3$ и (6), следует, что $T_{1(n-3)} < T_{3(n-3)}$ при

$$\frac{1}{3(\lambda + \lambda^*)} + \frac{1}{2(\lambda + \lambda_0^*)} + \frac{\lambda_1}{(\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda_0^*)} \leq \frac{1}{3\lambda} + \frac{3\lambda + \lambda^*}{2(2\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda^*)}. \quad (13)$$

Из выражения (3) и (7) вытекает, что $T_{1(n-2)} \leq T_{3(n-2)}$ при выполнении условия

$$\frac{\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{\lambda + \lambda_0^*} \leq \frac{4\lambda + \lambda^*}{2\lambda + \lambda^*}, \quad (14)$$

а из выражения (4) и (8) следует, что

$$T_{1(n-1)} = T_{3(n-1)}. \quad (15)$$

Перейдем теперь к сравнению T_{2i} и T_{4i} . Поскольку $X_{2i} = X_{4i}$, то, следовательно, $T_{2i} \leq T_{4i}$ ($0 \leq i \leq n-2$) при

$$\frac{\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{\lambda + \lambda_0^*} \leq \frac{3\lambda + \lambda^*}{2\lambda + \lambda^*}, \quad (16)$$

а

$$T_{2(n-1)} = T_{4(n-1)}. \quad (17)$$

Для практики представляет определенный интерес сравнить среднее время «жизни» избыточных систем не только с разнотипными ВО и однотипными алгоритмами адаптации и с однотипными нейроподобными ВО, работающими по различным алгоритмам адаптации, но и с разнотипными ВО, также работающими по различным алгоритмам адаптации. Для этого проведем сравнение T_{1i} с T_{4i} и T_{2i} с T_{3i} .

Визуальный анализ графов на рис. 1 и 2 дает основание заключить, что при фиксированных значениях λ_0 , λ_1 , λ_0^* и λ_1^* , начиная с некоторого значения n , $T_{1i} \leq T_{4i}$ и $T_{3i} \leq T_{2i}$. Полагая, что для любого типа нейроподобного ВО $\min n = 3$, и найдя условия, при которых выполняются указанные выше неравенства, можно утверждать, что условия будут достаточными и для $n > 3$.

Из уравнения (2) и (6) легко получить, что $T_{1(n-3)} \leq T_{4(n-3)}$ при выполнении условия

$$\frac{5\lambda + 3\lambda^* + 6\lambda_1 + 2\lambda_0^*}{6(\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda_0^*)} \leq \frac{1}{3\lambda} \frac{3\lambda + \lambda^*}{2(2\lambda + \lambda^*)(\lambda + \lambda^*)}, \quad (18)$$

а из уравнения (2) при $\alpha_i = \alpha_i^* = (n-i)\lambda$ и уравнения (6) следует, что $T_{3(n-3)} \leq T_{2(n-3)}$, если

$$\frac{3\lambda + \lambda^*}{2\lambda + \lambda^*} \leq \frac{\lambda + \lambda^* + 2\lambda_1}{\lambda + \lambda^*} \quad (19)$$

Таким образом, результаты проведенного анализа, представленные в виде неравенств (12—19), позволяют для каждого соотношения параметров λ_0 , λ_1 , λ_0^* , λ_1^* и n определить такой тип нейроподобного ВО и такой алгоритм адаптации, которые обеспечат резервированной системе максимальное среднее время «жизни».

УДК 62.506.2

В. И. СЕРДОБОЛЬСКИЙ

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СЕМАНТИКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

В качестве инструмента для развития математических моделей семантики естественного языка предлагается использовать формальные вероятностные грамматики и вероятностные автоматы.

Наиболее глубокий и результативный подход к математическому моделированию естественного языка связан с работами К. Шеннона [1]. Применение N -граммной техники статистического анализа языка в экспериментах по генерации текстов показало, что статистические связи в языке носят смысловой характер и, возможно, само понятие смысла исчерпывается этими связями [2].

Не меньшее значение имеет для понимания природы языка введенное Шенноном понятие источника информации. Вероятностные автоматы с замкнутыми связями, рассмотренные Шенноном в качестве источников информации, концентрируют в себе структуру, которая служит для генерации текстов, и представляют математические модели лингвистического аппарата носителей языка. Развитие математической лингвистики показало, однако, ограниченность представлений об источнике информации в виде вероятностного автомата с конечным числом состояний. Автоматные языки и связанные с ними конечные автоматы не допускают возможности сравнить два количества и организовать управляемые циклические процессы.

Возможность счета появляется в языках, порождаемых контекстно-свободными грамматиками. В классе еще более общих языков, порождаемых грамматиками непосредственных составляющих, оказывается возможным генерировать и анализировать любые конструктивно заданные множества цепочек символов. Для перехода к вероятностным языкам в каждую из этих грамматик можно ввести вероятности применения продукции, получая таким образом вероятностные автоматные, ВКС- и ВНС-грамматики [3].

Чтобы получить источник информации в смысле Шеннона, достаточно рассмотреть итерацию Клини соответствующих языков. Напротив, для любого алгоритмически заданного стохастического процесса можно построить вероятностную грамматику, если этот

процесс формально представлен вероятностной машиной Тьюринга. Из сказанного видно, что представляет интерес развить подход к естественным языкам и их семантике как формальному вероятностному языку, заданному соответствующей порождающей грамматикой.

Известные из литературы формальные определения вероятностных языков недостаточно удобны. Для приложения к естественному языку, видимо, существенно важно связать с каждой фразой языка оценку ее вероятности. Таким образом, можно предложить следующее определение.

Пусть T — алфавит языка. Языком L над T называется множество T^* всех цепочек символов из T с заданным на T^* распределением вероятностей. Вероятностные грамматики — наиболее общий конструктивный способ описания вероятностных языков. Структура их должна полностью отражать как семантические, так и синтаксические аспекты языка. С точки зрения математического моделирования естественно предположить, что синтаксическое строение естественного языка отражает наиболее устойчивую верхнюю часть дерева выводов в этих грамматиках.

Обращаясь к познавательной роли языка, можно определить естественный язык как знаковую систему, отражающую закономерности и взаимосвязи окружающего мира. При количественном подходе прежде всего возникает вопрос об оценке правильности отражения, об описательной ценности языков и определяющих их грамматик. Материалом описания служит суммарный языковый опыт субъекта. Ценность грамматики следует измерять, прежде всего, степенью соответствия этого «эмпирического» языкового материала языку, связанному с лингвистической моделью, которая представляется грамматикой.

Для вероятностных языков наиболее удобными оказываются энтропийные оценки. Действительно, пусть x — фразы языкового опыта, $p(x)$ — их вероятности в наблюдаемом «языке объекта», а $q(x)$ — оценка этих вероятностей согласно грамматике. Чтобы измерить разницу между этими двумя распределениями, можно выбрать любой выпуклый функционал. Ограничим, однако, класс таких функционалов следующими требованиями.

1. Искомый функционал $S(p, q)$ должен иметь абсолютный минимум при $q(x)$, равном $p(x)$.

2. Функционал $S(p, q)$ должен быть линейным по $p(x)$ (условие доступности для наблюдения).

3. Если фразы x допускают разбиение на статистически независимые цепочки x_1 и x_2 с распределениями $q_1(x_1)$ и $q_2(x_2)$, то функционал $S(p, q)$ должен быть аддитивным: $S(p, q) = S(p, q_1) + S(p, q_2)$, $qx = q_1(x_1)q_2(x_2)$ (условие эффективности семантического анализа).

Этими требованиями функционал $S(p, q)$ определяется однозначно с точностью до констант линейной зависимости. Искомый оценивающий функционал имеет вид смешанной энтропии $S(p, q) = -\sum_x p(x) \log q(x)$. При $q(x) = p(x)$ эта величина достигает

минимума и сравнивается с энтропией распределения $p(x)$. Наилучшее в смысле минимума $S(p, q)$ приближение $q(x)$ к $p(x)$ является одновременно оценкой максимального правдоподобия. Имеется, далее, определенная связь между минимизацией величины $S(p, q)$ и выделением закономерностей при передаче информации. При кодировании сообщений о реализациях x , которые поступают, согласно распределению $p(x)$, кодами Шеннона, оптимальным для $q(x)$, требуемая скорость передачи информации превышает величину $S(p, q)$ не более, чем на 1 дв. единицу. В случае $q(x) = p(x)$ и блочном кодировании с длиной блоков $N \rightarrow \infty$ в пределе кодирования информации не содержит избыточности и представляет с точки зрения вероятностных свойств чистый статистический шум. Поэтому оценка модельных языков и грамматик по уменьшению $S(p, q)$ является оценкой возможного сжатия информации, которое обеспечивается моделью. Это замечание позволяет придать точный смысл понятию информативности и говорить об описании, минимизирующем $S(p, q)$, как о наиболее информативном.

Переход к вероятностным языкам вводит в процесс генерации языка разнообразие, которое придает формальным построениям новую интерпретацию. Представляется удобным говорить о генерации фраз в вероятностной грамматике как о лингвистическом поведении. Формальное лингвистическое поведение — это обобщение описания поведения в психологическом значении этого термина. Действительно, отдельные символы и фразы могут иметь смысл поведенческих актов, а формальный язык может выражать систему действий.

Существенное значение для интерпретации лингвистического поведения имеет учет целевого фактора. Для формализации удобно задать на множестве фраз целевую функцию. Пусть $C(x)$ — целевая функция, определенная на T^* . Оптимальное целевое поведение должно отражать выигрыш в целевой функции и одновременно учет объективных условий, модельное отражение которых представляет грамматика и порождаемый ею язык. Выбирая критерий оптимальности поведения, естественно обратиться к известному в психологии закону, утверждающему, что мотивация поведения пропорциональна оценке выигрыша при достижении цели, умноженной на вероятность ее достижения. Таким образом, из всех фраз x наилучшей по оценке $C(x)$ согласно модели $q(x)$ следует считать фразу, отличающуюся наибольшим значением произведения $C(x)q(x)$. В логарифмическом виде оптимальность X оценивается величиной разности $\log C(x) - H(x)$.

Здесь величина $H(x)$ является количеством информации по Хартли и содержательно измеряет информационное напряжение, связанное с ожиданием реализации x в модели $q(x)$. Формально задача выбора оптимального поведения при заданной целевой функции сводится к задаче отыскания наиболее вероятного слова в новом языке с вероятностями слов, пропорциональными $C(x)q(x)$.

Описанные математические модели языка отражают его познавательную функцию, но не учитывают роли языка как средства коммуникации. Для моделирования коммуникативной функции

в рамках предполагаемого подхода необходимо сделать переход от порождающих грамматик к автоматам с входом и выходом. Формально соотношения эквивалентности между вероятностными грамматиками А-языков, КС-языков и НС-языков и соответствующими вероятностными автоматами установлены в [3]. Язык автоматов с входом и выходом образован множеством фраз вида $x_1 \rightarrow x_2$, где x_1 — слово из алфавита входных символов, а x_2 — слово, составленное из выходных символов.

Видно, что каждый такой автомат эквивалентен грамматике соответствующего типа по Хомскому. Вероятностную меру на множестве цепочек $x_1 \rightarrow x_2$ в этом случае следует определить так, чтобы суммарная вероятность каждой входной цепочки равнялась единице. Содержательно совокупный язык взаимодействия автомата с окружением сводится к множеству сочетаний входных фраз с выходными. Целевое поведение в коммуникативной модели задается аналогичным образом.

На множестве цепочек, образованных символами входных и выходных слов, вводится оценивающая функция. Оптимальное коммуникативное поведение в ответ на входное слово x_1 соответствует выбору x_2 на выходе с максимальным значением произведения $C(x_1 \rightarrow x_2)q \times (x_1 \rightarrow x_2)$. В коллективе вероятностных автоматов при некотором способе задания целевой функции могут быть обеспечены условия, приводящие к обмену информацией между автоматами. Особенно интересной представляется интеграция поведения автоматов, которая должна возникать в модели под действием общего для автоматов случайного источника входных слов.

При достаточном уровне развития автоматов коммуникация дает возможность содействовать неантагонистическим образом уменьшению информационного напряжения каждого из автоматов. Относительная роль эффекта интеграции должна возрастать по мере оптимизации лингвистических моделей, создаваемых автоматами, и развития языка коммуникации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., Изд-во иностранной литературы, 1963. 243 с.
2. Бирюков Б. В. Теория смысла Готлоба Фреге — В кн.: Применение логики в науке и технике. М., Изд. АН СССР, 1960, с. 38—41.
3. Santos E. S. Probabilistic Grammars and Automata. — «Information and Control», 1972, v. 21, № 1, p. 27—47.

УДК 62.506.2

ОГОРОДНЕЙЧУК И. Ф., д-р. техн. наук, ЛЕОНОВ В. П.,
БЫХ А. И., канд. техн. наук

КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПАМЯТЬ И ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СУММАТОРА

Явление электрохемилюминесценции (ЭХЛ), как отмечалось ранее [1, 2], может использоваться при моделировании нервных

слеток. При разработке технических моделей нейронов возникают определенные трудности. Они связаны с низкой яркостью свечения ЭХЛ многих люминесцирующих веществ и с тем, что яркость значительно зависит от режима возбуждения. При возбуждении ЭХЛ двухэлектродной ячейке импульсами с длительностями, близкими к длительности их в нервных клетках, яркость свечения находится на низком уровне и ее затруднительно регистрировать. Другие трудности обусловлены недостаточной изученностью данного явления и отсутствием в настоящее время единых представлений о механизме образования возбужденных молекул при ЭХЛ. Поэтому изучение процессов в ЭХЛ ячейке является актуальным.

Обычно переработку информации в нейроне условно делят на два процесса. Один из них связан с подготовкой процесса генерации, а другой — с генерацией импульсов [3]. Поэтому и структурную схему модели нейрона представляют состоящей из подготавливающего и генерирующего узлов. Как отмечалось в [2], модель нейрона с использованием ЭХЛ ячейки также состоит из двух узлов: ЭХЛ пространственно-временного сумматора и генерирующего узла.

В предлагаемой работе исследовались запоминающие свойства некоторых люминесцирующих веществ. Определяются наиболее благоприятные режимы возбуждения с точки зрения наибольшей яркости свечения и высокого быстродействия. Исследуется управляемость ЭХЛ ячейки внешним весовым сопротивлением.

Возбуждение ЭХЛ в большинстве случаев проводится чередующимися разнополярными импульсами. Вспышка ЭХЛ наблюдается во время катодной фазы на рабочем электроде, когда у его поверхности одновременно присутствуют катион и анион — радикалы активатора, способные аннигилировать между собой. Поскольку вспышка ЭХЛ происходит во время катодной фазы, то запоминающие свойства определяются временем жизни катион-радикалов активатора. Ион-радикалы различных люминесцирующих веществ имеют времена жизни от долей секунды до десятков и сотен секунд. Это позволяет регулировать длительность запоминания в широких пределах. Наличие времени жизни у ион-радикалов активатора позволяет воспроизвести временное суммирование в ЭХЛ ячейке.

Вымирание катион-радикалов активатора можно отождествить с уменьшением деполяризации мембраны тела клетки нейрона после поступления на него потенциала действия.

Кратковременная память некоторых люминесцирующих веществ исследовалась в композициях, содержащих растворенные в диметилформамиде активатор и хлористый литий 0,05 моль/л. В случае 1,5-дифенил-3-стирилпиразолина (ДФСП) концентрация электролита составляла 0,01 моль/л. Композиция заливалась в ячейку емкостью 0,8 мл с двумя платиновыми электродами. Рабочий электрод — штырь диаметром 1 мм — располагался коаксиально внутри дополнительного, выполненного в виде цилиндра с разрезом для выхода света. На электроды подавались разнополярные чередую-

щиеся импульсы, амплитуда и длительность которых подбирали экспериментально по максимальной интенсивности ЭХЛ отсюда для каждого люминесцирующего вещества.

Интенсивность вспышки ЭХЛ зависит от амплитуды и длительности положительного и отрицательного импульсов. Вспышка ЭХЛ наблюдается только во время отрицательного импульса. Будем считать положительный импульс с длительностью T_1 записывающим. В этот полупериод образуются катион-радикалы актора R^+ . Между подачей положительного и отрицательного импульсов всегда имеется интервал времени T_2 . Отрицательный импульс с длительностью T_3 считаем считывающим. В течение него образуется анион-радикал R^- и наблюдается вспышка ЭХЛ, которая пропорциональна концентрации R^+ , образованных положительным импульсом, т. е. происходит считывание записанной информации. Для исследуемого вещества записывающий импульс имел положительную полярность, а считывающий — отрицательную.

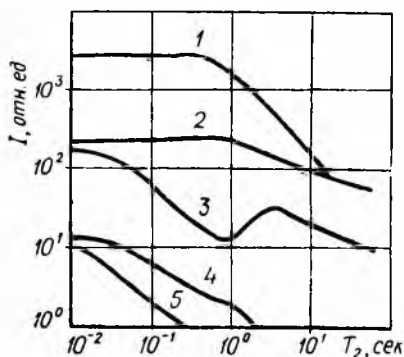


Рис. 1. Зависимость интенсивности ЭХЛ от интервала между записывающим и считывающим импульсами для дифенилстирилпиразолина (1), тетрафенилбутадиена (2), антрацена (3), люмогена синефиолетового (4), люмогена желто-зеленого (5).

При увеличении интервала времени между записывающим и считывающим импульсами интенсивность ЭХЛ уменьшается, что обусловлено, по-видимому, вымиранием катион-радикалов актора. Время памяти T_n определим, как период, в течение которого интенсивность ЭХЛ уменьшается в e раз. После такого уменьшения заметного суммирования последующих поступающих электрических импульсов с предыдущими не будет.

Экспериментальные зависимости интенсивности ЭХЛ от длительности интервала между записывающим и считывающим импульсами для ЭХЛ композиций нескольких люминесцирующих

Активатор	$U_1, в$	$U_2, в$	$T_1, сек$	$T_3, сек$	$T_n, сек$	A_{max} отн. е
1, 5-дифенил-3-стирилпиразолин	4	15	0,04	0,01	1,2	2800
Тетрафенилбутадиен	5,5	15	0,25	0,02	12	250
Антрацен	8	15	0,25	0,02	0,1	180
Люмоген желто-зеленый	8	15	0,25	0,05	0,05	10
Люмоген синефиолетовый	4,2	15	0,25	0,05	0,16	14

ществ показаны на рис. 1. Параметры режима возбуждения, время памяти и максимальная интенсивность ЭХЛ для этих веществ приведены в таблице.

Как видно из таблицы, время запоминания для данных активаторов изменяется в интервале от 12 сек для тетрафенилбутадиена до 0,05 сек для люмогена желто-зеленого. Антрацен, в отличие от других активаторов, имеет второй максимум при $T_2=4$ сек. Наличие этого максимума может быть обусловлено диффузионным перераспределением ионов у поверхности рабочего электрода. Из данных активаторов наибольший технический интерес для моделирования нервных клеток представляет ДФСП. Он имеет наибольшую яркость свечения, что упрощает задачу согласования по чувствительности ЭХЛ элемента с фотоприемником. Однако его время памяти значительно больше, чем время запоминания подпороговых импульсов телом клетки реального нейрона. По времени запоминания для моделирования нейрона больше подходит люмоген желто-зеленый, но он имеет наименьшую яркость свечения.

Запоминающие свойства ЭХЛ композиции с активатором ДФСП исследовались при различных режимах возбуждения. Было найдено, что при длительностях $T_1=1$ сек, $T_3=0,1$ сек и $U_2=10$ в, интенсивность ЭХЛ достигает максимума при $U_1=2,1$ в. Зависимость интенсивности ЭХЛ от T_2 при указанных параметрах возбуждения приведена на рис. 2. а. Сокращение T_1 ведет к уменьшению интенсивности ЭХЛ. Для повышения интенсивности ЭХЛ при малых T_1 следует увеличить U_1 .

Повышение U_1 ведет к ускорению перезарядки двойного электрического слоя и возрастанию фарадеевского тока. О влиянии длительности записывающего импульса на запоминающие свойства ЭХЛ элемента можно судить по рис. 2, а. Ход этих зависимостей обусловлен вымиранием катион-радикалов ДФСП при увеличении T_2 . Выбор длительности записывающего импульса следует производить исходя из двух требований. С одной стороны, эта длительность должна быть по возможности меньшей для повышения быстрейшего действия модели нейрона. С другой стороны, ее следует

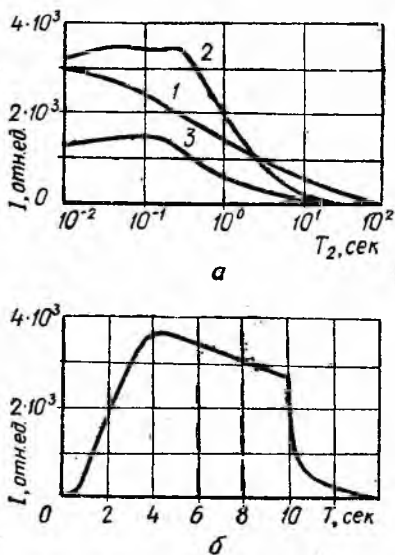


Рис. 2. Кратковременная память ЭХЛ композиции с активатором ДФСП.

а — зависимость интенсивности ЭХЛ от интервала между записывающим и считывающим импульсами при $T_1=1$ сек, $T_3=0,1$ сек (1), $T_1=0,04$ сек, $T_3=0,01$ сек, $V_1=4$ в (2), $T_1=0,2$ сек (3); б — форма светового импульса ЭХЛ.

выбирать с учетом получения определенного уровня свечения, поскольку при сокращении T_2 интенсивность ЭХЛ падает. Как видно из рис. 2, а, уменьшение T_1 от 0,04 до 0,02 сек ведет к уменьшению яркости ЭХЛ более чем в 2 раза.

Длительность считывающего импульса T_3 следует выбирать исходя из периода разгорания светового импульса. Его форма приведена на рис. 2, б, когда $U_1=4$ в, а $U_2=15$ в. Таким образом, световой импульс достигает максимума через 4 мсек, и длительность $T_3=0,01$ сек для считывания записанной информации вполне достаточна. Следовательно, в ЭХЛ ячейке с коаксиальным расположением электродов для получения максимального быстрого действия и наибольшей яркости свечения оптимальным будет режим: $U_1=4$ в, $T_1=0,04$ сек, $U_2=15$ в, $T_3=0,01$ сек. В данном режиме работы максимальная частота генерации импульсов составит 20 гц.

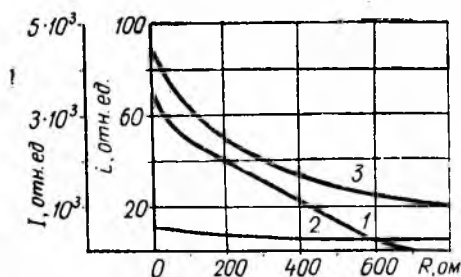


Рис. 3. Зависимость интенсивности ЭХЛ 1 (1), тока анодной фазы i (2), тока катодной фазы i (3) от величины весового сопротивления.

Наряду с кратковременной памятью, основанной на кабельных свойствах тела клетки, в нейронах имеется долговременная память. Она сосредоточена в синаптических окон-

чаниях межнейронных соединений. Воспроизвести синаптическую память в ЭХЛ ячейке можно широко используемым способом — путем введения внешних весовых сопротивлений. Для выяснения управляемости ЭХЛ ячейки была снята зависимость интенсивности ЭХЛ и токов через ячейку в различные полупериоды возбуждающего напряжения от величины весового сопротивления. Включалось оно последовательно с рабочим электродом ячейки. Указанные зависимости приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, интенсивность ЭХЛ, представленная кривой 1, уменьшается линейно до 0 с увеличением весового сопротивления от 0 до 700 ом. Это показывает хорошую управляемость ЭХЛ элемента при сравнительно малом изменении весового сопротивления.

Уменьшение яркости свечения при увеличении весового сопротивления ведет к тому, что часть напряжения падает на нем, общее сопротивление возрастает и через ячейку протекает меньший ток. При этом уменьшается количество катион- и анион-радикалов активатора, образующихся соответственно в положительный и отрицательный полупериоды возбуждающего напряжения. Следует отметить, что при $R=700$ ом яркость свечения почти равна нулю а через ячейку еще протекает определенный ток в катодную и анодную фазы. Это обусловлено, по-видимому, тем, что практически вся энергия расходуется на перезарядные процессы, а количество образующихся нон-радикалов активатора ничтожно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гых А. И., Восвода Л. В., Худенский Ю. К. Об одной возможности создания быстродействующей электрохимической модели нейрона. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 5, Харьков, 1971, с. 50—53.
- Городнейчук И. Ф., Леонов В. П., Бых А. И. К построению электролюминесцентной модели нейрона. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 3. Харьков, 1974, с. 43—49.
- Толин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., «Наука», 1970. 260 с.

К 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук, С. А. УСЕНКО,
С. Ю. ПРИХОДЬКО

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ШКАЛИРОВАНИЯ ГРОМКОСТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В СЛУХЕ

Основной задачей психофизики является установление связей между физическими свойствами сигналов, действующих на входе сенсорной системы и видом соответствующих реакций на ее выде. В настоящей статье рассматриваются некоторые вопросы теории психофизического шкалирования. Первые шаги этой теории издаются с зарождением самой психофизики.

Два столетия назад, в 1729 г., французский физик Бугер исследовал свою способность различать тень, отбрасываемую свечой при условии, что экран, на который падает тень, одновременно освещается другой свечой. С помощью этих измерений он довольно точно установил, что отношение $\frac{\Delta J}{J}$ в отличие от абсолют-

ных величин ΔJ является величиной почти постоянной. В данном случае ΔJ (по Бугеру) — минимально воспринимаемый прирост ощущения, J — исходное ощущение.

В 1834 г. Вебер повторил забытый к тому времени опыт Бугера. Вебер установил постоянство отношений минимально воспринимаемого прироста высоты звука к его исходной величине. Само название «закон Вебера» принадлежит Фехнеру, но впоследствии укоренилось выражение «закон Вебера — Фехнера». Обозначая силу звука через J , запишем закон Вебера в такой форме:

$$\frac{\Delta J}{J} = \text{const.} \quad (1)$$

Для звукового восприятия этот закон справедлив в довольно широком интервале. Фехнер подверг соотношение (1) некоторой математической обработке, получив соотношение $\frac{dJ}{J} = dS$, где dS — бесконечно малый прирост ощущения.

В такой форме закон Вебера представляет собой простейшее дифференциальное уравнение, которое можно интегрировать: $S = A \ln J + C$.

В такой форме закон носит название закона Вебера — Фехнера согласно которому ощущение S пропорционально логарифму раздражения I .

В дальнейшем основные идеи психофизики были сформулированы в 20—30-е годы нашего столетия. Однако необычайно высокий интерес к ней стал проявляться в последнее десятилетие.

Наиболее подходящей для исследования восприятий в настоящее время представляется теория построения психофизических шкал. В основе этой теории лежит факт, что сенсорные анализаторы человека способны оценивать субъективные расстояния при оценке стимулов различной модальности. Из целого ряда исследований по очень простой методике обнаружилось, что человеку присуща способность без всякой предварительной тренировки оценивать изменение громкости в небольшое число раз. Человек способен судить о том, что громкость одного звука в 2, 3, 4 раза больше громкости другого звука. На первый взгляд такая оценка кажется совершенно произвольной, но если попробовать произвести эти суждения, то оказывается, что они имеют полный смысл, так у любого человека имеется достаточная уверенность и достаточное постоянство в таких суждениях.

Суждение об увеличении громкости в более сложных отношениях человеческой психикой плохо выработано. Увеличение громкости в 10 раз оценить довольно трудно. Правда, некоторые исследователи пытались установить изменения громкости в 10 и 100 раз, но при этом получается совершенно неуверенное суждение. Путем последовательного удваивания громкости рядом авторов были построены психофизические шкалы громкости.

Примером практического применения подобных шкал являются общезвестные музыкальные нотации: *PPP* (пиано-пианиссимо), *PP* (пианиссимо), *P* (пиано), *mp* (меццо-пиано), *mf* (меццо-форте), *f* (форте), *ff* (фортиссимо), *fff* (форте-фортиссимо). Продолжительные обозначения этой шкалы, по мнению многих музыкантов, означают примерно удвоение громкости. Например, *ff* оценивается вдвое громче, чем *mf*, *fff* оценивается вдвое громче, чем *ff*. Вся музыкальная шкала имеет семь промежутков от пиано-пианиссимо до форте-фортиссимо. Весь диапазон, как известно, укладывается в 70—75 *дб*.

Задача шкалирования субъективных расстояний является задачей одномерного шкалирования. Методы шкалирования субъективных расстояний можно разделить на две группы: 1) методы, требующие от испытуемого сравнения расстояний между объектами в предъявляемых ему парах; 2) методы, требующие от испытуемого оценки величины расстояния между объектами в 1) В работе (1) выясняются необходимые и достаточные условия предъявляемые к приемнику информации, для которого существует психофизическая шкала. Целью нашей работы является экспериментальная проверка этих условий в случае шкалирования субъективных интервалов громкости.

Прежде чем сформулировать эти условия, введем некоторые обозначения. Заметим, что множество всех стимулов громкости конкретной экспериментальной ситуации ограничено сверху снизу.

Обозначим нижнюю границу переменного параметра через $A (A > 0)$, верхнюю — через $B (B < \infty)$, M — множество всех отрезков $a \subset (A, B)$. Будем обозначать через $x_1(a)$ и $x_2(a)$ соответственно левый и правый концы отрезка a .

Рассмотрим теперь функцию $L(a, \beta)$, определенную на всевозможных парах a и β ($a, \beta \in M$) и принимающую значения 0 и 1. Будем считать, что $L(a, \beta)$ допускает шкалу равных расстояний, если существует непрерывная, строго возрастающая функция φ , которая отображает $[A, B]$ на $[0, 1]$ так, что $L(a, \beta) = L_0(\varphi(x_2(a)) - \varphi(x_1(a)), \varphi(x_2(\beta)) - \varphi(x_1(\beta)))$, где L_0 — характеристическая

функция диагонали единичного квадрата: $L_0(\xi, \eta) = \begin{cases} 1 & \xi = \eta \\ 0 & \xi \neq \eta \end{cases} (0 \leq \xi, \eta \leq 1)$.

Произвольная функция φ , удовлетворяющая этим условиям, есть шкала равных расстояний.

Теперь сформулируем необходимые и достаточные условия, при которых функция $L(a, \beta)$ допускает подобную шкалу.

1. $L(a, a) = 1$.
2. $L(a, \beta) = L(\beta, a)$.
3. Если $L(a, \beta) = 1$ и $L(\beta, \gamma) = 1$, то $L(a, \gamma) = 1$.
4. Если $a \subset \beta$ и $a \neq \beta$, то $L(a, \beta) = 0$.
5. Если $x_2(a) = x_1(\beta)$, $x_2(a') = x_1(\beta')$ и $L(a, a') = L(\beta, \beta') = 1$, то $L(a \cup \beta, a' \cup \beta') = 1$.
6. Для всякого $a \in M$ существует точка $x(a) \in a$ такая, что $L(a, a_+) = 1$, где $a_-(a) = [x_1(a), x(a)]$, $a_+(a) = [x(a), x_2(a)]$.
7. Если $x_2(a) = x_1(\beta)$, $x_2(a') = x_1(\beta')$ и $L(a, \beta) = L(a', \beta') = 1$, то $L(a \cup \beta, a' \cup \beta') = 1$.
8. Если $L(\alpha_n, \beta_n) = 1$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \alpha$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = \beta$ то $L(\alpha, \beta) = 1$.

Если все эти условия допускают экспериментальную проверку, то предложенное описание является математической моделью данного свойства.

Рассмотрим каждое условие в отдельности. На содержательном уровне первое условие означает, что если испытуемому всегда предъявить одну и ту же пару стимулов, то расстояния всегда совпадают.

При совпадении субъективных расстояний испытуемый дает положительный ответ «да», если не совпадают — ответ «нет» (соответственно «1» или «0»).

Из условия 2 следует, что если поменять местами пары стимулов, в которых расстояния совпадают, или поменять очередность предъявления пар, то расстояния совпадут.

Свойство 3 описывает транзитивность при оценке сенсорных интервалов. В эксперименте это свойство проявляется следующим образом. Если испытуемому предъявить четыре стимула $A_1 A_2 A_3 A_4$,

причем расстояния в парах $\langle A_1A_2 \rangle \langle A_3A_4 \rangle$ одинаковы, а затем предъявить следующие два стимула $\langle A_5A_6 \rangle$, выбранных так, чтобы расстояния в парах $\langle A_3A_4 \rangle \langle A_5A_6 \rangle$ совпали, то после предъявления пар $\langle A_1A_2 \rangle \langle A_5A_6 \rangle$ испытуемый дает ответ «да», т. е. расстояния в последних парах также должны совпасть.

Условия 1—3 являются чисто техническими аксиомами и не требуют экспериментальной проверки. Условия 4 означают, что при равенстве двух громкостей $\langle A_1A_2 \rangle \langle A_3A_4 \rangle$, где $\langle A_1 \rangle \leq \langle A_3 \rangle < \langle A_2 \rangle > \langle A_4 \rangle$ — расстояния в парах, совпадать не должны. Очевидно, эти аксиомы будут выполняться с точностью до порога различения.

Условие 5 является довольно сильным утверждением и без словно должно быть проверено в эксперименте. Рассмотрим его подробнее. Пусть имеется четыре отрезка $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$, расположенных на одной прямой. Отрезки выбраны таким образом, что конец первого совпадает с началом второго, а конец третьего — с началом четвертого. Первый отрезок равен третьему, а второй — четвертому. В этом случае, если условие 5 выполняется, то суммарные отрезки, соответствующие $\alpha \cup \beta$ и $\alpha' \cup \beta'$, должны быть одинаковыми. Эксперименты проводились при помощи установки, описанной в работе [2].

Как известно, при проведении психоакустического эксперимента резкое включение и выключение звуковых сигналов сопровождается щелчками, что затрудняет проведение эксперимента.

Для ликвидации щелчков в схему включен формирователь фронтов, с помощью которого осуществляется замедленное нарастание и спад звуковых импульсов. Длительность звуковой посылки $t=0,5$ сек. Интервал между посылками в паре равнялся 1 сек. Интервал между парами — 2 сек.

Условие 5 проверялось в диапазоне громкости 30—80 дб, в этом весь диапазон разбивался на условные единицы громкости (30 дб соответствует 5 у. е., 80 дб — 90 у. е.).

Аксиома проверялась так. Вначале фиксировались то $\langle A_1A_2 \rangle$ (интервал α) и A'_1 (начало интервала α'). Испытуемому была дана инструкция подобрать громкость A'_2 таким образом, чтобы интервалы α и α' в сознании испытуемого совпали: $A = 5$ у. е., $A_2 = 16$ у. е., $A'_1 = 40$ у. е.

На следующем этапе эксперимента фиксировались то $\langle A_3A_4 \rangle$ (интервал β) и $A'_2 = A'_3$ (начало интервала β'). Тогда A'_4 находилась самым испытуемым в процессе подравнивания громкостных интервалов $\beta\beta'$ $A_2 = 16$ у. е., $A_4 = 24$ у. е.

Основная проверка заключалась в нахождении испытуемой точки путем сравнения интервалов $\alpha + \beta$ и $\alpha' + \beta'$. При этом A_1A_4 (интервал $\alpha + \beta$) и A'_1 (начало интервала $\alpha' + \beta'$) фиксировались. Значения этих величин такие, как и в предыдущем опыте. Если найденная таким образом точка A'_4 совпадает с A_4 , найденной в предыдущей проверке, то можно сказать, что выполняется условие 5. Результаты проверки сведены в табл. 1.

Как уже писалось, в опытах участвовало 10 испытуемых, каждый из которых прослушивал сигналы 10 раз. Следовательно, по каждой проверке было проанализировано 100 ответов испытуемых. В табл. 1 приведены средние данные по каждому испытуемому в условных единицах. В конце этой таблицы даны среднеарифметические величины по 10 испытуемым. Как видно из табл. 1, аксиома 5 выполняется в указанном диапазоне громкости с достаточной степенью точности.

Условие 6 говорит о том, что для любого сенсорного отрезка α всегда существует такая точка x , которая делит данный отрезок пополам. Способность слухового анализатора человека осуществлять операцию равноделения отмечалось многими авторами [3]. Поэтому данное свойство мы экспериментально не проверяли.

Интерпретация седьмой аксиомы состоит в том, что если имеется две пары отрезков, подобранных таким образом, что первый равен второму, а третий — четвертому, причем суммарные отрезки, состоящие из названных пар, также равны, то первый отрезок равен третьему. Значение величины громкости в эксперименте следующее: $A_1=5$ у. е., $A'_1=40$ у. е., $A_4=24$ у. е., $A'_4=88$ у. е., $A_3=14$ у. е., $A'_2=59$ у. е.

Методика проверки этой аксиомы ничем не отличалась от предыдущей; результаты проверки представлены в табл. 2.

Для экспериментальной проверки аксиомы 8 испытуемому предъявлялась последовательность пар громкостей, стремящихся к определенной паре. Опыт показал, что равенство расстояний фиксировалось для обеих пар до изменения громкостей, то оно поддерживалось и при изменении.

Таблица 1

№	$A_2=A_4$ у. е.	$A'_2=A'_3$ у. е.	$A'_2=A'_4$ у. е.
1	90	94	100
2	58	86	74
3	72	98	96
4	62	92	92
5	82	96	101
6	60	94	84
7	94	98	100
8	56	90	80
9	78	100	83
10	54	88	100
СР	70,6	93,3	91

Таблица 2

№	$A_2=A_3$ у. е.	$A'_2=A'_3$ у. е.	$A'_2=A'_3$ у. е.
1	16	62	62
2	16	62	60
3	14	63	62
4	13	58	52
5	14	65	64
6	14	56	61
7	12	54	49
8	13	52	59
9	14	62	60
10	12	57	59
СР	14	59	58,9

Таким образом, условия 1—8 выполняются в случае оценки громкостных интервалов. Это говорит о том, что любая построенная шкала расстояний ϕ является шкалой психофизической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Г. С. Об одном способе исследования слуха. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 3—9.
2. Майстровская Л. М., Качко Е. Г., Еремин Г. С., Марченко Ю. С. Об условиях существования психофизических шкал равных расстояний. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 8, Харьков, 1972, с. 5—9.
3. Ржевкин С. Н. Слух и речь в свете современных физических исследований. М., «Наука», 1936. 307 с.

УДК 15.370.153

И. Д. ПОНОМАРЕВА

АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ В РЯД ИЗ ПРОИЗВОДНЫХ

В ряде случаев сигналы, имеющие характер стационарных случайных процессов (например, электроэнцефалограмма, электромиограмма), удобно интерпретировать как выходы линейных систем. Задача нахождения линейных систем успешно решается, если корреляционная функция представима в виде конечной суммы экспоненциально-косинусных выражений, так как спектральная плотность для функций такого вида может быть представлена дробно-линейным выражением. При таком подходе вход системы является случайным и характеризуется определенной функцией распределения¹.

В то же время целесообразен и другой подход к определению линейной системы, выходом которой является исследуемый процесс. Этот подход основан на возможности разложения непрерывной случайной функции в ряд из производных.

Рассмотрим возможность такого разложения. Пусть $x(t)$ — дифференцируемая случайная функция, представляющая собой стационарный процесс с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Предположим, что $x(t)$ имеет n -ю производную в среднем квадратичном, т. е. при $\tau=0$ существуют все производные корреляционной функции $R(\tau)$ до $2n$ -порядка включительно.

Согласно теореме Хинчина, корреляционная функция случайного стационарного процесса может быть представлена в виде суммы $R(\tau) = R_1(\tau) + R_2(\tau)$, где $R_1(\tau)$ — почти периодическая функция, задаваемая в виде экспоненциально-косинусного выражения, а функция $R_2(\tau)$ такова, что $\{R_2(\tau)\}^2$ имеет среднее значение нуль.

Используя операцию скользящего суммирования, рассмотрим разложение n -производных процесса в ряды

$$x^{(1)}(t) = \sum_{l=0}^{\infty} m_{l+1} x(t - \delta l);$$

¹ Бендат Д. Основы теории случайных шумов и ее применение. М., «Наука», 1965. 373 с.

$$x^{(2)}(t) = \sum_{i=0}^n m_{2i+1} x(t - i\Delta t); \quad (1)$$

.....

$$x^{(n)}(t) = \sum_{i=0}^n m_{ni+1} x(t - i\Delta t).$$

Здесь Δt определяется моментом первого перехода корреляционной функции через нуль $R(\tau_1) = 0$, $\tau_1 = \Delta t$.

Операция скользящего суммирования применяется в задачах предсказания и фильтрации, как один из простых и в то же время эффективных методов выделения сигнала из шума.

Случайный процесс $\xi(t)$ представляется как $\xi(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i \eta(t - i)$, где $\eta(t - i)$, $i = -\infty, \dots, 1, 2, \dots, \infty$ — независимые случайные процессы, имеющие одинаковое распределение вероятностей, а $M|\xi(t)|^2 = \sum_{i=1}^{\infty} |a_i|^2 < \infty$. Неизвестные коэффициенты $\{a_i\}$ определяются по методу наименьших квадратов.

Для нахождения неизвестных коэффициентов $\{m_{ij}\}$ будем рассматривать

$$x(t), x(t - \Delta t), x(t - 2\Delta t), \dots, x(t - n\Delta t) \quad (2)$$

как систему базисных функций. Система (2) является квазиортogonalной, если скалярное произведение определить как момент

$$\overline{x(t - i\Delta t) x(t - j\Delta t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t - i\Delta t) \times x(t - j\Delta t) dt = R((j - i)\Delta t), \text{ где } i = 1, 2, 3, 4, \dots, n, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n.$$

Функция $R(i, j)$ равномерно ограничена, максимального значения достигает при $j - i = 2$.

Произведем ортогонализацию системы функций (2) по методу Шмидта. Положим

$$\varphi_1 = x_1; \quad \varphi_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2; \quad \varphi_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3; \quad \varphi_4 = a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4; \quad \dots \quad \varphi_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n.$$

Значение коэффициентов $\{a_{ij}\}$ найдем из условий $|\varphi_i| = 1$, $(\varphi_i, \varphi_j) = 0$ при $j \neq i$. Таким образом, $\varphi_2 = x_2$.

Для процессов, у которых корреляционная функция является экспоненциально-косинусной, система функций $\{\varphi_n\}$ имеет вид

$$\varphi_1 = x_1; \quad \varphi_2 = x_2; \quad \varphi_3 = -\frac{R(2\Delta t)}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} x_1 + \frac{1}{1 - R^2(2\Delta t)} x_3; \quad (4)$$

$$\varphi_4 = \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} x_4.$$

$$x^{(2)}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} m_{2i+1} x(t - i\Delta t); \quad (1)$$

.....

$$x^{(n)}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} m_{ni+1} x(t - i\Delta t).$$

Здесь Δt определяется моментом первого перехода корреляционной функции через нуль $R(\tau_1) = 0$, $\tau_1 = \Delta t$.

Операция скользящего суммирования применяется в задачах предсказания и фильтрации, как один из простых и в то же время эффективных методов выделения сигнала из шума.

Случайный процесс $\xi(t)$ представляется как $\xi(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \times a_i \eta(t - i)$, где $\eta(t - i)$, $i = -\infty, \dots, 1, 2, \dots, \infty$ — независимые случайные процессы, имеющие одинаковое распределение вероятностей, а $M|\xi(t)|^2 = \sum_{i=1}^{\infty} |a_i|^2 < \infty$. Неизвестные коэффициенты $\{a_i\}$ определяются по методу наименьших квадратов.

Для нахождения неизвестных коэффициентов $\{m_{ij}\}$ будем рассматривать

$$x(t), x(t - \Delta t), x(t - 2\Delta t), \dots, x(t - n\Delta t) \quad (2)$$

как систему базисных функций. Система (2) является квазортональной, если скалярное произведение определить как момент

$$\overline{(x(t - i\Delta t), x(t - j\Delta t))} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t - i\Delta t) \times x(t - j\Delta t) dt = R((j - i)\Delta t), \text{ где } i = 1, 2, 3, 4, \dots, n, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n.$$

Функция $R(i, j)$ равномерно ограничена, максимального значения достигает при $j - i = 2$.

Произведем ортогонализацию системы функций (2) по методу Шмидта. Положим

$$\varphi_1 = x_1; \quad \varphi_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2; \quad \varphi_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3; \quad \varphi_4 = a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4; \quad \dots \quad \varphi_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n.$$

Значение коэффициентов $\{a_{ij}\}$ найдем из условий $\|\varphi_i\| = 1$, $(\varphi_i, \varphi_j) = 0$ при $j \neq i$. Таким образом, $\varphi_2 = x_2$.

Для процессов, у которых корреляционная функция является экспоненциально-косинусной, система функций $\{\varphi_n\}$ имеет вид

$$\varphi_1 = x_1; \quad \varphi_2 = x_2; \quad \varphi_3 = -\frac{R(2\Delta t)}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} x_1 + \frac{1}{1 - R^2(2\Delta t)} x_3; \quad (4)$$

$$\varphi_4 = \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} x_4.$$

Подставив значения коэффициентов b_{ij} и функций $\{\varphi_i\}$ в уравнение (5), получим ряды ортогональных разложений (1), где коэффициенты $\{m_{ij}\}$ будут иметь вид

$$\begin{cases}
 m_{11} = b_{11} + \varepsilon_1, \\
 m_{12} = b_{12}, \\
 m_{13} = b_{13} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \dots \\
 m_{1n} = b_{1n} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \\
 m_{21} = b_{21} + \varepsilon_2, \\
 m_{22} = b_{22}, \\
 m_{23} = b_{23} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \dots \\
 m_{2n} = b_{2n} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \\
 \dots \\
 m_{n1} = b_{n1} + \varepsilon_n, \\
 m_{n2} = b_{n2}, \\
 m_{n3} = b_{n3} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \dots \\
 m_{nn} = b_{nn} \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}}, \\
 \\
 \varepsilon_1 = - \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} b_{13} R(2\Delta t), \\
 \varepsilon_2 = - \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} b_{23} R(2\Delta t), \\
 \dots \\
 \varepsilon_n = - \frac{1}{\sqrt{1 - R^2(2\Delta t)}} b_{n3} R(2\Delta t).
 \end{cases} \quad (7)$$

В (7) $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$ — погрешности, обусловленные отличием системы функций (2) от системы функций $\{\varphi_i\}$. Сходимость рядов (7) определяется скоростью затухания $R(\tau)$ процесса. Определив коэффициенты $\{m_{ij}\}$, можно перейти от системы уравнений (1) к раз-

ложению случайного процесса $x(t)$ в ряд из его производных. Для этого следует, ограничившись n составляющим в каждой из сумм, решить систему (1) относительно $x(t)$.

Если автокорреляционная функция процесса быстро затухает, систему функций $\{x(t-i\Delta t)\}$, $i=0,1,\dots, n$ можно принять за базисную и считать ортогональной вследствие малости значений $R(2\Delta t)$, $R(3\Delta t)$... Следовательно, допустимо следующее разложение производных процесса $x'(t), \dots, x^n(t)$:

$$\begin{aligned} x'(t) &= a_{11}x(t) + a_{12}x(t-\Delta t) + \dots + a_{1n}x(t-(n-1)\Delta t); \\ x''(t) &= a_{21}x(t) + a_{22}x(t-\Delta t) + \dots + a_{2n}x(t-(n-1)\Delta t); \\ &\dots \\ x^{(n)}(t) &= a_{n1}x(t) + a_{n2}x(t-\Delta t) + \dots + a_{nn}x(t-(n-1)\Delta t). \end{aligned} \quad (8)$$

Умножая левые и правые части равенств системы (8) последовательно на каждую из функций $x(t), x(t-\Delta t), \dots, x(t-(n-1)\Delta t)$, определим значения коэффициентов $\{a_{ij}\}$. В результате получим

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=0}; \quad a_{12} = \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=\Delta t}; \quad \dots \quad a_{1n} = \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=(n-1)\Delta t} \\ a_{21} &= \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}; \quad a_{22} = \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=\Delta t}; \quad \dots \quad a_{2n} = \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=(n-1)\Delta t} \\ &\dots \\ a_{n1} &= \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=0}; \quad a_{n2} = \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=\Delta t}; \quad \dots \quad a_{nn} = \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=(n-1)\Delta t} \end{aligned}$$

или

$$a_{ij} = \left. \frac{d^i R}{d\tau^i} \right|_{\tau=\tau_{j-1}} \quad (9)$$

На основании системы (8) возможно разложение функции $x(t)$ в ряд из производных всюду на временной оси, за исключением точек, где обращаются в нуль одновременно все — до n -й включительно — производные этой функции.

Запишем значения (2) в виде

$$x(t) = \frac{D_1}{D}; \quad x(t - \tau_1) = \frac{D_2}{D}; \quad \dots; \quad x(t - \Delta t(n-1)) = \frac{D_n}{D}, \quad (10)$$

где D — определитель матрицы

$$M = \left\| \left. \frac{d^i R}{d\tau^i} \right|_{\tau=\Delta t(n-j)} \right\|, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n, \\ j = n, n-1, \dots, 1, \end{matrix}$$

$$D = \begin{vmatrix} \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=0} & \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=\Delta t} & \dots & \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau=\Delta t(n-1)} \\ \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} & \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=\Delta t} & \dots & \left. \frac{d^2R}{d\tau^2} \right|_{\tau=\Delta t(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=0} & \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=\Delta t} & \dots & \left. \frac{d^n R}{d\tau^n} \right|_{\tau=\Delta t(n-1)} \end{vmatrix} \quad (11)$$

а D_i — определитель, полученный из (11) путем замены i -го столбца рядом из производных.

Таким образом, получим окончательно требуемое разложение

$$x(t) = \frac{1}{D} [x'(t) A_1 + x''(t) A_2 + \dots + x^{(n)}(t) A_n]. \quad (12)$$

Значения A_1, A_2, \dots, A_n — определители алгебраических дополнений к элементам i -го столбца.

Разложение случайной функции в ряд из ее производных (12) позволяет интерпретировать ее как выход линейной системы с постоянными коэффициентами, где действие правой заменено ненулевыми начальными условиями. Такая постановка задачи может применяться практически. Например, подобный подход мы применяли для оценки параметров вызванных потенциалов мозга кролика по фоновой электрограмме. Для практических целей часто бывает достаточным наличие двух членов ряда, т. е. рассмотрение уравнения II порядка.

УДК 62.506.2

БУГАЙ Ю. П., канд. техн. наук, КУМАНИН Ю. А.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕРВНЫХ СТРУКТУР. СООБЩЕНИЕ 3

В работе описаны некоторые результаты количественной оценки разрешающей способности и информационной емкости оптической моделирующей системы, предназначенной для избыточного кодирования плоских и пространственных изображений объектов в некогерентном свете. Обсуждаются новые возможности и ограничения метода избыточной записи изображений.

Особенность работы моделирующей системы в режиме кодирования состоит в том, что изображение объекта, освещенного некогерентным диффузным светом (или самосветящегося объекта), с помощью кодировушей апертурной маски «расфокусируется» в плоскости записи и регистрируется на фотопленке, а при восстановлении диапозитив полученного промежуточного изображения освещается диффузным некогерентным светом и через расфокусирующую апертурную маску «расфокусируется» в выходной области, где происходит восстановление изображения исходного объекта [1].

Под расфокусировкой подразумевается любой используемый способ распределения информации о точечных элементах исходного или промежуточного изображения на область пространства во входной или выходной области. В связи с тем, что в рассматриваемом режиме апертурные маски позволяют реализовать только положительные ядра преобразования, в выходной области вместе с полезными элементами восстановленного изображения объекта появляется фоновая составляющая, уменьшающая контраст восстановленного изображения. Эта особенность преобразований в си-

стеме ограничивает возможности использования ее только для записи изображений, содержащих ограниченное число точечных элементов.

В настоящее время исследуется возможность увеличения разрешающей способности при записи-воспроизведении изображений по предлагаемому методу.

Точная оценка разрешающей способности оптической моделирующей системы для случая небольшого числа отверстий в кодирующей-декодирующей маске была рассмотрена в работе [2]. Однако практический интерес представляют именно маски с максимально возможным числом отверстий для наилучшего использования светового потока, исходящего от объекта, освещенного диффузным немонахроматическим светом. При использовании масок с большим количеством отверстий на единице поверхности, распределенных случайным образом, точное описание преобразований в моделирующей системе не представляется возможным. Дифракция на множестве отверстий (препятствий) одинаковой формы, распределенных случайным образом, рассмотрена и описана только для простейших волновых фронтов (плоского и сферического). Для поставленной цели существенно, что при выполнении необходимых условий (длины волны используемого света значительно меньше диаметра отверстий в масках, расстояния между объектом, маской и экраном невелико) можно пренебречь дифракционными эффектами и пользоваться при качественных расчетах оптико-геометрическими представлениями о распространении света. В настоящем сообщении описаны предварительные результаты качественной и количественной оценки разрешающей способности и информационной емкости оптической моделирующей системы в режиме записи-воспроизведения сигналов.

Для оценки разрешающей способности моделирующей системы целесообразно рассмотреть простейшую задачу записи-воспроизведения точечного изображения в системе ограниченных размеров с одним отверстием в кодирующей-декодирующей маске.

Рассмотрим работу простейшей безлинзовой системы, камеры Обскура, в которой для получения изображения объектов используется небольшое отверстие в непрозрачном тонком экране. В рассматриваемой задаче одна и та же камера используется дважды сначала для записи изображения точечного источника, затем для воспроизведения полученного изображения в той же камере при обратном ходе лучей. Повторное использование маски при обратном ходе лучей в определенном смысле может быть рассмотрено как воспроизведение изображения исходного объекта в том же месте, где находился исходный объект при записи.

Запись-воспроизведение точечного объекта в однодырочной камере

На рис. 1, *a* схематически показан ход лучей от точечного источника A через круглое отверстие a_0b_0 в маске M (диаметр $0l$

версия равен D_0). По мере удаления от маски M по оси сечения пучка увеличивается. Диаметры сечений пучков в плоскостях N_1, N_2, \dots, N_i обозначим через D_1, D_2, \dots, D_i соответственно. Расстояние от плоскости L , где расположен точечный источник A , до плоскости M маски обозначим через l . Расстояние от плоскости M до плоскостей N_1, N_2, \dots, N_i и координаты этих плоскостей в выбранной системе отсчета обозначим через z_1, z_2, \dots, z_i соответственно.

Первоначально не будем учитывать неравномерность освещенности внутри пучка и изменения освещенности по мере удаления от источника A вдоль оси z , так как пока нас интересуют только максимальные геометрические размеры пятна при его преобразованиях. Итак, предположим, что в любой плоскости N_i, N_2, \dots, N_i изображение источника A представляет собой равномерно освещенный круг соответствующего диаметра (D_1, D_2, \dots, D_i).

Размеры пятна, образованного точечным источником A (см. рис. 1, а) в произвольной плоскости наблюдения (или регистрации), можно найти из подобия треугольников Aa_0b_0 и $Aa_i b_i$ ($a_0 b_0 = D_0$), для кото-

рых справедливо отношение $\frac{D_i}{D_0} = \frac{l+z}{l}$. Из этого отношения получаем для D_i

$$D_i = D_0 + \frac{D_0}{l} z, \quad (10)$$

т. е. размеры пятна увеличиваются по линейному закону в зависимости от величины z , начиная со значения D_0 (при $z=0$). График зависимости $D_i(z)$ приведен на рис. 1, б (кривая 1).

На рис. 1, а штриховой линией показан ход лучей от пятна, сформировавшегося в плоскости N_i (от точечного объекта A), в плоскость L , где находился объект A . При воспроизведении сформировавшегося при записи пятно рассматривается как исходный объект, освещенный диффузным светом. Максимальные размеры «восстановленного» изображения равны ab (обозначим диаметр восстановленного пятна ab через D). Величину диаметра D можно найти, воспользовавшись подобием треугольников aBb и $a_i B b_i$, $a_0 B b_0$ и $a_i B b_i$, для которых справедливы отношения

$\frac{D}{(l+z_0)} = \frac{D_i}{(z-z_0)}$ и $\frac{D_0}{z_0} = \frac{D_i}{(z-z_0)}$. Исключив из двух последних

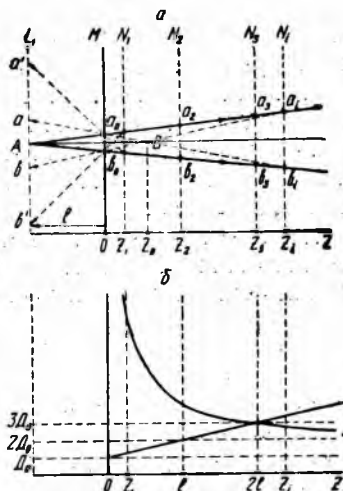


Рис. 1.

равенств z_0 , получим для диаметра пятна D «восстановленного изображения

$$D = 2D_0 l \frac{1}{z} + 2D_0. \quad (1)$$

График зависимости диаметра пятна восстановленного изображения в зависимости от расстояния z (т. е. от местоположения плоскости сфотографированного пятна при его воспроизведении) показан на рис. 1 б (кривая 2). Непосредственно из графика и с соответствующего ему аналитического выражения (2) видно, что размеры восстановленного пятна уменьшаются по гиперболическому закону по мере роста z — местоположения плоскости регистрации точечного изображения A . При $z \rightarrow \infty$ размеры восстановленного пятна асимптотически стремятся к определенному значению ($D_i = 2D_0$).

При $z \rightarrow 0$ пятно при восстановлении размывается до бесконечных размеров. Существует точка $z = 2l$ (плоскость N_3), для которой размеры пятна, получаемого при записи (см. рис. 1, б, кривая 1), равны размерам пятна, получаемого при восстановлении в плоскости L ($D_i(z_3) = 3D_0$). Расстояние $z = 2l$ соответствует расстояниям между плоскостями L , M и N в камере Обскура, при которых линейные размеры изображения, формируемого отверстием, увеличены в два раза по сравнению с размерами исходного изображения. Если $z < 2l$, начинает возрастать расфокусировка восстановленного изображения, если $z > 2l$, возрастает расфокусировка при записи изображения. И та и другая расфокусировка не желательна в системе с многодырочной маской, так как приводит к уменьшению информационной емкости системы.

Под информационной емкостью будем подразумевать максимальное число точечных элементов исходного изображения, которое можно записать и восстановить в данной системе.

К оценке информационной емкости оптической системы

На рис. 2 схематически изображена оптическая моделирующая система. Введем систему координат, плоскость XOY которой совпадает с плоскостью входного изображения, а ось Z перпендикулярна к этой плоскости. Размеры системы по осям Z , X и Y соответственно равны z , d и q . Маска M расположена на расстоянии от начала координат. Введем обозначения: D — диаметр отверстия в маске M :

σ_1 — среднее количество отверстий на единице поверхности маски;

σ_0 — среднее количество точек на единице поверхности исходного объекта.

Найдем площадь, занимаемую проекциями отверстий маски в выходной плоскости N от единственной точки A входного сигнала (размерами элемента A пока пренебрегаем). От каждой точки A входного сигнала из всей маски M в выходную плоскость

проецируется только соответствующий точке фрагмент 1, 2, 3, 4, остальные лучи не попадают в выходную плоскость системы. Обозначим размеры фрагмента 1, 2 и 3, 4 через d_1 , а размер 2, 3 и 1, 4 — через q_1 . Площадь фрагмента 1, 2, 3, 4 (обозначим ее через S_1) равна $d_1 q_1$. Из подобия треугольников 5 A 7 и 5' A 7' имеем $q_1/q = lz_i$ и $q_1 = ql/z_i$. Из подобия треугольников 5 A 6 и 5' A 6' запишем $d_1/d = l/z_i$ и $d_1 = dl/z_i$. Окончательно получаем

$$S_1 = d_1/q_1 = qdl^2/z_i^2. \quad (3)$$

Все пучки лучей, проходящие через фрагмент S_1 , попадут в пределы площади выходной плоскости ($S = dq$). Найдем площадь, покрываемую центральными проекциями отверстий фрагмента S_1 в плоскости N . Эта площадь (обозначим ее через S_n) равна

$$S_n = \sigma_1 S_1 \frac{\pi D_z^2}{4}, \quad (4)$$

где D_z — диаметр центральной проекции отверстия в плоскости Z , равный, как следует из соотношения (1), $D_z = D + \frac{D}{l}(z-l)$; σ_1 — среднее количество отверстий на единице поверхности маски. После подстановки S_1 и D_z в соотношение (4) получим

$$S_n = \frac{\pi}{4} \sigma_1 dq D^2. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует интересный вывод: площадь, занимаемая проекциями прозрачных участков используемого отдельной точкой A фрагмента маски, не зависит от координаты z , т. е. от местоположения плоскости регистрации, если величина поверхности выходной плоскости остается той же самой ($S_z = dq$).

Введем понятие избыточности сигнала при записи. Определим понятие локальной избыточности при записи (обозначим эту избыточность через J) как отношение среднего числа отдельных пятен в выходной плоскости, находящихся на элементарной площадке ΔS , к среднему (σ_0) числу точечных элементов на таком же участке площади во входной плоскости (плоскости исходного сигнала). Среднее число элементов σ_z (пятен) на единице поверхности, возникающее от единственной точки во входной плоскости системы, можно найти из отношения $n_z/S_z = \sigma_z$, где n_z — полное количество пятен в выходной плоскости. Пусть n_0 — число точечных элементов входного сигнала, для величины избыточности окончательно запишем

$$J = \frac{\sigma_z}{\sigma_0} = \frac{\sigma_1 d_1 q_1 n_0}{\sigma_0} = \sigma_1 dq l^2 \frac{1}{z^2}. \quad (6)$$

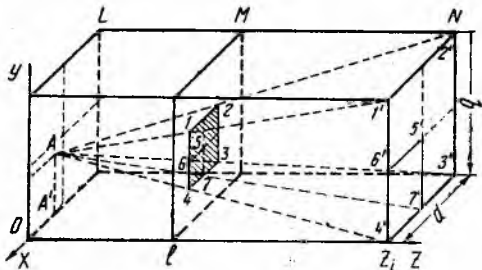


Рис. 2.

Следовательно, избыточность пропорциональна поверхностной плотности прозрачных отверстий в маске и обратнопропорциональна квадрату расстояния от плоскости объекта L до плоскости регистрации N .

Полученное для избыточности выражение (6) можно представить в другой полезной форме, если заменить среднее число отверстий на единице поверхности маски отношением полного числа отверстий в маске n_M к площади маски $S_M = dq$:

$$I = n_M l^2 \frac{1}{z^2}. \quad (7)$$

Из соотношения (6) видно, что избыточность может стать равной единице при $l = z$, т. е. при этом условии при единственном отверстии в маске исходный точечный элемент, находящийся в любом месте входной плоскости L (см. рис. 2), будет проецироваться обязательно в какую-либо точку выходной плоскости, удаленной от маски M на расстояние z , равное l . Или протяженный объект, находящийся в плоскости L , полностью помещается в выходной плоскости. Для $z > l$ в выходной плоскости, удаленной от маски более, чем на l , будет помещаться только фрагмент исходного изображения, занимающего всю входную плоскость.

Введем понятие информационной емкости системы при записи для сигнала на входе системы в виде регулярного точечного растра информационной емкостью при записи назовем отношение площади, используемой при записи в выходной плоскости ($S_z = dq$) к суммарной площади световых пятен в выходной плоскости, соответствующей единственному точечному объекту на входе системы

$S_{\pi} = \sigma_1 S_1 \frac{\pi D^2}{4}$ (см. соотношение (4)). Обозначим величину информационной емкости через ϵ . Тогда величина информационной емкости при записи может быть выражена через параметры системы следующим образом:

$$\epsilon = \frac{S_z}{S_{\pi}} = \frac{4}{\pi \sigma_1 D^2}, \quad (8)$$

где σ_1 — среднее количество отверстий на единице поверхности маски.

Найдем связь между информационной емкостью и избыточностью при записи. Исключив из соотношений (7) и (8) σ_1 , имеем

$$\epsilon = \frac{4dqI^2}{\pi l^2}. \quad (9)$$

Таким образом, информационная емкость системы при записи обратно пропорциональна избыточности и квадрату расстояния плоскости регистрации от плоскости, в которой расположена маска M , т. е. из-за того, что при росте z увеличиваются размеры пятен от каждой точки входного сигнала, уменьшается число пятен в изображении, которые еще можно записать без наложения друг

на друга. Полученное значение информационной емкости оказывается сильно заниженным по сравнению с тем, которое получено в эксперименте, так как исходное изображение восстанавливается и при многократном наложении проекций входных точечных элементов, возникающих в выходной плоскости.

Значительное увеличение информационной емкости системы может быть получено при использовании комбинации линзы и одной или нескольких апертурных масок. Система, содержащая линзы, позволяет осуществить преобразования входного сигнала, в функциональном отношении подобные тем, которые осуществляются в голографическом устройстве с опорным источником света. Подробнее такая система будет рассмотрена в следующих сообщениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П., Червов В. Г. Об одном методе записи-восстановлении изображений в некогерентном свете при использовании опорного предмета. — Всесоюзная научно-техническая конференция «Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстротекущих процессов». Тезисы докладов. М., 1972, с. 123—124.
2. Оптическая система для исследования биогографических моделей нервной системы. Сообщение 2. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1975, с. 74—78. Авт.: В. А. Бахтигозин, Ю. П. Бугай, Ю. А. Куманин, В. Г. Червов.

УДК 62.506.2

В. М. БОНДАРЕВ, В. А. ЛОВИЦКИИ

ФОРМИРОВАНИЕ ПОНЯТИЙ КАК ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ

При создании совершенных систем искусственного интеллекта необходимо учитывать особенности человеческого мышления и, прежде всего, абстрактного мышления, в основе которого лежит процесс формирования абстрактных понятий¹.

Здесь рассматривается один из способов формирования понятий, характеризующих конечные множества объектов и позволяющих разбивать каждое из этих множеств на два подмножества. Каждый из объектов этих множеств задан конечным набором признаков, а признак, в свою очередь, может принимать только два значения. Такое задание объектов представляется довольно общим, так как все объекты с признаками, принимающими любое конечное число значений, могут быть сведены к объектам с двузначными признаками, путем применения следующего единого теста для признаков. «Имеет ли признак i значение j ?»¹.

При постановке задачи будем использовать определения, предложенные Э. Хантом.

Объектами называются те реальные элементы, которые может наблюдать человек или искусственная система формирования по-

¹ Хант Э. Моделирование процесса формирования понятий на вычислительной машине. М., «Мир», 1970. 302 с.

ятий. Объекты можно различать по тем значениям, которые принимают характеризующие их признаки.

Наименование — произвольная отметка, приписываемая объекту.

Понятие — решающее правило, применение которого к описанию объекта позволяет определить, принадлежит ли данный объект к тому множеству, которому соответствует рассматриваемое наименование.

Пусть задано конечное множество объектов

$$H = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}. \quad (1)$$

Каждый из этих объектов $A_i (A_i \in H)$, характеризуется упорядоченным набором одних и тех же признаков, число которых равно N . Любой признак может принимать только два значения: 0 или 1, поэтому каждому объекту можно поставить во взаимно-однозначное соответствие упорядоченную последовательность двоичных цифр длиной N , т. е. $A_i = \{x_{ij}\}$, где x_{ij} обозначает j -е значение i -го признака.

В дальнейшем не будем различать объект A_s и соответствующую ему последовательность A'_s , там, где это не вызовет затруднений в понимании. Под равенствами $x_{ij} = 1$ и $x_{ij} = 0$ условим подразумевать тот факт, что j -е значение i -го признака некоторого объекта характеризуется 1 или 0.

Необходимо заметить, что каждый признак объекта может принять лишь одно из возможных значений, т. е.

$$\forall i ((x_{ij} = 1) \oplus (x_{ij} = 0)), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Знак \oplus обозначает операцию «разделительное или».

Пусть на множестве H задано такое его разбиение на два подмножества H_1 и H_2 , что

$$\begin{aligned} H_1 \cup H_2 &= H; \\ H_1 \cap H_2 &= \emptyset. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом все объекты $A_s (A_s \in H_1)$ обладают некоторым наименованием, а объекты $A_i (A_i \in H_2)$ не обладают. Тогда задача формирования понятия сводится к построению такой функции, что

$$\forall A_i ((F(A_i) = 1) \oplus (F(A_i) = 0)), \quad (4)$$

$$A_i \in H$$

$$\forall A_i \forall A_j (((A_i \in H_1) \Rightarrow (F(A_i) = 1)) \wedge ((A_j \in H_2) \Rightarrow (F(A_j) = 0))), \quad (5)$$

где F — логическая функция от N переменных, а переменная — суть признак.

Выше было показано, что задача формирования понятия для объектов из множества H сводится к задаче построения логической функции, определенной на элементах этого множества и использующей признаки объектов в качестве своих аргументов. Перейдем к описанию способа построения такой функции.

Отметим девять возможных ситуаций для каждого признака объектов из множества H .

Ситуация 1. i -й признак принимает значение 1 для всех объектов из H :

$$\begin{aligned} \exists i \forall A_s (x_i = 1). \\ A_s \in H \end{aligned} \quad (6)$$

Ситуация 2. i -й признак принимает значение 0 для всех объектов из H :

$$\begin{aligned} \exists i \forall A_s (x_i = 0). \\ A_s \in H \end{aligned} \quad (7)$$

Ситуация 3. i -й признак принимает значение 1 для всех объектов из H_1 и значение 0 для всех объектов из H_2 :

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 1) \wedge \forall A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_1 \quad A_s \in H_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Ситуация 4. i -й признак принимает значение 0 для всех объектов из H_1 и значение 1 для всех объектов из H_2 :

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 0) \wedge \forall A_s (x_i = 1)). \\ A_s \in H_1 \quad A_s \in H_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Ситуация 5. i -й признак принимает значение 1 для всех объектов из H_1 , а во множестве H_2 имеются такие объекты, для которых $x_i = 1$ и такие, для которых $x_i = 0$:

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_1 \quad A_s \in H_2 \quad A_s \in H_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Ситуация 6. i -й признак принимает значение 0 для всех объектов из H_1 , а во множестве H_2 имеются такие объекты, для которых $x_i = 1$ и такие, для которых $x_i = 0$:

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 0) \wedge \exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_1 \quad A_s \in H_2 \quad A_s \in H_2 \end{aligned} \quad (11)$$

Ситуация 7. i -й признак принимает значение 1 для всех объектов из H_2 , а во множестве H_1 имеются такие объекты, для которых $x_i = 1$, и такие, для которых $x_i = 0$:

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_2 \quad A_s \in H_1 \quad A_s \in H_1 \end{aligned} \quad (12)$$

Ситуация 8. i -й признак принимает значение 0 для всех объектов из H_2 , а во множестве H_1 имеются такие объекты, для которых $x_i = 0$ и такие, для которых $x_i = 1$:

$$\begin{aligned} \exists i (\forall A_s (x_i = 0) \wedge \exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_2 \quad A_s \in H_1 \quad A_s \in H_1 \end{aligned} \quad (13)$$

Ситуация 9. И во множестве H_1 , и во множестве H_2 имеются объекты с различным значением признака x_i :

$$\begin{aligned} \exists i (\exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0) \wedge \exists A_s (x_i = 1) \wedge \exists A_s (x_i = 0)). \\ A_s \in H_1 \quad A_s \in H_1 \quad A_s \in H_2 \quad A_s \in H_2 \end{aligned} \quad (14)$$

Совершенно очевидно, что понятие, которое рассматривается нами как решающее правило, не может зависеть от признака, имеющего одинаковые значения для всех без исключения объектов. Другими словами, если в данной задаче по признаку x_i имеется ситуация 1 или 2, то понятие должно описываться логической функцией, не зависящей от переменной x_i :

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_N). \quad (15)$$

Если все объекты, имеющие данное наименование, отличаются от объектов, не имеющих этого наименования по признаку x_i , то решающее правило тривиально, а логическая функция принимает вид

$$F = x_i \quad (16)$$

— для ситуации 3,

$$F = \bar{x}_i \quad (17)$$

— для ситуации 4.

Более сложным является случай, когда объекты из множества H_1 характеризуются одним и тем же значением признака x_i , например 1, а объекты из множества H_2 могут иметь в качестве значения признака x_i как 1, так и 0. Этот случай соответствует ситуации 5 по признаку x_i .

Решающее правило в ситуации 5 можно выразить следующим образом; если $x_i = 0$, то объект принадлежит к H_2 ; если $x_i = 1$, то решающее правило можно формализовать в виде функции, которая принимает значение 1 на всех объектах из H_1 и значение 0 на тех объектах из H_2 , для которых $x_i = 1$. Или

$$F = \begin{cases} 0, & \text{если } x_i = 0 \\ F_1(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_N), & \text{если } x_i = 1. \end{cases} \quad (18)$$

Следует подчеркнуть, что значение F_1 на объектах из множества H_2 , для которых $x_i = 0$, несущественно и их можно не учитывать при отыскании функции F_1 .

Поскольку F и F_1 — логические функции, принимающие лишь два значения, то на основании (18) можно составить таблицу истинности, по которой определим операцию, связующую F , F_1 и x_i :

$$\begin{array}{r} x_i \ 0011 \\ F_1 \ 0101 \\ \hline F \ 0001 \\ F = F_1 \wedge x_i \end{array} \quad (19)$$

Ситуация 6 получается из ситуации 5, если просто поменять двоичные символы, обозначающие значения признаков. Поэтому, не повторяя рассуждений, можно написать

$$F = F_1 \wedge \bar{x}_i. \quad (20)$$

для ситуации 6.

Ситуация 7 сходна с ситуацией 5. Решающее правило для ситуации 1 может быть записано так: 1) если $x_i = 0$, то объект принадлежит к H_1 ; 2) если $x_i = 1$, то решающее правило можно формализовать в виде функции, которая принимает значение 0 на всех

объектах из H_2 и значение 1 на тех объектах из H_1 , для которых $x_i=1$, т. е.

$$F = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = 0 \\ F_1(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_N), & \text{если } x_i = 1. \end{cases} \quad (21)$$

Составим таблицу истинности и определим операцию:

$$\begin{array}{r} x_i \ 0011 \\ F_1 \ 0101 \\ \hline F \ 1101 \end{array} \quad F = F_1 \vee \neg x_i \quad (22)$$

Между ситуациями 7 и 8 существует такая же связь, как между ситуациями 5 и 6. Это позволит нам утверждать, что

$$F = F \vee \neg \neg x_i = F_1 \vee x_i \quad (23)$$

для ситуации 8.

Остается проанализировать последнюю, девятую ситуацию.

Разобьем все объекты множества H_1 на два подмножества H_{11} и H_{12} , таких, что: 1) $x_i=1$, для всех объектов из H_{11} ; 2) $x_i=0$, для всех объектов из H_{12} .

Множество H_2 разделим таким же образом на подмножества H_{21} и H_{22} соответственно. Сгруппируем четыре полученных подмножества попарно: H_{11} с H_{21} , а H_{12} с H_{22} . Для каждой пары подмножеств может быть сформулировано свое решающее правило, которое не зависит от x_i .

Пусть решающее правило для подмножеств H_{11} и H_{21} описывается функцией F_1 , а правило для подмножеств H_{12} и H_{22} — F_2 . Общее понятие, как правило, отличающее объекты из H_1 от объектов из H_2 , можно сформулировать следующим образом:

- 1) если $x_i=1$, руководствоваться правилом для подмножеств H_{21} и H_{11} (F_1);
- 2) если $x_i=0$, руководствоваться правилом для подмножеств H_{12} и H_{22} (F_2).

Составляем таблицу истинности:

$$\begin{array}{r} x_i \ 00001111 \\ F_1 \ 00110011 \\ F_2 \ 01010101 \\ \hline F \ 01010011 \end{array}$$

Формула, связующая x_i , F_1 , F_2 и F , может иметь вид

$$F = x_i \wedge F_1 \vee \neg x_i \wedge F_2. \quad (24)$$

Если после очередного шага процесс поэтапного определения вида логической функции не заканчивается (ситуация 3 или ситуация 4), то на следующем шаге приходится отыскивать функцию от меньшего числа переменных. Это говорит о том, что построение логической функции можно завершить за M шагов, причем $M < N$.

После сказанного выше можно в общих чертах наметить процесс формирования понятия как построения логической функции. Изобразим его блок-схемой (рис. 1). Блок 1 служит для представления объектов в виде упорядоченной последовательности двоич-

ных цифр. Блок 2 осуществляет выбор одного из признаков для данного шага в формировании логической функции. Блок 3 связывает выбранный признак с логической функцией от еще не связанных признаков. Блок 4 определяет множество объектов, для классификации которых отыскивается логическая функция (решающее правило) на очередном шаге. Блок 5 — блок условного перехода. Если в формулу, выражающую искомую функцию, входят только

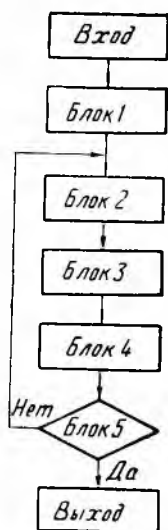


Рис. 1.

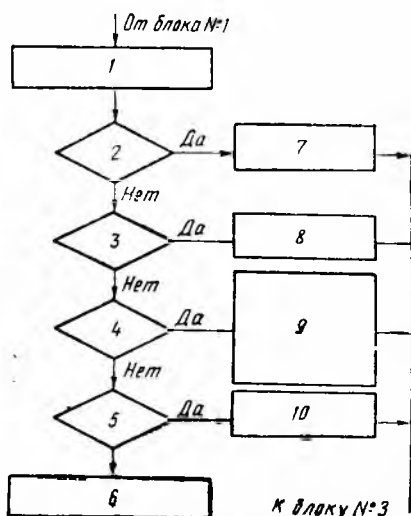


Рис. 2.

простые переменные типа x_i , то окончить работу. Если нет, перейти к блоку 2.

Неясным остается, как выбирать очередной признак. Очевидно, это можно делать различными способами. Простейшими из них являются случайный выбор признаков или выбор по порядку их следования.

Здесь предлагается один из способов выбора, который, по нашему мнению, может сократить процесс построения логической функции. Представим его в виде блок-схемы, на которой обозначено: 1 — определение ситуаций для всех признаков; 2 — имеется ситуация 3; 3 — имеется ситуация 4; 4 — имеются ситуации 5, 6, 7 или 8; 5 — имеется ситуация 9; 6 — выдача сообщения о некорректности задачи; 7 — произвольно выбрать признак в ситуации 3; 8 — произвольно выбрать признак в ситуации 4; 9 — выбрать признак, разрешение ситуации которого оставит наименьшее число объектов для последующего поиска решающего правила; 10 — произвольно выбрать признак в ситуации 9 (рис. 2).

Выбор очередного признака существенно влияет на вид логической функции и трудоемкость процесса формирования понятия

В этом смысле предложенный способ выбора, вероятно, не является оптимальным. По-видимому, можно улучшить алгоритм выбора, применив, например, некоторый критерий для определения одного из нескольких признаков, находящихся в ситуации 9. Однако вычисление значений такого критерия не должно быть слишком сложным, ибо это перечеркнет выигрыш от его использования. Авторами ведется работа по улучшению алгоритма выбора.

РДК 62.506.2

Ю. В. РОДИОНОВ

ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ СИГНАЛОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Для анализа и синтеза устройств выделения сигналов из шума, широко применяемых в нейрофизиологических исследованиях, обычно используют теорию оптимальной линейной фильтрации Колмогорова — Винера. При этом на основе известных корреляционных функций сигнала и шума синтезируется линейный фильтр, позволяющий выделять сигнал из шума с минимальной среднеквадратичной ошибкой воспроизведения его истинной формы.

В случае фильтрации повторяющихся сигналов часто известен лишь момент появления сигнала, в то время как его свойства неизвестны. Сигнал может описываться определенной функцией времени, либо быть случайным процессом. Шумы могут быть стационарными или нестационарными, коррелированными или некоррелированными с фильтруемым сигналом.

Особенно сильно влияют на искажения формы сигналов повторяющиеся помехи, синфазные с полезным сигналом, которые возникают в исследуемой системе, а так же в аппаратуре выделения. В электроэнцефалографии для выделения вызванных потенциалов мозга человека в ответ на сенсорные раздражители применяются вычислительные устройства (ВУ), реализующие метод когерентного накопления, с запоминанием накапливаемого сигнала на магнитном носителе [1, 2]. Аналитическое описание подобного рода ВУ затруднено тем, что на искажения формы преобладающее воздействие оказывает не их реальная передаточная функция, а существенная нелинейность и нестационарность, особенно в случае использования аналоговых запоминающих устройств (ЗУ) с магнитной ЧМ-записью.

При синтезе оптимальных линейных фильтров периодических сигналов хорошо себя зарекомендовал критерий минимума среднего по множеству и времени квадрата ошибки [3]. Для оценки оптимальности ВУ в целях фильтрации повторяющихся сигналов с ЗУ на магнитном носителе целесообразно применять относитель-

ный средний по множеству и времени квадрат ошибки восприятия

$$\mu_{\text{отн}} = \frac{\overline{[Y(t)/K(0) - x(t)]^2}}{\overline{x^2(t)} - \overline{[x(t)]^2}} \quad (1)$$

где $Y(t)$ — сигнал на выходе фильтра; $x(t)$ — сигнал, подлежащий выделению; $K(0)$ — коэффициент передачи фильтра на нулевой частоте; прямая черта означает усреднение по множеству, а волнистая — по времени.

Рассмотрим влияние нелинейности ЗУ в цепи обратной связи (ОС) устройств когерентного накопления на критерий оптимальности. Ограничимся для упрощения анализа усреднением по множеству отсчетов амплитуды повторяющегося сигнала в смеси с аддитивным шумом, равноотстоящих во времени от момента его появления. Тогда критерий (1) имеет следующий вид:

$$\mu_0 = \frac{[Y_N/K(0) - x^2]}{x^2} \quad (2)$$

Здесь Y_N — сигнал на выходе ВУ после N повторений его на входе. Предположим, что сигнал выделяется из нормального шума с нулевым математическим ожиданием и известной дисперсией, причем шум некоррелирован с сигналом. Влияние нелинейности на искажения сигнала, как правило, намного значительнее, чем на изменение дисперсии накапливаемого шума. В этом случае средний квадрат ошибки равен

$$\mu_0 = \mu_{01} + \mu_{\text{нл}} \quad (3)$$

где μ_{01} — относительно средний квадрат ошибки за счет остаточного шума на выходе фильтра; $\mu_{\text{нл}}$ — квадрат ошибки в результате нелинейных искажений; μ_{01} и $\mu_{\text{нл}}$ определяются согласно формуле (2).

Найдем μ_{01} при накоплении равных отсчетов сигналов в смеси с аддитивным шумом ВУ с коэффициентом передачи цепи ОС, равным m . Пусть отдельные отсчеты на входе ВУ равны

$$z_1 = x + v_1, z_2 = x + v_2, \dots, z_i = x + v_i, \dots, z_N = x + v_N, \quad (4)$$

где x — амплитуда полезного сигнала; v_i — значение шума при i -м повторении сигнала.

Тогда сигнал на выходе ВУ после N повторений

$$Y_N = z_N + m z_{N-1} + m^2 z_{N-2} + \dots + m^i z_{N-i} + m^N z_1, \quad (5)$$

откуда

$$Y_N = x \sum_{i=1}^N m^{N-i} + \xi, \quad (6)$$

где $\xi = v_N + m v_{N-1} + \dots + m^i v_{N-i} + \dots + m^N v_1$.

Множитель при x имеет смысл коэффициента передачи на нулевой частоте, т. е.

$$K(0) = \sum_{i=1}^N m^{N-i}. \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в выражение (2), получаем для μ_{01}

$$\mu_{01} = \xi^2 / x^2 \left(\sum_{i=1}^N m^{N-i} \right)^2. \quad (8)$$

При условии, что отдельные отсчеты шума некоррелированы друг с другом и имеют одинаковое распределение, можно записать

$$\xi^2 = v_N^2 + m^2 v_{N-1}^2 + \dots + m^{2i} v_{N-i}^2 + \dots + m^{2N} v_1^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \sum_{i=1}^N m^{2(N-i)}. \quad (9)$$

Здесь $\sigma_{\text{вх}}^2$ — дисперсия шума, определяемая по множеству отсчетов на входе. Тогда

$$\mu_{01} = \sigma_{\text{вх}}^2 \sum_{i=1}^N m^{2(N-i)} / x^2 \left(\sum_{i=1}^N m^{N-i} \right)^2. \quad (10)$$

Для достаточно больших N выражение (10) можно представить в виде

$$\mu_{01} = \frac{(1 - m^{2N})(1 - m)^2}{x^2(1 - m^2)(1 - m^N)^2} \sigma_{\text{вх}}^2 = \frac{(1 + m^N)(1 - m)}{x^2(1 + m)(1 - m^N)} \sigma_{\text{вх}}^2. \quad (11)$$

На рис. 1 изображены графики зависимости μ_{01} от числа повторений N сигнала при $m=1$ и $m=0,9$ ($\sigma_{\text{вх}}^2=1$; $x=1$; масштаб логарифмический). Для $m=1$ μ_{01} неограниченно убывает, причем скорость убывания обратно пропорциональна увеличению N . При $m=0,9$ с увеличением повторений сигнала μ_{01} при малых N быстро убывает, а затем ($N > 60$) практически не изменяется (при $N=60$, $\mu_{01}=0,05282$; при $N=100$, $\mu_{01}=0,5263$). Этот эффект объясняется тем, что $m^N \ll 1$ при больших N .

При изменении μ_{01} в зависимости от коэффициента m для различных N ($\sigma_{\text{вх}}^2=1$; $x=1$) минимальное значение $\mu_{01}=1/N$ в случае $m=1$ (рис. 2). С уменьшением коэффициента передачи μ_{01} резко возрастает. Для $m=0,7$ $\mu_{01}=0,1867$ при $N=10$ и $\mu_{01}=0,1768$ при $N=20$, т. е. при увеличении числа повторений сигнала в два раза μ_{01} улучшается всего на 5,3%, что свидетельствует о неэффективности большого числа повторений для $m < 1$.

Влияние нелинейности аналогичных ЗУ на критерий оптимальности выразить в аналитическом виде не представляется возможным, так как при циркуляции сигнала со сложным спектром через ЗУ его спектр изменяется в каждом цикле накопления. Однако в практических случаях достаточно аппроксимировать реальную

амплитудную характеристику аналогового ЗУ полиномами, функциональная структура которых зависит от целей анализа. Наиболее часто для математического описания малой нелинейности радиоэлектронной аппаратуры употребляются степенные полиномы. Для оценки влияния малой нелинейности предположим, что она определяется ЗУ в цепи ОС и описывается степенным поли-

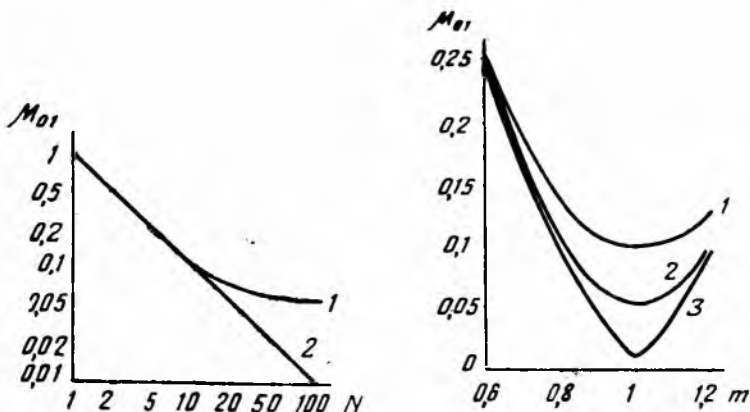


Рис. 1. Коэффициенты передачи: 1 — $m=0,9$; 2 — $m=1$.

Рис. 2. Число повторений: 1 — $N=10$; 2 — $N=20$; 3 — $N=100$.

номом $P(x) = x - kx^3$. Тогда сигнал на выходе ВУ после N повторений его на входе можно представить в виде суммы N членов ряда, в котором последующий член рекуррентно связан с предыдущим:

$$Y_N = x + mP(x) + mP[mP(x)] + mP[mP[mP(x)]] + \dots, \quad (12)$$

где $P[mP(x)] = mP(x) - k[mP(x)]^3$.

Предположим, что амплитуда $x=0,1$, а $k=0,01$. Тогда, используя (12), определим $\mu_{нл}$ по формуле (2) и найдем μ_0 по формуле (3). Полученные в результате вычислений графики зависимости μ_0 от N при $m=1$ и $m=0,9$ приведены на рис. 3 для различных отношений сигнала к шуму $\rho = x^2 / \sigma_{вх}^2$.

При малых N ($N < 6$) μ_0 с высокой точностью равно $1/N$, что объясняется резким уменьшением μ_{01} при малых N (см. рис. 1) и незначительной нелинейностью начального участка амплитудной характеристики ЗУ. По мере возрастания N сигналы накапливаются в меньшей степени, а искажения за счет нелинейности возрастают, что приводит к постепенному уменьшению, а затем и увеличению μ_0 . С уменьшением отношения сигнала к шуму ($m=1$) происходит сдвиг минимума μ_0 в сторону меньших значений N , которые являются оптимальными при данном ρ . При малых отношениях сигнала к шуму μ_0 в основном определяется нелинейностью ЗУ.

Интересен вопрос уменьшения μ_0 за счет уменьшения коэффициента передачи m . На первый взгляд кажется, что можно добиться значительного улучшения μ_0 из-за увеличения повторений сигнала с меньшим весом, чтобы не выйти за пределы динамического диапазона, в котором обеспечивается малая нелинейность. Действительно, как видно из рис. 3, при $m=0,9$ и $\rho=10$ достигается уменьшение μ_0 . В то же время при больших отношениях сигнала к шуму на входе ВУ подобный эффект отсутствует и даже при $\rho < 1$ наблюдается увеличение μ_0 по сравнению с μ_0 при $m=1$.

Таким образом, коэффициент передачи m и оптимальное число повторений сигнала N должны выбираться исходя из отношения сигнала к шуму на входе ВУ и нелинейности ЗУ. Также очевидно, что существенного улучшения критерия оптимальности невозможно, а иногда и нецелесообразно, получить путем уменьшения нелинейности при расширении динамического диапазона

ЗУ, по крайней мере в электроэнцефалографии. Синфазные с сигналом повторяющиеся помехи, особенно при использовании ЗУ на магнитном носителе с ЧМ-записью, искажают полезный сигнал аддитивной помехой с частотой колебаний скорости магнитного носителя, а также мультипликативной помехой, вносящей свой вклад в общую нелинейность. Необходима разработка и исследование более сложных структур ВУ, позволяющих достигать выделения слабого сигнала из шума с минимальными искажениями его формы.

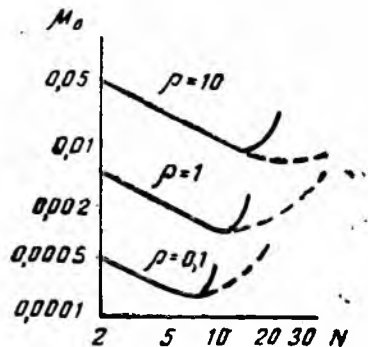


Рис. 3. Графики зависимости μ от N при: — — — $m=1$; — — — $m=0,9$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosner B. S. et al. A new instrument for the summation of evoked responses from the nervous system. — «Electroencephalogr. and Clin. Neurophysiol», 1960, v. 12, № 3, p. 745—747.
2. Pierre E., René L. Procédé pour extraire des signaux d'un bruit de fond et montage pour sa réalisation. Франц. пат., кл. Н04 В, № 15195439, 1968.
3. Перов В. П. Оптимальная фильтрация периодических процессов. — «Изв. АН СССР. Техническая кибернетика», 1973, № 3, с. 163—166.

УДК 621.396.1

С. А. УСЕНКО

АНАЛИЗ ЩЕЛЧКОВ ВКЛЮЧЕНИЯ

Передача звуковой информации с помощью технических средств играет в наш век огромную и все более возрастающую роль во всех областях социальной и общественной жизни. Круг при-

меняемых ныне технических устройств, предназначенных для приема, обработки, консервации и передачи звука, поистине необъятен. Однако каковы бы ни были эти устройства (обычный телефон или самый сложный многоканальный звукотехнический комплекс), монопольным потребителем поставляемой ими продукции является орган слуха человека. Поэтому разработка, проектирование, исследование и эксплуатация любых звуковых и радиотехнических устройств и приборов должна обеспечивать не наилучшее их функционирование вообще, а применительно к свойствам слухового аппарата человека.

Слух человека способен различать тончайшие нюансы звучаний, оценивать различия и искажения, далеко не достигающие величин, поддающихся инструментальной индикации. В этих условиях для прогнозирования ощущений, возникающих у слушателей при различных видах звуковых раздражений, обязательно нужно хорошо знать основные свойства слухового аппарата. В настоящее время известно множество методик для исследования слуха. Все они, как правило, предъявляют определенные требования к физическим параметрам стимулов.

Существуют приборы, позволяющие в широких пределах изменять длительность сигнала, уровень звукового давления, длительность паузы между звуками, если предъявляется пара сигналов. В последнее время приборы, используемые в биоакустических экспериментах, позволяют изменять еще один параметр, имеющий отношение к так называемым «щелчкам включения». Щелчок исследовал еще Штойдель в 1933 г. Он установил, что субъективная громкость щелчка зависит от формы нарастания и спадания звукового давления. В связи с этим во многих экспериментальных установках имеется возможность изменять форму переднего и заднего фронтов звуковых посылок. Предложены электронные ключи, в которых форма фронтов звуковой посылки изменяется по экспоненциальному закону. Описаны переключательные схемы, формирующие пилообразную форму фронтов. Известны эксперименты с предъявлением испытуемому звуковых сигналов, промодулированных по амплитуде кривой Гаусса. Отмечено влияние на громкость щелчков начальной фазы включения чистого синусоидально-го тона.

В настоящее время создан прибор, позволяющий включать синусоидальный сигнал с нулевой начальной фазой. Включение чистого тона с любой другой начальной фазой увеличивало громкость щелчков.

Анализируя изложенное, можно сделать следующий вывод: существует много вариантов уменьшения субъективной громкости щелчков включения, но должен быть наиболее оптимальный вариант, который позволит, очевидно, при незначительной длительности фронтов значительно уменьшить громкость щелчков. Поиск оптимального фронта имеет большое практическое значение, так как чрезмерное увеличение длительности фронтов затрудняет расчет звуковой энергии в посылке, осложняет определение длитель-

ности коротких импульсов и т. д. Наша работа посвящена поиску оптимального фронта. Сначала выясним подробно процесс возникновения щелчков.

Рассмотрим включение чистого синусоидального тона нулевой начальной фазой:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sin \Omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Текущий спектр такой синусоиды равен [1]:

$$S_t = \int_0^t e^{-j\omega t} \sin \Omega t (dt) = \frac{\Omega}{\Omega^2 - \omega^2} \left[1 - e^{-j\omega t} \left(\cos \Omega t + j \frac{\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right) \right]. \quad (2)$$

Если рассматривать значения спектральной плотности для дискретных моментов времени $t = n \frac{\pi}{\Omega}$, где n — число полупериодов синусоиды с момента включения, формула (2) значительно упрощается. В этом случае модуль спектра определяется следующим образом:

$$\Phi_t = \left| S_t \right| = \frac{2}{\Omega} \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2} \frac{\sin n \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\Omega}}{\cos n \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\Omega}} \right|. \quad (3)$$

Здесь знак \sin относится к четному n , а знак \cos — к нечетному n .

При $\omega = \Omega$, $\Phi_t \frac{1}{4} n T$, где $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ — период синусоиды.

В первые моменты времени текущий спектр такого сигнала одюроден. Затем постепенно на несущей частоте формируется максимум, который с течением времени все более и более заостряется. Очевидно, что полезная информация содержится в областях спектра, непосредственно примыкающих к максимуму. Все остальное — сопутствующие шумы, интенсивностью которых и определяется громкость щелчка включения. В течение длительности промежутка времени, начиная с момента включения чистого тона, шумы составляют весовую часть всей энергии сигнала.

Таким образом, задачу уменьшения громкости щелчков можно свести к задаче снижения энергии шумов, так как последние всегда присутствуют при включении звука. Говорить о полной ликвидации щелчков можно лишь в том случае, если имеется в виду понижение интенсивности шумов за порог слышимости.

Рассмотрим теперь выключение чистого синусоидального тона при нулевой фазе. Пусть функция имеет вид

$$f(t) = \begin{cases} \sin \Omega t & t < 0 \\ 0 & t > 0. \end{cases} \quad (4)$$

Известно, что сознание человека учитывает прошлое реального процесса с некоторым забыванием. Основное внимание концентрируется на событиях, происходящих в данный момент времени.

Учитывая это, будем пользоваться мгновенным спектром сигнала (4), который отличается тем, что в подынтегральное выражение вводится весовая функция

$$r(\tau) = e^{\alpha\tau} \sigma(x), \quad (5)$$

где

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \leq 0 \\ 0 & \text{при } x > 0 \end{cases}$$

Эта функция учитывает прошлое процесса с весом, экспоненциально убывающим по мере удаления от настоящего момента, и характеризует затухание в реальных фильтрах с постоянным временем $\frac{1}{2}$. При анализе щелчка включения следует пользоваться

мгновенным спектром сигнала (1). Но так как нас интересовало поведение спектральной функции в течение сравнительно незначительного промежутка времени, начиная с момента включения можно без особого ущерба заменить мгновенный спектр текущим. Мгновенный спектр функции (4) определяем следующим образом

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^0 e^{\alpha(\tau-t)} e^{-i\omega\tau} \sin \Omega t d\tau = e^{-\alpha t} \frac{\Omega}{\omega^2 - \Omega^2 - \alpha^2 + 2j\alpha\omega} \cdot \text{Модуль}$$

спектра данной функции равен

$$\Phi = \frac{1}{\Omega \sqrt{x^2 + A^2 + 1)^2 - 4x^2}} e^{-2\pi x \frac{t}{T}}. \quad (6)$$

$$\text{Здесь } x = \frac{\omega}{\Omega}, \quad A = \frac{\alpha}{\Omega}, \quad T = \frac{2\pi}{\Omega}.$$

Несложный анализ показывает, что функция (6) определена при всех значениях переменных, за исключением $x=1$ при $A=0$.

Как следует из (6), характер кривых, описываемых этой формулой, с течением времени не меняется. Это означает, что в данной ситуации щелчок не возникает. Действительно, аналогично включается белый шум: здесь также, начиная с момента включения, форма кривой спектральной плотности не изменяется во времени, и щелчки не обнаруживаются. Поскольку из психоакустических экспериментов достоверно известно, что выключение чистого тона сопровождается щелчком, который практически не отличается от щелчка при включении этого сигнала, напрашивается следующее предположение: в слуховой системе человека спектральный анализ осуществляется с весовой функцией $\rho(x) = \sigma(x) + \Delta t) - \sigma(x)$,

$$\text{где} \quad \sigma(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ 1 & \text{при } x > 0 \end{cases} \quad (7)$$

т. е. мгновенный спектр чистого тона определяется как спектр отрезка синусоиды длительностью Δt , непосредственно предшествующего данному моменту времени.

Тогда для функции (4) получаем

$$S_t(\omega t) = \int_{t-\Delta t}^0 \rho(\tau - t) e^{-j\omega\tau} \sin \Omega\tau d\tau \text{ или}$$

$$S_p(\omega t) = \begin{cases} \int_{t-\Delta t}^0 e^{-j\omega\tau} \sin \Omega\tau d\tau & \text{при } 0 \leq t \leq \Delta t \\ 0 & \text{при } t > \Delta t. \end{cases}$$

Для упрощения примем $\Delta t = \frac{T}{2} k$, $t = \frac{T}{2} n$. В этом случае спектральная плотность определяется формулой

$$S_p(\omega t) = \begin{cases} \frac{\Omega}{\omega^2 - \Omega^2} \left[1 - (-1)^{nk} e^{-j\frac{\pi\omega}{\Omega}(n-k)} \right] & \text{при } 0 \leq n \leq k \\ 0 & \text{при } n > k. \end{cases}$$

Модуль спектра равен

$$\Phi_p(\omega t) = \begin{cases} \left| \frac{2}{\Omega} \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2} \frac{\sin \frac{\pi\omega}{2\Omega}(n-k)}{\cos \frac{\pi\omega}{2\Omega}(n-k)} \right| \right| & \text{при } 0 \leq k \\ 0 & \text{при } n > 0. \end{cases} \quad (8)$$

Как видим, формулы (3) и (8) почти не отличаются друг от друга. Отсюда следует, что если принять весовую функцию вида (7), причина появления щелчков как при включении, так и при выключении чистого синусоидального тона одна и та же: наличие сопутствующих шумов. В связи с этим в дальнейшем будем рассматривать только щелчки включения.

Итак, мы рассмотрели причины появления щелчков при включении чистого тона. Выясним теперь влияние начальной фазы на громкость щелчков включения чистого тона:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \sin(\Omega t + \varphi) & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Для функции (9) с течением времени текущий спектр все плотнее заполняет пространство между осью частот и кривой:

$$\psi_\varphi(\omega) = \frac{2}{\Omega|A|} \sqrt{1 - A \sin^2 \varphi}, \quad (10)$$

где $A = 1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2$.

Из семейства кривых (10) наиболее отличаются спектры синусоидального ($\varphi=0$) и косинусоидального ($\varphi=90^\circ$) сигналов. В области низких частот ($\omega < \Omega$) — наоборот.

Так как полные энергии косинусоидальный и синусоидальный сигналы за одинаковое число периодов совпадают, то изменение

начальной фазы ведет к перемещению энергии из одной области частот в другую.

Слух обладает наибольшей чувствительностью в области, лежащей несколько выше средних частот ($2 \div 3$ кГц). Поэтому начальная фаза включения сигнала влияет на громкость щелчка, если значение приходится на низкие частоты. Подбором нулевой фазы можно уменьшить сопутствующие шумы в области частот соответствующей максимальной чувствительности слуха.

Если значение Ω приходится на область частот $2-3$ кГц, начальная фаза практически не влияет на громкость щелчка. И, наконец, когда несущая находится в высокочастотной области, оптимальной фазой будет значение 90° . При этом повышается уровень шумов за верхней границей звукового диапазона. Таким образом, при включении чистого тона не всегда подбор нулевой фазы ведет к ослаблению щелчка. Кроме того, этот способ не годится, если прослушивается созвучие, т. е. сигнал, который состоит из нескольких гармонических составляющих.

Гораздо лучше обстоит дело с изменением формы нарастания и спада звукового давления. Будем искать форму оптимального фронта исходя из требования минимальности энергии сопутствующих шумов.

Рассмотрим следующую задачу. Необходимо включить синусоидальный сигнал на временном интервале $0 \div 1$.

Пусть $F_t = f_t \sin(\Omega t + \varphi)$, где $f_t = 0$ при $0 \geq t \geq 1$ и $f_t > 0$ при $0 < t < 1$.

Функцию f_t надо подобрать так, чтобы шумы были минимальны. Требование минимальности энергии шумов в общем случае эквивалентно требованию минимальности ширины спектра сигнала F_t . При этом имеются две функции с одинаковой шириной спектра, предпочтение следует отдать той, которая имеет меньшую длительность Δt . Поэтому требование минимальности энергии шумов можно заменить требованием минимальности произведения $\Delta f \Delta t$ для функции F_t . В дальнейшем ограничим множество звуковых сигналов условием $\Omega \gg 2\pi$, т. е. длительность звуковой посылки значительно больше периода повторения несущего сигнала. В этом случае длительности функции F_t и f_t практически совпадают. Сигнал $F(t)$ представляет собой балансно-модулированное колебание, его спектр вдвое шире спектра функции f_t . Учитывая это, достаточно найти функцию f_t с минимально возможным произведением $\Delta f \Delta t$.

В работе [1] проанализированы спектры некоторых функций. Мы несколько расширили класс исследуемых сигналов и провели расчеты на ЭЦВМ. Первоначально для вычисления $\Delta f \Delta t$ использовались понятия эквивалентной длительности и ширины спектра. Под эквивалентной длительностью понимается промежуток времени, в котором сосредоточена часть энергии сигнала (например, $k=0,9$). Аналогично вводится понятие эквивалентной ширины спектра. Однако предварительные расчеты показали ненадежность этих определений. Оказалось, что степень предпочтения одного сигнала перед другим может зависеть от выбора коэффи-

пента k . Поэтому окончательные вычисления производились по другому, более острому критерию, предложенному в [1]. Новые определения длительности и ширины спектра основаны на применении понятия о моментах функции. Результаты расчетов сведены в таблицу. Два сигнала из пяти, приведенных в таблице, рассматриваются впервые.

В начале статьи отмечалось, что в некоторых приборах фронт звуковых посылок изменяется по экспоненциальному закону. Так как экспоненциальные сигналы бесконечны во времени, было решено синтезировать сигнал подобной формы, но конечной длительности. Такой импульс был назван квазиэкспоненциальным. Квазиколокольный импульс представляет собой один период синусоиды, смещенной относительно временной оси.

Как видно из таблицы, лучшие значения произведения $\Delta f \Delta t$ у квазиколокольного и колокольного сигналов. Теоретически возможный минимум равен 0,04594. Колокольный сигнал имеет несколько лучшее $\Delta f \Delta t$, однако, учитывая бесконечную протяженность во времени этого импульса, можно считать оптимальной формой фронта для звуковых посылок полупериод синусоидального сигнала, смещенного относительно временной оси на величину, равную максимальной амплитуде синусоиды.

В работе [2] описана структура, реализующая подобные сигналы. Психоакустические эксперименты, проведенные на испытуемых при помощи этой аппаратуры, подтвердили отсутствие щелчка при прослушивании данных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., «Наука», 1962. 234 с.
2. Еремин Г. С. Об одном способе исследования слуха. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 3—9.

УДК 62.506.2

В. В. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук

СТРУКТУРА ЭВМ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОНИКИ

В настоящее время укоренилась традиция реализации математических моделей бионики, критичных к введению масштаба по времени, на цифровых вычислительных машинах. При этом каждый постановщик указанных задач встречается с проблемами организации исследований в реальном времени и разделении времени работы ЭВМ для параллельных процессов. Эти проблемы при последовательном характере выполнения операций и малом быстройдействии ЦВМ не всегда разрешимы.

Форма импульса	$\Delta f \Delta t$
Треугольный	0,05991
Квазиэкспоненциальный	0,05347
Косинусоидальный	0,5731
Квазиколокольный	0,4828
Колокольный	0,04797

Так, в работах [1, 2] предлагаются математические модели зрительного и вибрационного анализатора. В [1] приводится модель вибрационного анализатора:

$$b(s) = 1 - \sum_{i=2}^n \frac{A_i}{A_1} \cdot \frac{f_1}{f_i}; \quad y - \left[\frac{b(s)}{f} - c \right] y = 0; \quad (1)$$

$$P_k = \frac{1}{T} \sqrt{\left(\int_{-T}^T y(t) \cos \omega kt dt \right)^2 + \left(\int_{-T}^T y(t) \sin \omega kt dt \right)^2};$$

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T K[t, f, y(s)] P_k df; \quad J_{ак} = J_2 \left(\frac{J_1}{J_2} \right)^{me^{-kt}};$$

$$J_{ас} = J_1^k \cdot J_2^{(1-k)}; \quad J_{та} = n J_1^k J_2^{(1-k)}; \quad J_{шб} = a \frac{\ln \ln J}{\ln 2},$$

где f, P, J — вибрационные стимулы; a, b, k, c, m — константы процесса; A, s, t — переменные параметры модели и структура операторов модели $F_1 \{b(s); y[t, b(s)]; P_k\} \rightarrow F_2 \{J_{ак}; J_{ас}\} \rightarrow F_3 \{J_{шб}\}$;

где F_i — операторы модели, определяемые совокупностью математических формул системы уравнений, ; — обозначает параллельность выполнения операций над переменными процесса; \rightarrow — последовательность операторов модели.

Данная модель указывает на сложность организации исследований таких моделей во времени.

Учитывая сказанное, исследовать эти модели целесообразно на многопроцессорных быстродействующих ЦВМ. Такие ЦВМ очень дорогие, но потребность в них объясняется тем, что для получения полной картины ощущения за 0,1 сек анализатор выполняет около 100 000 тыс. элементарных операций, т. е. для эффективного исследования необходимо быстродействие ЦВМ около 50—100 млн. операций в секунду. Поэтому авторы работ [1, 2] предлагают исследовать модели бионики на АВМ и ЦИМ, которые по своим параметрам удовлетворяют требованиям исследования, хотя и не лишены недостатков [3, 4]. Основным недостатком настоящих АВМ и ЦИМ является отсутствие систем программирования, что мешает широко их использовать.

В этой работе предлагается вариант построения управляющей ЭВМ с одним или несколькими аналоговыми процессорами переменной структуры. Эта система использует в качестве управляющего устройства ЦВМ с соответствующим математическим обеспечением. Естественно, что такие ЭВМ по своей дешевизне и быстродействию должны занять подобающее им место при исследовании моделей бионики. Программирование на этих ЭВМ не должно отличаться от программирования на обычных ЦВМ.

Все математические модели бионики в той или иной степени можно разделить на модели с последовательным действием операторов, параллельным (последовательные и параллельные операторы модели) и смешанным. В свою очередь, последовательные операторы модели делятся на автономные и связанные, а параллельные — на слабо связанные, односторонне связанные и сильно связанные. Связанность операторов определяется обменом информацией между операторами, наличием общих переменных и развитием относительных скоростей связанных операторов. Такое разделение операторов модели позволяет установить целесообразность использования различных видов ЭВМ при исследовании.

Естественно, что последовательные процессы операторов и некоторые виды параллельных процессов (слабо связанные и односторонне связанные) целесообразно реализовать на ЦВМ в силу однотипности развития процессов в модели и ЦВМ. Сильно связанные параллельные процессы операторов, особенно зависящие от реального времени, целесообразно моделировать на АВМ. Отсюда аналоговый процессор ЭВМ должен обладать достоинствами не только АВМ (быстродействие и параллельная структура операторов), но и ЦВМ, т. е. наличием системы программирования, операционной системы и комплекта сервисных программ.

В работах [5, 6] излагаются принципы построения системы программирования и автоматизация коммутации операторов АВМ на основе коммутационной матрицы набора операций. При этом структура процессора АВМ предположительно остается из стандартного набора операций (суммирования, интегрирования и т. д.), что усложняет коммутационную матрицу при решении типовых уравнений АВМ (дифференциальных уравнений в обыкновенных производных).

С целью упростить коммутационную матрицу и систему программирования для решения типовых уравнений можно предложить систему программ, которая призвана преобразовать уравнения модели к стандартному виду с последующей реализацией на модульной системе базовых операторов процессора. Операционная система такой ЭВМ для моделирования динамических моделей бионики, описываемых дифференциальными уравнениями в обыкновенных производных, должна включать: программу приведения уравнений к стандартному виду и расчета коэффициентов; программу набора операций, решающую вопросы коммутации операционных элементов процессора путем выбора определенного трафарета, соответствующего заданной схеме набора; систему контроля в виде имитатора задач, в обязанности которого входит имитация задач и оценка правильности соединений при помощи упрощенных расчетов; интерполяционные программы, выполняющие задачу обратного интерполирования, для тех случаев, когда необходимо точное значение аргумента (времени). Для наперед заданного значения прямая задача интерполирования решается в частном случае, когда значения определяемой функции близко к критическим значениям (ограничения) операционных элементов

процессора; экстраполяционные программы для прогнозирования результатов решения и планирования эксперимента по прогнозу; программы определения погрешности для установления точности вычислений по известным статистическим характеристикам операционных элементов.

Ввод данных может быть осуществлен стандартным транслятором из определенного алгоритмического языка. Вывод решения задачи можно получить в графическом или численном виде. Программа расчета масштабов включена в программы представления уравнений к стандартному виду.

Программа приведения к стандартному виду предполагает приведение любого линейного дифференциального уравнения в обыкновенных производных:

$$a_n P^n \cdot y + a_{n-1} P^{n-1} y + \dots + a_1 P y + a_0 y = b_m P^m x + \dots + b_1 P x + b_0 x$$

при $n > m$ и $H y \approx 0$ к виду $y = \frac{1}{p^{n-m}} (b_m x - a_n y) + \dots + \frac{1}{p^n} (b_0 x - a_0 y)$.

Данной структуре уравнения соответствует модульная постоянно скоμμутированная структура операторов — линейная часть процессора. Каждая частная структура, соответствующая определенной задаче, получается из модульной структуры путем установления значений коэффициентов. Переменные коэффициенты пересчитываются согласно соотношениям, приведенным в работе [7]. Нелинейные операторы структуры могут подсоединяться к модульной структуре путем расчета трафарета коммутации. Последняя операция выполняется программами набора операций. Введение масштаба осуществляется при расчете коэффициентов путем решения задачи линейного программирования. Весь комплекс программ операционной системы управляется организующей системой управляющей части ЭВМ.

По мнению автора, такая автоматизированная система наиболее полно отразит требования к современным ЭВМ и будет надежна в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тищенко В. В. К вопросу исследования моделей вибрационного анализатора на ЭВМ. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 3.
2. Мурашко А. Г. О технической реализации алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 2. Харьков, 1970, с. 24—41.
3. Каляев А. В. Теория цифровых интегрирующих машин и структур. М., «Сов. радио», 1970. 474 с.
4. Витенберг И. М. Программирование аналоговых вычислительных машин. М., «Машиностроение», 1972. 272 с.
5. Красногорова В. С., Мурашко А. Г., Сенченко Н. И. Способ L -кратной коммутации для аналоговых структур. — «Автоматика и телемеханика», 1974, № 7, с. 11.
6. Пухов Г. Е. Автоматизированные аналого-цифровые устройства моделирования. Киев, «Техника», 1974. 312 с.

Н. К. СВИНАРЬ

К ВОПРОСУ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ИМЕН СУЩЕСТВИТЕЛЬНЫХ

В последнее время наше представление о языке необычайно расширилось. Сейчас изучением языка занимаются не только традиционно настроенные лингвисты, но и представители других, казалось бы, совсем мало связанных между собой разделов знаний: математики и логики, кибернетики и биологии. Большой интерес к проблемам языка легко объяснить: исследование языка — это один из способов изучения мышления. Кажется разумным говорить, что в изучение процессов познания можно ввести методы, аналогичные тем, которые применяются в современных естественных дисциплинах, если объектом исследования сделать язык. Тогда при рассмотрении ряда проблем окажется возможным результаты некоторых наблюдений над языком выражать количественно.

Если принять тезис о том, что язык человека «абсолютно адекватно» — так сказать зеркально — отражает внешний мир, то отсюда непосредственно будет следовать, что если бы удалось построить универсальную грамматику, то открылась бы реальная возможность ответов на извечные онтологические вопросы — ответов, которые бы позволили полностью понять, как устроен окружающий мир. Такая «универсальная грамматика» должна охватывать как смысловую классификацию значимых слов (морфологию), так и правила корректного упорядочения слов в фразы (синтаксис).

В настоящей статье мы остановимся на первом аспекте этой проблемы — морфологической классификации, причем в качестве исходного предметного множества будем рассматривать множество имен существительных русского языка. Заметим, что основная задача классификации заключается в категоризации множества элементов путем включения их в приемлемое число подразделов таким образом, чтобы члены внутри каждой группы имели достаточное количество общих признаков, позволяющее пренебречь их индивидуальными отличиями.

Такими общими признаками для имен существительных будут грамматические категории рода, числа, падежа и одушевленности. Пользуясь понятиями, введем следующие обозначения. Категорию рода будем обозначать $p(x) = p_1(x) \vee p_2(x) \vee p_3(x)$, где $p_1(x)$, $p_2(x)$, $p_3(x)$ обозначают, соответственно, категории мужского, женского и среднего рода. Категорию числа обозначим $c(x) = c_1(x) \vee c_2(x)$, где $c_1(x)$, $c_2(x)$ обозначают категории единственного и множест-

венного числа соответственно. Категорию падежа будем обозначать $n(x) = n_1(x) \vee n_2(x) \vee n_3(x) \vee n_4(x) \vee n_5(x) \vee n_6(x)$. Здесь $n_1(x)$, $n_2(x)$, $n_3(x)$, $n_4(x)$, $n_5(x)$, $n_6(x)$ обозначают категории именительного, родительного, дательного, винительного, творительного и предложного падежей соответственно. Категорию одушевленности обозначим $o(x) = o_1(x) \vee o_2(x)$, где $o_1(x)$, $o_2(x)$ обозначают соответственно категории одушевленных и неодушевленных имен существительных.

Множество имен существительных будем обозначать S' . Предполагается, что множество S' образует расширяющуюся динами-

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Обозначение элементарного класса	Логическая формула
1	Φ_1	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_1(x)$
2	Φ_2	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_2(x)$
3	Φ_3	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_3(x)$
4	Φ_4	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_4(x) \wedge o_1(x)$
5	Φ_5	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_4(x) \wedge o_2(x)$
6	Φ_6	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_5(x)$
7	Φ_7	$p_1(x) \wedge u_1(x) \wedge n_6(x)$
8	Φ_8	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_1(x)$
9	Φ_9	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_2(x)$
10	Φ_{10}	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_3(x)$
11	Φ_{11}	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_4(x) \wedge o_1(x)$
12	Φ_{12}	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_4(x) \wedge o_2(x)$
13	Φ_{13}	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_5(x)$
14	Φ_{14}	$p_1(x) \wedge u_2(x) \wedge n_6(x)$
15	Φ_{15}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_1(x)$
16	Φ_{16}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_2(x)$
17	Φ_{17}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_3(x)$
18	Φ_{18}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_4(x)$
19	Φ_{19}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_5(x)$
20	Φ_{20}	$p_2(x) \wedge u_1(x) \wedge n_6(x)$
21	Φ_{21}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_1(x)$
22	Φ_{22}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_2(x)$
23	Φ_{23}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_3(x)$
24	Φ_{24}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_4(x)$
25	Φ_{25}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_5(x)$
26	Φ_{26}	$p_2(x) \wedge u_2(x) \wedge n_6(x)$
27	Φ_{27}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_1(x)$
28	Φ_{28}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_2(x)$
29	Φ_{29}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_3(x)$
30	Φ_{30}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_4(x)$
31	Φ_{31}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_5(x)$
32	Φ_{32}	$p_3(x) \wedge u_1(x) \wedge n_6(x)$
33	Φ_{33}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_1(x)$
34	Φ_{34}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_2(x)$
35	Φ_{35}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_3(x)$
36	Φ_{36}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_4(x)$
37	Φ_{37}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_5(x)$
38	Φ_{38}	$p_3(x) \wedge u_2(x) \wedge n_6(x)$

пескую модель, отражающую характер изменения имен существительных русского языка. Без ущерба для дальнейших рассуждений множество S' будем называть множеством псевдосуществительных (множество морфологических выражений, которые испытуемый может принять за имена существительные русского языка).

Особенности словоизменения русского языка позволяют заключить, что все перечисленные выше грамматические категории являются совместимыми. Таким образом, множество S' можно разбить на элементарные классы, логическими формулами которых будут:

$$p_l(x) \wedge r_i(x) \wedge n_k(x) \wedge o_l(x)$$

$$\left(\begin{array}{c} i=1, 2, 3; \\ j=1, 2; \\ k=1, 2, 3, 4, 5, 6; \\ l=1, 2 \end{array} \right).$$

Заметим, что общее число элементарных классов будет $n=3 \times 2 \times 6 \times 2=72$. Проведенные эксперименты с испытуемыми показали,

Таблица 2

№ п/п	Обозначение дистрибутивно- го класса	Логическая формула
1	Ψ_1	$\varphi_2(x) \vee \varphi_4(x)$
2	Ψ_2	$\varphi_1(x) \vee \varphi_5(x)$
3	Ψ_3	$\varphi_3(x) \vee \varphi_{11}(x)$
4	Ψ_4	$\varphi_8(x) \vee \varphi_{12}(x)$
5	Ψ_5	$\varphi_1(x) \vee \varphi_9(x)$
6	Ψ_6	$\varphi_1(x) \vee \varphi_9(x) \vee \varphi_{11}(x)$
7	Ψ_7	$\varphi_1(x) \vee \varphi_5(x) \vee \varphi_9(x)$
8	Ψ_8	$\varphi_2(x) \vee \varphi_8(x)$
9	Ψ_9	$\varphi_2(x) \vee \varphi_8(x) \vee \varphi_{12}(x)$
10	Ψ_{10}	$\varphi_2(x) \vee \varphi_4(x) \vee \varphi_8(x)$
11	Ψ_{11}	$\bigvee_{i=1}^{14} \varphi_i(x)$
12	Ψ_{12}	$\varphi_{15}(x) \vee \varphi_{18}(x)$
13	Ψ_{13}	$\varphi_{17}(x) \vee \varphi_{20}(x)$
14	Ψ_{14}	$\varphi_{16}(x) \vee \varphi_{21}(x)$
15	Ψ_{15}	$\varphi_{21}(x) \vee \varphi_{24}(x)$
16	Ψ_{16}	$\varphi_{16}(x) \vee \varphi_{21}(x) \vee \varphi_{24}(x)$
17	Ψ_{17}	$\bigvee_{i=15}^{26} \varphi_i(x)$
18	Ψ_{18}	$\varphi_{27}(x) \vee \varphi_{30}(x)$
19	Ψ_{19}	$\varphi_{28}(x) \vee \varphi_{33}(x)$
20	Ψ_{20}	$\varphi_{23}(x) \vee \varphi_{26}(x)$
21	Ψ_{21}	$\varphi_{23}(x) \vee \varphi_{26}(x) \vee \varphi_{33}(x)$
22	Ψ_{22}	$\bigvee_{i=27}^{38} \varphi_i(x)$

что некоторые элементарные классы пусты и фактическое число их равно 38. Логические формулы непустых элементарных классов приведены в табл. 1.

Дизъюнкция двух или более логических формул элементарных классов образует логическую формулу некоторого подмножества множества S' , определенного как дистрибутивный класс. Как отмечалось там же, наличие дистрибутивных классов отражает явление омонимии, свойственное как русскому языку в целом, так и множеству существительных в частности. Результаты исследований по определению непустых дистрибутивных классов приведены в табл. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркус С. Теоретико-множественные модели языка. М., «Наука», 1970. 332 с.
2. Клини С. Математическая логика. М., «Мир», 1973. 480 с.

УДК 62.506.2

А. И. ЧУГУН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ РУССКОГО ГЛАГОЛА

В связи с невероятно быстрым ростом объема знаний, накопленных человечеством, особенно острой стала проблема создания информационных кибернетических устройств, хранящих и разыскивающих по заказу научную информацию. Решить эту проблему возможно путем широкого использования современной цифровой техники для логической, статистической, математической и другой обработки материалов. А для этого прежде всего надо «научить» машину воспринимать информацию, записанную на естественном языке. Процесс обучения ЭВМ пониманию естественного языка возможен только на основе достаточно содержательной формализации и возможности перевода формального описания этого языка на язык математики, т. е. создания его математической модели.

В настоящей работе рассматривается построение одной математической модели языкового поведения человека: моделирование процесса морфологической классификации глаголов русского языка. Глагол образует сложную систему форм, которая на основании выполняемых ими функций и свойственных им грамматических категорий подразделяется на 4 разряда: неопределенная форма, личные формы, причастия и деепричастия. Поэтому входное множество M рассматриваемой математической модели можно представить как объединение подмножеств M_i ($i=1, 2, 3, 4$), представляющих собой названные 4 разряда глагольных форм:

$$M = \bigcup_{i=1}^n M_i.$$

Наиболее сложным для формализации в системе глагольных форм является подмножество M_2 , включающее в себя личные спрягаемые формы глагола. Его мы и будем рассматривать в качестве исходного для предлагаемой математической модели. Так как математическая модель представляет собой некоторое множество с заданной на нем совокупностью отношений $A = \langle M, \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \rangle$, где R_1, R_2, \dots, R_n — отношения на множестве M , то нам необходимо определить эти отношения для исходного множества M_2 . Традиционная грамматика ставит в соответствие каждому элементу данного множества следующие грамматические категории: залог, вид, наклонение, время, лицо, число и род¹. Из перечисленных грамматических категорий целесообразно рассматривать только те из них, которые будут влиять на формообразование элементов множества M_2 .

Вводим обозначение грамматических категорий, присущих элементам множества M . Категорию наклонения обозначим как $n(x) = n_1(x) \vee n_2(x)$, где $n_1(x), n_2(x)$ — соответственно категории изъявительного и повелительного наклонений. Категорию времени — $b(x) = b_1(x) \vee b_2(x)$, где $b_1(x), b_2(x)$ — соответственно категории не прошедшего и прошедшего времени. Категорию лица — $l(x) = l_1(x) \vee l_2(x) \vee l_3(x)$, где $l_1(x), l_2(x), l_3(x)$ — соответственно категории первого, второго и третьего лица. Категорию числа — $r(x) = r_1(x) \vee r_2(x)$, где $r_1(x), r_2(x)$ — соответственно категории единственного и множественного чисел. Категорию рода — $p(x) = p_1(x) \vee p_2(x) \vee p_3(x)$, где $p_1(x), p_2(x), p_3(x)$ — соответственно категории мужского, женского и среднего рода.

В процессе развития языка количество личных форм глагола постоянно изменяется в сторону увеличения, а это значит, что рассматриваемое множество M_2 будет представлять собой расширяющуюся динамическую модель. Поэтому множество M_2 можно представить как объединение S и S' : $M_2 = S \cup S'$. Здесь S и S' — соответственно множество всех личных форм глагола и множество псевдоглаголов $x \in M_2$. Ставя в соответствие каждому элементу множества S' присущие ему признаки (грамматические категории), можно разбить это множество на элементарные классы, логические формулы которых будут иметь вид: $H_i(x) \wedge b_j(x) \wedge l_k(x) \wedge r_l(x) \wedge p_m(x)$ ($i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1, 2, 3; l = 1, 2; m = 1, 2, 3$), откуда предполагаемое число элементарных классов $n = 2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 72$ кл.

Неформальные грамматические правила позволяют сделать вывод, что не все признаки, присущие элементам рассматриваемого подмножества S' , совместимы. Так, например, категорию рода можно поставить в соответствие только категории прошедшего времени единственного числа, а категория повелительного наклонения сочетается только со вторым лицом не прошедшего времени. Поэтому некоторые классы будут пустыми и действительное их число будет значительно меньше предполагаемого.

¹ Шведова Н. Ю. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука», 1970. 75 с.

В результате исследований были получены следующие непустые элементарные классы.

1. $\Phi_1 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_1(x) \wedge l_1(x)\}.$
2. $\Phi_2 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_1(x) \wedge l_2(x)\}.$
3. $\Phi_3 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_1(x) \wedge l_3(x)\}.$
4. $\Phi_4 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_2(x) \wedge l_1(x)\}.$
5. $\Phi_5 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_2(x) \wedge l_2(x)\}.$
6. $\Phi_6 = \{x: n_1(x) \wedge b_1(x) \wedge r_2(x) \wedge l_3(x)\}.$
7. $\Phi_7 = \{x: n_1(x) \wedge b_2(x) \wedge r_1(x) \wedge (l_1(x) \vee l_2(x) \vee l_3(x)) \wedge p_1(x)\}.$
8. $\Phi_8 = \{x: n_1(x) \wedge b_2(x) \wedge r_1(x) \wedge (l_1(x) \vee l_2(x) \vee l_3(x)) \wedge p_2(x)\}.$
9. $\Phi_9 = \{x: n_1(x) \wedge b_2(x) \wedge r_1(x) \wedge (l_1(x) \vee l_2(x) \vee l_3(x)) \wedge p_3(x)\}.$
10. $\Phi_{10} = \{x: n_1(x) \wedge b_2(x) \wedge r_2(x) \wedge (l_1(x) \vee l_2(x) \vee l_3(x))\}.$
11. $\Phi_{11} = \{x: n_2(x) \wedge b_1(x) \wedge r_1(x) \wedge l_2(x)\}.$
12. $\Phi_{12} = \{x: n_2(x) \wedge b_1(x) \wedge r_2(x) \wedge l_2(x)\}.$

Объединение этих классов определит нам все исходное множество M_2 . Пустые элементарные классы интереса для исследования не представляют и в данной работе не рассматривались.

УДК 62.506.2

Э. М. БУЗНИЦКАЯ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ РУССКОГО ЯЗЫКА

Общая цель исследования состоит в том, чтобы построить формальное описание морфологии русского языка как систему операционных формальных процедур, с помощью которых определяются искомые лингвистические сущности. Описываемая ниже модель основана на теоретико-множественных понятиях из¹. Используя такие понятия, как словарь, грамматические категории, понятие совместимости, можно прийти к выделению тех же категорий, которыми издавна оперирует традиционная лингвистика.

Введем в рассмотрение характеристическую функцию γ_1 с областью определения S' и принимающую значения $\{0, 1\}$. Множество морфологических выражений, на котором функция γ_1 обратится в «1», назовем системой имен прилагательных и обозначим через S_1 . Данную функцию можно интерпретировать как поведение испытуемого в психофизическом эксперименте, в котором на предъявление элементов из множества S' он должен выработать ответ, может ли данное выражение являться именем прилагательным русского языка. Очевидно, что при правильной настройке испыту-

¹ Александров П. С. Введение в общую теорию множеств и функций. М., Гостехиздат, 1948. 248 с.

емого мы всегда можем получить строго детерминированный ответ «да, нет».

Подходя таким образом к понятию имени прилагательного как к понятию экспериментальному, мы имеем возможность менять в зависимости от цели исследования множество S_1 , каждый раз фиксируя это множество. Из состава анализируемой совокупности исключаются заимствования, вносящие внеструктурные возмущения в исследуемый объект (слова типа «хаки»).

В соответствии с грамматикой русского языка множество имен прилагательных можно представить как объединение подмножеств, соответствующих следующим грамматическим категориям.

1. «Качественное прилагательное», ему соответствует подмножество Γ_{11} и характеристическая функция $\gamma_{11} (\Gamma_{11} \subset S_1)$.
2. «Относительное прилагательное», ему соответствует подмножество Γ_{12} и характеристическая функция $\gamma_{12} (\Gamma_{12} \subset S_1)$.
3. «Притяжательное прилагательное» — $\Gamma_{13}, \gamma_{13} (\Gamma_{13} \subset S_1)$.
4. «Полное прилагательное» — $\Gamma_{14}, \gamma_{14} (\Gamma_{14} \subset S_1)$.
5. «Краткое прилагательное» — $\Gamma_{15}, \gamma_{15} (\Gamma_{15} \subset S_1)$.
6. «Положительная степень» — $\Gamma_{16}, \gamma_{16} (\Gamma_{16} \subset \Gamma_{11} \cup \Gamma_{12} \cup \Gamma_{13})$.
7. «Сравнительная степень» — $\Gamma_{17}, \gamma_{17} (\Gamma_{17} \subset \Gamma_{11})$.
8. «Превосходная степень» — $\Gamma_{18}, \gamma_{18} (\Gamma_{18} \subset \Gamma_{11})$.
9. «Единственное число» — $\Gamma_{19}, \gamma_{19} (\Gamma_{19} \subset \Gamma_{16})$.
10. «Множественное число» — $\Gamma_{1,10}, \gamma_{1,10} (\Gamma_{1,10} \subset \Gamma_{16})$.
11. «Мужской род» — $\Gamma_{1,11}, \gamma_{1,11} (\Gamma_{1,11} \subset \Gamma_{16})$.
12. «Женский род» — $\Gamma_{1,12}, \gamma_{1,12} (\Gamma_{1,12} \subset \Gamma_{16})$.
13. «Средний род» — $\Gamma_{1,13}, \gamma_{1,13} (\Gamma_{1,13} \subset \Gamma_{16})$.
14. «Именительный падеж» — $\Gamma_{1,14}, \gamma_{1,14} (\Gamma_{1,14} \subset \Gamma_{14})$.
15. «Родительный падеж» — $\Gamma_{1,15}, \gamma_{1,15} (\Gamma_{1,15} \subset \Gamma_{14})$.
16. «Дательный падеж» — $\Gamma_{1,16}, \gamma_{1,16} (\Gamma_{1,16} \subset \Gamma_{14})$.
17. «1-й винительный падеж» — $\Gamma_{1,17}, \gamma_{1,17} (\Gamma_{1,17} \subset \Gamma_{14})$.
18. «2-й винительный падеж» — $\Gamma_{1,18}, \gamma_{1,18} (\Gamma_{1,18} \subset \Gamma_{14})$.
19. «Творительный падеж» — $\Gamma_{1,19}, \gamma_{1,19} (\Gamma_{1,19} \subset \Gamma_{14})$.
20. «Предложный падеж» — $\Gamma_{1,20}, \gamma_{1,20} (\Gamma_{1,20} \subset \Gamma_{14})$.

Пусть конъюнкция совместимых грамматических категорий $\bigwedge_k \gamma_k$ определяет на множестве $S_1 \times S_1$ отношение R , обладающее свойствами рефлексивности, симметричности, транзитивности. Тогда существует разбиение (Ψ_1, \dots, Ψ_n) множества S_1 такое, что соотношение $x_i R x_j$ выполняется только в том случае, когда x_i и x_j принадлежат общему классу разбиения $\Psi_i(x) = \Psi_j(x)$. В зависимости от наборов $\bigwedge_i \gamma_i$ можно получить 2^n классов эквивалентности, которые являются ничем иным как элементарными классами [2]. Два элемента, принадлежащие одному и тому же элементарному классу, обладают свойством взаимозаменяемости, другими словами, при замене слова в некотором контексте любым словом из того же элементарного класса контекст сохраняет грамматическую тождественность.

Явное перечисление элементарных классов позволит уточнить «определения» грамматических терминов и категорий. Используя

аппарат математической логики, традиционные грамматические категории, которые так часто определяются чисто субъективно, можно рассматривать достаточно строгим образом. Пусть дано разбиение Ψ словаря S_1 на элементарные классы $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$, тогда любая грамматическая категория может быть определена как объединение соответствующих элементарных классов: $\Gamma_i = \bigvee_k \Psi_k(x)$.

Каждый алгоритм определения элементарных классов оформляется с помощью правил проверки условий. Каждое правило осуществляет дихотомическую классификацию множества входных сигналов на два таких подмножества, из которых одно обладает проверяемым признаком, а другое нет. Правила, образующие алгоритм, задают систему характеристических функций P_1, P_2, \dots, P_m на множестве S_1 . Если ни одно из значений P_i не равно 0, то анализируемое слово является элементом класса Ψ_i , определяемого данным алгоритмом. Значения P_i , которые находятся за первым ложным P_i , не вычисляются, в этом случае $x \in S_1 \setminus \Psi_i$.

Определив состав каждого элементарного класса, можно получить распределение имен прилагательных по различным грамматическим разрядам. Предложенные математические модели могут служить основой при разработке алгоритмов автоматического анализа и синтеза имен прилагательных русского языка.

УДК 62.506.2

Е. А. СОЛОВЬЕВА

АНАЛИЗАТОР И КЛАССИФИКАТОР ЛИЧНЫХ ФОРМ ПО НАКЛОНЕНИЮ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ

Предлагаются модели процессов морфологической классификации личных глагольных форм русского языка по признаку категории склонения (с учетом и без учета омографии), а также глаголов комплексной парадигмы по признаку категории репрезентации. Исследуются модели классификации в целях их практического использования.

Отметим некоторые особенности постановки задач [1] моделирования процессов классификации с учетом и без учета омографии.

Предъявляя испытуемому пары словоформ и используя его способность работать в режиме нуль-органа, можно сформировать классы эквивалентности (формальные классы или значения) по различным морфологическим признакам. В один и тот же класс испытуемый отнесет словоформы, обладающие одинаковым набором значений (признаков значений) категории, по признаку которой происходит классификация. Реакция испытуемого на любую (даже омографичную) форму будет однозначной, так как каждой словоформе соответствует признак только одного формального класса [2]. При этом задача классификации будет корректно поставленной.

Введем функцию f_M^i (назовем ее классификатором личных форм по наклонению), описывающую процесс морфологической классификации личных форм из X (X — множество синтетических личных глагольных форм русского языка) по признаку наклонения M с учетом омографии. Множество значений функции f_M^i состоит из признаков формальных значений формальной категории наклонения [2]. Аналогично можно ввести функцию, описывающую процесс решения любой задачи морфологической классификации (с учетом омографии), например, классификации глаголов комплексной парадигмы (составляющих множество X_R) по признаку R категории репрезентации (функция f_R^i — комплексный классификатор глагольных форм). Моделирование функций, которые грамотный человек реализует при решении корректно поставленных задач классификации на морфологическом уровне с учетом омографии, безусловно важно в теоретическом, но не менее полезно и в практическом плане. Построение действующих моделей таких функций — необходимая предпосылка создания высококачественных моделей языка.

Рассмотрим функции, описывающие процессы классификации без учета омографии. Исследования процессов классификации словоформ показывают, что, используя в качестве определяемых признаков только грамматические значения (при необходимости и признаки их отсутствия), мы не получим при наличии омографии корректно поставленных задач классификации. В таких случаях не существует функций, которые мы хотим описать (например, функции определения значений наклонения у личных форм), потому что отдельным словоформам (омографичным) нельзя на морфологическом уровне поставить в соответствие однозначный ответ [2]. Функция будет получена, если из области ее определения исключить омографичные словоформы, обладающие различными признаками значений рассматриваемой категории.

Можно также поставить в соответствие омографичным формам только один из характеризующих их признаков значений (или отсутствия значений). Это значит, что реакция испытуемых на омографичных формах будет однозначной, а функции, не определенные на последних, доопределены заранее установленным образом (исходя обычно из потребностей практики). «Насильственное» доопределение функций, в область определения которых не входят омографичные словоформы, позволяет выбрать в качестве объекта исследований функции, описывающие процессы классификации без учета омографии. Так, можно ввести функцию f_M (анализатор личных форм по наклонению), реализуемую при классификации форм из X по признаку M без учета омографии, функцию f_R (комплексный анализатор глагольных форм) — при классификации элементов X_R по признаку R и т. п. Предложенные функции являются приближенными к тем, которые человек реализует, решая рассматриваемые задачи на уровне контекста, когда каждой словоформе может быть поставлен в соответствие однозначный ответ.

Действующие модели не учитывающих омографию функций представляют практический интерес, если их построение основано на результатах статистических обследований текстов, тем более, что такие функции чрезвычайно просты. Они могут иметь и некоторое теоретическое значение. Введение приближенных функций целесообразно, так как число и частота употребления омографичных глагольных форм сравнительно невелики, а частоты употребления омографичных форм, обладающих различными признаками значений рассматриваемой категории, существенно отличаются.

Перейдем к описанию функции $f_M = \langle F_M, X, Y_M \rangle$, где $Y_M = \{M_1, M_2\}$; M_1 — признак изъявительного наклонения, M_2 — повелительного. Формы сослагательного наклонения не входят в X , потому что являются аналитическими.

Грамотный человек легко установит, что f_M (читаю) = M_1 , f_M (читай) = M_2 и т. д. При попытке отыскать f_M (шли) испытуемый окажется в тупике, так как *шли* является омографичной словоформой (изъявительное наклонение от *идти* и повелительное — от *слать*) и ей на морфологическом уровне (т. е. на уровне отдельных словоформ) соответствуют оба значения наклонения. Чтобы в качестве объекта исследования получить функцию, потребуем от человека относить приведенную и все остальные личные формы к изъявительному наклонению, потому что оно встречается во много раз чаще повелительного [3, 4 и др.]. Аналогично мы поступали и при решении задач классификации по признакам категорий времени, числа, лица.

При построении F_M , который представим в виде (2) [1], мы столкнулись со многими затруднениями из-за полного и частичного совпадения форм различных наклонений. Это объясняется тем, что внешними выразителями категории наклонения служат не только формальные признаки словоформ, но и многие другие: интонации, порядок слов, синтаксические связи и т. п., которые могут быть учтены на других уровнях анализа. В результате проведенных исследований категория $S_M^0 = \{S_{M_1}^0, S_{M_2}^0\}$, которая не является разбиением [2], заменена разбиением $S_M^* = \{S_{M_1}^*, S_{M_2}^*\}$. Элементам из S_{M_1} модель поставит в соответствие признак M_1 , из S_{M_2} — M_2 . $K_M(x, y)$ удобно представить в виде

$$K_M(x, y) = [((P(x) \cap P_{M_1} \neq \emptyset) \wedge (P(x) \cap P = \emptyset) \rightarrow y = M_1) \wedge \wedge (P(x) \cap P_{M_2} = \emptyset \rightarrow y = M_2)],$$

$P_{M_1} = \{y, ю, м, шь, ите, ете, т, л, ла, ло, ли, з, с, б, п, к, р, х, г, есть, суть\}$, $P = \{ляг\}$. Знак „~“ означает возможность наличия постфикса *ся* (*сб*) [2].

Если из P_{M_1} исключить *ите*, то получим функцию f_M^n , модель которой целесообразно использовать при действии на разговорных текстах. Интересно принимать во внимание также относительную употребляемость форм изъявительного и повелительного:

наклонений различных глаголов, но в таком случае не получим простых моделей, которые полезны для практики, поэтому данный вопрос здесь не рассматривается.

Функция f_M реализована в виде алгоритма A_M , блок классификации которого приведен на рис. 1. Благодаря введению общей схемы алгоритмов классификации глагольных форм [5], для задания алгоритмов достаточно описать лишь их блоки классификации. Для задания блока классификации достаточно указать множества признаков, соответствующих элементарным распознавателям, входящим в блок [1]: $I_j (j=1, 2)$ отбрасывает j по-

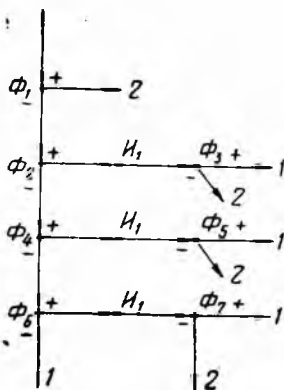


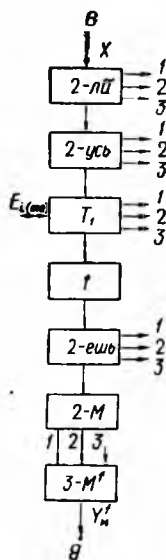
Рис. 1. Граф-схема блока классификации анализатора и классификатора (блок 2-М) по наклонению.

Рис. 2. Блок-схема классификатора по наклонению.

следних букв слова. $P_{\Phi_0} = \{\text{ся, съ}\}$, $P_{\Phi_1} = \{\text{й, ка}\}$, $P_{\Phi_2} = \{\text{и, о}\}$, $P_{\Phi_3} = \{\text{л}\}$, $P_{\Phi_4} = \{\text{ь}\}$, $P_{\Phi_5} = \{\text{ш, ест, сут}\}$, $P_{\Phi_6} = \{\text{е}\}$, $P_{\Phi_7} = \{\text{ет, ит}\}$. Алгоритм A_M^n , реализующий f_M^n , получим, если из P_{Φ_j} исключим $ит$.

Классификатор личных форм по наклонению f_M^l удобно представить в виде блок-схемы алгоритма A_M^l (рис. 2). Блок классификации 2-М описан выше (рис. 1), уточняющие блоки предложены в работе [6], а правила объединения блоков с целью построить модификацию модели — в работе [1]. Разработке алгоритма предшествовали длительные и трудоемкие исследования процессов классификации омографичных форм, результаты которых приведены в [6].

На основании этих исследований [6] получены точные модели A_T^l , A_N^l и A_L^l классификации личных форм по признакам категорий времени, числа и лица соответственно с учетом омографии. Модели A_M^l и A_T^l на уровне блок-схемы отличаются только бло-



ками классификации (естественно, необходима перенумерация выходов из блоков [6]). В алгоритм A'_N входят блоки: 2-ли, 1, H'_{em} , 2- N (классификации) и выходной. Блоки классификации алгоритмов A'_T и A'_N в составе соответствующих приближенных алгоритмов описаны в работе [7]. В модель A'_L входят уточняющие блоки 2-ли и 2-усь. Приближенные модели функций, реализуемых при классификации личных форм по признакам времени, числа и лица без учета омографии, приняты в Республиканский фонд алгоритмов и программ.

Полученные модели реализованы на ЭЦВМ «Урал-14Д» (с помощью транслятора АЛГОЛ-ЦЭМИ) и детально исследованы. Приведем некоторые результаты исследований моделей классификации по признаку M .

Алгоритм A'_M , благодаря методам построения, безошибочно функционирует на любой личной форме глаголов из «Орфографического словаря русского языка» на 104 тыс. слов (11-е издание). При действии A'_M на различных текстах ошибок также не было обнаружено. Вероятность достоверного предсказания модели A_M , определенная на данных частотного словаря [4] с точностью $\varepsilon=0,002$ и вероятностью $p(f)=0,95$, составляет $0,991 \pm 0,002$, модели A''_M — $0,994 \pm 0,002$ (при составлении словаря [4] использовались и разговорные тексты). Алгоритмы A_M и A''_M безошибочно действовали на различных выборках личных форм [1]. Несмотря на то что уровень вероятностей достоверного предсказания моделей получился высоким, он не дает нам полного представления о ценности моделей, об их функционировании на различных классах словоформ.

В целях более полной характеристики моделей их исследовали на основании разработанных критериев [2]. Эти критерии отражают специфику текста. Мы выделяли большие группы текстов: литературные и математические, газетные и технические, разговорные и неразговорные и т. п., которые отличаются многими параметрами. Можно рассматривать и более тонкие различия: жанры, стиль авторов и т. п. К сожалению, этот вопрос еще недостаточно изучен в статистической лингвистике и к настоящему времени не имеется точной статистической картины различных текстов.

В интересующем нас аспекте вопрос о частоте употребления слов и форм наиболее полно изучен в работе Э. А. Штейнфельдт [4] для литературных текстов. Математические и технические тексты менее разнообразны и менее богаты употреблением различных слов и форм. Обилие терминов в специальной литературе не повлияет значительно на действие моделей, так как новые термины образуются по правилам образования слов продуктивных групп, а исключения обычно относятся к непродуктивным. Различия в употреблении форм (особенно в неразговорных текстах) для различных групп текстов часто сохраняют некоторую общую

тенденцию. Введенные критерии [2] мы будем определять для наиболее сложного случая — литературных текстов.

При вычислении элементов вероятностных матриц [2] могут возникнуть затруднения, если при классификации словоформ из некоторого класса входных сигналов модели ошибаются очень редко, а частоты употребления таких словоформ сравнительно невелики. Предложенные модели действуют с очень высокой вероятностью достоверного предсказания, а их неточные ответы возможны лишь на незначительной части глаголов повелительного наклонения, причем последние обычно малоупотребительны. Так, в выборках $n_1=1000$ и $n_2=2200$ личных форм из газетных текстов встретилось соответственно лишь два («поезжай-ка», «убирайтесь») и три («выполняйте», «плачь», «ропщи») глагола с признаком M_2 , но они классифицируются точно даже приближенными моделями.

На этом примере видно, какое колоссальное количество словоформ и текстов необходимо рассмотреть для накопления сведений о функционировании построенных моделей классификации. Обычный путь отыскания матриц в данном случае нецелесообразен, поэтому предложим более экономный, основанный на использовании частотного словаря [4] (ЧС). Практический подсчет вероятностей, значения которых не очевидны из грамматических соображений, будем производить с помощью данных ЧС на основании методов статистических вычислений. При этом допускаем, что распределение ошибок в тексте и ЧС равновероятно.

Действие модели A_M описывают матрицы P'_M и V'_M [2]:

$$P'_M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,2 \pm 0,02 & 0,8 \pm 0,02 \end{pmatrix} \text{ и } V'_M = \begin{pmatrix} 0,95 & 0,05 \\ 1 & 0,8 \pm 0,02 \end{pmatrix}.$$

V'_M показывает, какую роль играют вероятности p_{11} и p_{22} для характеристики A_M . Глаголы изъявительного наклонения, поступающие на вход A_M с вероятностью 0,95, классифицируются безошибочно ($p_{11}=1$); неточные ответы модели могут быть лишь в глаголах повелительного наклонения, встречающихся очень редко (с вероятностью 0,05) даже в литературных текстах ($p_{22}=0,8 \pm 0,02$).

Если считать, что модель A_M , разбивающая множество X на подмножества S_{M_1} и S_{M_2} , разбивает X на три класса S'_{M_1} , S'_{M_2} и S'_{M_3} [2], где $S'_{M_3} = \emptyset$, то функционирование A_M подробно и наглядно опишут матрицы

$$P_M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,16 \pm 0,02 & 0,84 \pm 0,02 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$V_M = \begin{pmatrix} 0,935 & 0,045 & 0,02 \\ 1 & 0,84 \pm 0,02 & 0 \end{pmatrix}.$$

Процесс расформирования класса S'_M , [2] описывается

$$P_M^3 = \begin{pmatrix} p_{11}^3 & p_{12}^3 \\ p_{21}^3 & p_{22}^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$V_M^3 = \begin{pmatrix} p_1^3 & p_2^3 \\ p_{11}^3 & p_{22}^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,76 & 0,24 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Все матрицы, характеризующие A'_M и другие модели, которые учитывают омографию, совпадают с единичными.

Проведенные исследования не только позволяют оценить модели и наглядно проследить их функционирование, но и сделать важные выводы о возможности усовершенствования моделей. В алгоритм A_M , например, была введена небольшая поправка и получен алгоритм A_M^n , вероятностные характеристики которого еще лучше, чем у A_M :

$$P_M^n = \begin{pmatrix} >0,997 <0,003 & 0 \\ <0,025 >0,975 & 0 \\ 0,5 \pm 0,03 & 0,5 \pm 0,03 & 0 \end{pmatrix}.$$

В результате исследований сделаны важные выводы о практическом действии моделей, получены их сравнительные характеристики, подтверждена универсальность и высокая точность.

Для выделения личных глагольных форм из всего множества словоформ целесообразно решить задачу классификации глаголов комплексной парадигмы по признаку категории репрезентации. Эта задача является составной частью задачи классификации словоформ по признаку части речи.

Термин «категория репрезентации» введен А. И. Смирницким для английского языка, а затем применен для русского в работах [8, 9].

Рис. 3. Граф-схема блока классификации комплексного анализатора и классификатора.

Обозначим грамматическую категорию репрезентации через $S_R^0 = \{S_{R_1}^0, \dots, S_{R_k}^0\}$ где $S_{R_1}^0$ обозначает множество глаголов в инфинитиве, $S_{R_2}^0$ — в личных формах, $S_{R_3}^0$ — множество причастий, $S_{R_4}^0$ — деепричастий. При построении A_R , реализующего f_R , категорию S_R (которая не является разбиением, так как образующие ее значения, например, $S_{R_1}^0$ и $S_{R_2}^0$ пересекаются) заменим разбиением $S_R^* = \{S_{R_1}^*, \dots, S_{R_k}^*\}$.

Модель A_R можно представить в виде общей схемы [5], в которой используется блок полной нормализации [1]. Множеством входных сигналов является множество X_R , выходных — Y , где

сигнал $y_j \in Y$ ($j = \overline{1,4}$) соответствует принадлежности входного сигнала значению S_{R_j} . Блок классификации 2- R показан на рис. 3. Распознаватель Φ_0 проверяет конец слова на-ка Φ_1 — на ая. Φ_2 — на уц, юц, ац, яц, н, т, ем, им, ом, или ш (с предшествующей согласной); Φ_3 — на ее, ей, ем, ею, ие, ий, им, их, ое, ой, ом, ою, ые, ый, ым, ых или ую; Φ_4 — на его, ему, ими, ого, ому или ыми; Φ_5 — на а; Φ_6 — на л; Φ_7 — на н, т или м; Φ_8 — на о; Φ_9 — на н, ы, от, рт, ыт, нут или м; Φ_{10} — на в, я или ши (с предшествующей согласной); Φ_{11} — на ть, чь; Φ_{12} — на ти; Φ_{13} — на с, з, ь, д. В программе проверка на ш или ши (с предшествующей согласной) заменена более простой для ЭЦВМ проверкой на ш или ши (с предшествующей гласной) с соответствующей заменой номеров выходов.

Для построения модели A_R^f , реализующей функцию f_R^f (с учетом омографии), были проведены экспериментальные исследования процессов классификации глаголов из X_k по признаку R на уровне слов и псевдослов и тщательный формальный анализ таких глаголов; выявлены и разрешены все случаи омографии. Категория S_R^0 заменена формальной категорией $S_R^f = \{S_{R_1}^f, \dots, S_{R_6}^f\}$, где $S_{R_1}^f = S_{R_1}^0 \setminus S_{R_2}^0$, $S_{R_2}^f = S_{R_2}^0 \setminus (S_{R_1}^0 \cup S_{R_3}^0)$, $S_{R_3}^f = S_{R_3}^0 \setminus S_{R_2}^0$, $S_{R_4}^f = S_{R_4}^0$, $S_{R_5}^f = S_{R_1}^0 \cap S_{R_2}^0$, $S_{R_6}^f = S_{R_2}^0 \cap S_{R_3}^0$. Класс $S_{R_5}^f$ содержит омографичные глагольные формы, оканчивающиеся на *ть* и *ти*; $S_{R_6}^f$ — на *ем*, *им* и *т*.

Приведем алгоритмическую модель A_R^f , разработанную с помощью статистического метода словарей [6] на основании данных ЧС. Выходной сигнал y_j ($j = \overline{1,6}$) модели A_R^f соответствует принадлежности входного слова к формальному классу $S_{R_j}^f$. A_R^f можно получить, добавив перед моделью A_R уточняющий блок. Структура последнего очень проста: он состоит из распознавателей $\Phi_1^c \div \Phi_6^c$ [6], соединенных последовательно, причем отрицательный выход Φ_1^c соединен с выходом Φ_2^c и т. п., отрицательный выход последнего распознавателя Φ_6^c подсоединяется к алгоритму A_R . Положительные выходы распознавателей отмечены цифрами 5, 2, 3, 4 и 6 соответственно. $P_{\Phi_1^c} = \{\text{есть}\}$, $P_{\Phi_2^c} = \{\text{плачь, пусть, выпусти, ответь, спрячь}\}$, $P_{\Phi_3^c} = \{\text{занят, принят, взят, одет, разбит, поднят}\}$, $P_{\Phi_4^c} = \{\text{поднимая}\}$, $P_{\Phi_5^c} = \{\text{любим}\}$.

Алгоритм A_R^f безошибочно функционирует на любой из синтетических форм глаголов, входящих в словарь [4]. Вероятностные оценки модели A_R также достаточно высоки. Например, на выборке $n_R = 600$ глагольных форм из литературного текста алгоритм не сделал ни одной ошибки.

Комплексные анализатор и классификатор глагольных форм реализованы на ЭЦВМ, A_R принят в Республиканский фонд алгоритмов и программ [10]. Предложенные модели вошли в комплекс

алгоритмов и программ для подсистемы морфологического анализа автоматизированной системы лингвистической обработки документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьева Е. А. Моделирование процессов морфологической классификации с учетом омографии. — См. статью в настоящем сборнике.
2. Соловьева Е. А. К вопросу о построении общего алгоритма классификации глагольных форм русского языка. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 15. Харьков, 1975, с. 143—149.
3. Йоссельсон Г. Г. Подсчет слов и частотный анализ грамматических категорий русского литературного языка. — В кн.: Автоматизация в лингвистике. — М.-Л., «Наука», 1966, с. 105—131.
4. Штейнфельдт Э. А. Частотный словарь современного русского литературного языка. Таллин, 1973. 316 с.
5. Соловьева Е. А. Автоматический морфологический анализ суженной парадигмы глагола. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 12. Харьков, 1974, с. 139—142.
6. Соловьева Е. А. Исследование процессов классификации омографичных глагольных форм. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1976, с. 104—114.
7. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Соловьева Е. А. Бионические аспекты моделирования речевого поведения человека. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, 1974, с. 59—66.
8. Волоцкая З. М., Молошная Т. Н., Николаева Т. М. Опыт описания русского языка в его письменной форме. М., «Наука», 1964. 186 с.
9. Пиотровская А. А. Машинная морфология русского глагола. — В кн. Статистика речи и автоматический анализ текста. Л., «Наука», 1973, с. 260—277.
10. Мурашко А. Г., Соловьева Е. А. Алгоритм автоматического определения значений категории репрезентации. — РФАП АН УССР, Справка № 71 Киев, 1974.

УДК 62.506.2

Е. А. СОЛОВЬЕВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ С УЧЕТОМ ОМОГРАФИИ

При создании модели классификации словоформ будем исходить из того, чтобы она 1) описывала некоторую функцию, т. е. одинаковым входным сигналам ставила в соответствие одинаковые выходные; 2) была адекватной изучаемому процессу, т. е. поведению грамотного человека при решении рассматриваемой задачи и 3) была действующей, т. е. воспроизводимой с помощью технических средств.

Постановку задач морфологической классификации можно сформулировать следующим образом. Если грамотному испытуемому предъявить упорядоченную пару $\langle x_i, x_j \rangle$ словоформ, где $\langle x_i, x_j \rangle \in X \times X$ (X — некоторое множество словоформ русского языка), то он сможет ответить «да» или «нет» («0» или «1») в зависимости от того, являются ли формы x_i и x_j эквивалентными по заданному признаку. При этом человек реализует некоторую функцию φ , определенную на множестве $X \times X$ и принимающую

значения «0» или «1». Необходимо построить модель функции φ , основываясь на информации в входных и выходных сигналах.

Известно [1, 2 и др.], что если функция удовлетворяет условиям

- 1) $\varphi(x_i, x_i) = 1$;
- 2) если $\varphi(x_i, x_j) = 1$, то $\varphi(x_j, x_i) = 1$;
- 3) если $\varphi(x_i, x_j) = 1$, $\varphi(x_j, x_k) = 1$, то $\varphi(x_i, x_k) = 1$,

то существует некоторое множество Y и функция $f: X \rightarrow Y$ такая, что

$$\varphi(x_i, x_j) = L(f(x_i), f(x_j)). \quad (1)$$

L является характеристической функцией диагонали квадрата $Y \times Y$, т. е.

$$L(y_i, y_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_i = y_j, \\ 0, & \text{если } y_i \neq y_j, \end{cases} \quad \text{причем } y_i = f(x_i), y_j = f(x_j).$$

Элементы множества Y при решении конкретной задачи интерпретируются как коды полученных классов эквивалентности. В один и тот же класс попадут те и только те элементы $x_i \in X$ и $x_j \in X$, для которых выполняется условие $\varphi(x_i, x_j) = 1$. Классы эквивалентности либо совпадают с грамматическими значениями рассматриваемой категории (значение понимаем в смысле множества [3]), если между ними отсутствует омография, либо определенным образом связаны с этими значениями [3]. Описание функции f является самостоятельной моделью морфологического анализа, построение которой считаем основной задачей наших исследований.

Для представления функции φ в виде (1) необходимо убедиться в выполнении свойств 1—3. Экспериментальная проверка этих свойств не представляет затруднений при изучении процессов морфологической классификации. Свойства 1—3 выполняются при правильной постановке задачи испытуемым даже при наличии омографии.

Словоформы эквивалентны по признаку некоторой категории, если каждой из них соответствует один и тот же набор признаков значений (признак формального значения) этой категории (при необходимости учитывается признак отсутствия значений) [3]. В ряде задач классификации (при наличии омографии между значениями рассматриваемой категории) классы эквивалентности, сформированные на основании ответов испытуемых, могут не совпадать с частными грамматическими значениями.

Рассмотрим задачу морфологической классификации синтетических личных форм глаголов русского языка (X — множество таких форм) по признакам собственно грамматических категорий: склонения M , времени T , числа N , лица L и рода G , т. е. по признаку $Z = \langle M, T, N, L, G \rangle$. В процессе ее решения грамотный че-

ловец реализует функцию $f_Z^f: X \rightarrow Y_Z^f$ (назовем ее общим классификатором личных форм), где $Y_Z^f = \{z_1^f, \dots, z_{17}^f\}$, причем $z_1^f = y_i (i = \overline{1,13})$ [3]: $z_4^f = \langle M_3^f, T_4^f, N_1^f, L_2^f, G_4 \rangle$, $z_{15}^f = \langle M_3^f, T_4^f, N_1^f, L_5^f, G_4 \rangle$, $z_{16}^f = \langle M_3^f, T_4^f, N_2^f, L_2^f, G_4 \rangle$, $z_{17}^f = \langle M_3^f, T_5^f, N_3^f, L_6^f, G_4 \rangle$.

$z_i (i = \overline{1,17})$ характеризует i -й класс эквивалентности в разбиении множества X по признаку Z . Такое разбиение на основании ответов испытуемых можно получить при классификации по признаку Z , а также в результате классификации по каждому из признаков в отдельности (M, T, N, L или G) и изучения логических возможностей сочетания полученных классов.

Признаки $z_{14}^f - z_{17}^f$ соответствуют глаголам, обладающим свойством омографии, z_{14}^f характеризует омографичные словоформы, оканчивающиеся на *ешь*, z_{15}^f — на *ушь*, z_{16}^f — на *ите*, z_{17}^f — на *ли*.

Для построения точной модели функции f_Z^f (с учетом омографии) можно использовать результаты проведенных исследований процессов морфологической классификации омографичных форм [4] и полученные ранее частные модели [5 и др.] Алгоритмическая модель A_Z^f функции f_Z^f приведена на рис. 1. Блоки 1, 2 — Z^f и 3 — Z^f представляют собой блоки нормализации, классификации и выходной соответственно [6], остальные блоки уточняющие и введены для разбора случаев омографии глагольных форм. Все уточняющие блоки, разработанные нами в результате исследований процессов классификации полностью и частично совпадающих форм, подробно описаны в [4].

В зависимости от конкретных условий функционирования можно менять состав, число и порядок соединения уточняющих блоков (чтобы множество выходных сигналов модели не менялось), варьируя тем самым сложность и точность алгоритма. Чтобы построить различные модификации модели A_Z^f , сформулируем правила объединения блоков в алгоритм, верные и для частных моделей классификации по признакам M, T, N и L .

1. Уточняющие блоки и блок нормализации (1, 1' или 1'') всегда располагаются перед основным блоком классификации, который всегда стоит перед выходным блоком (общая схема алгоритмов приведена в работе [6]).

2. Блоки 2-ушь и 2-ли должны находиться перед блоком нормализации, а блоки 2-ешь и $H_{ем}^f$ — после блока 1 (или 1'').

3. Блоки типа T подключаются перед блоком 1 (или 1'').

Блок 1 является блоком постфиксной нормализации (отбрасывает постфикс *ся* или *сь* при наличии его в слове), 1' — частичной при наличии в слове частицы *-ка* (отбрасывает ее), 1'' — полной (отбрасывает *-ка* и *ся* или *сь*).

2- Z^f (рис. 2) — блок классификации и алгоритма A_Z , определяющего все собственно грамматические значения личных форм

без учета омографин. Оператор $I_j (j=1,3)$ отбрасывает j последних букв слова. Любой распознаватель Φ_i из граф-схемы алгоритма 2-Z' (см. рис. 2) проверяет конец слова на совпадение с одним из буквосочетаний (букв), входящих в упорядоченное множество Φ_i формальных (внешних) грамматических признаков словоформ.

В результате проведенных исследований получено, что $P_{\Phi_1} = \{y, ю, дам\}$, $P_{\Phi_2} = \{т\}$, $P_{\Phi_3} = \{е, и, с\}$, $P_{\Phi_4} = \{м\}$, $P_{\Phi_5} = \{ете, те\}$, $P_{\Phi_6} = \{ли\}$, $P_{\Phi_7} = \{д, з, с, б, п, р, к, х\}$, $P_{\Phi_8} = \{ла\}$, $P_{\Phi_9} = \{ло\}$, $P_{\Phi_{10}} = \{г\}$, $P_{\Phi_{11}} = \{ляг\}$, $P_{\Phi_{12}} = \{ь\}$, $P_{\Phi_{13}} = \{е\}$, $P_{\Phi_{14}} = \{еш, иш\}$, $P_{\Phi_{15}} = \{ест\}$, $P_{\Phi_{16}} = \{сут\}$, $P_{\Phi_{17}} = \{ся, сь\}$, $P_{\Phi_0} = \{ка\}$.

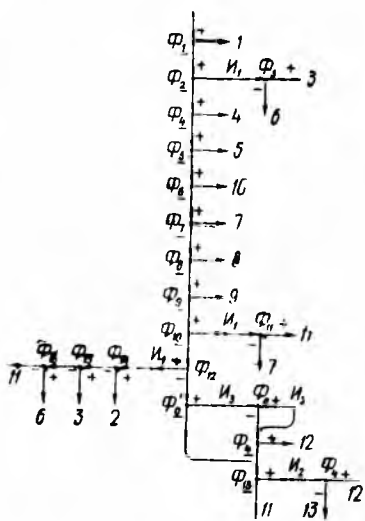
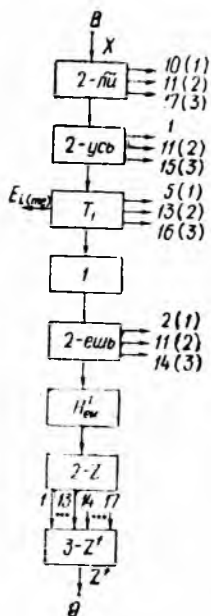


Рис. 1. Блок-схема общего классификатора личных форм (с учетом омографин).

Рис. 2. Граф-схема блока классификации общего анализатора и классификатора личных форм (блок 2-Z).

Алгоритм A_z , состоящий из последовательно соединенных блоков: постфиксной нормализации, классификации и выходного [6], описывает функцию $f_z = \langle F_z, X, Y_z \rangle$ (общий анализатор личных форм), где $Y_z = \{z_1, \dots, z_{13}\}$, $z_i = y_i$ [3] (индекс i отбрасывается). f_z является приближенной к функции, которую человек реализует на уровне контекста, при этом омографичным словоформам ставится в соответствие однозначный ответ. Действующая модель такой функции, как показано далее, может представить интерес наряду с моделью A_z^1 . Приведем здесь также теоретико-множественное описание функции f_z [3].

Задавать график $F \subset X \times Y$ функции f , реализуемой человеком при обработке словоформ (X — множество словоформ, Y — признаков), простым перечислением элементов этого множества нецелесообразно и невозможно, поэтому зададим его описанием [7]

$$F = \mathcal{E} \{ \langle x, y \rangle \mid K(x, y) \}, \quad (2)$$

$K(x, y)$ — двухместная высказывательная форма, при подстановке в которую пары $\langle x, y \rangle \in F$ получим истинное высказывание. Записывая $K(x, y)$, используем некоторые понятия теории множеств, математической логики и основываемся на анализе правил грамматики и процессов обработки словесной информации.

Известно, что «грамматическое значение имеет в языке обязательное специализированное воплощение — форму слова», причем в качестве формального показателя значения выступают флексии, суффиксы и постфиксы [8, с. 303]. Человек при определении многих признаков также основывается на формальной структуре слова. Поэтому задание $K(x, y)$ базируется на том, что каждому внутреннему (морфологическому) признаку можно поставить в соответствие некоторую совокупность внешних (формальных) признаков. $K(x, y)$ фактически представляет собой систему формальных правил отыскания морфологических признаков слова на основании внешних.

Для определения собственно грамматических значений главной формы обычно достаточно исследовать одну или несколько ее последних букв, на чем и основано предложенное нами в [3] описание $K(x, y)$. При необходимости можно пользоваться и другими множествами букв, например, множеством $P_{l \div k}$ из $(l - k + 1)$ букв слова, начиная с l -й и кончая k -й ($l \geq k$), и т. д.

Рассмотренное теоретико-множественное описание функций реализуемых при классификации словесной информации (или другом виде обработки такой информации), не является единственно возможным. Способ задания функции зависит от ее вида, конкретных целей исследования и т. п. $K(x, y)$ удобно задавать в виде формул исчисления предикатов; вместо множеств, в записи $K(x, y)$ можно использовать их характеристические функции и т. п. Предложенное теоретико-множественное описание [3] является, на наш взгляд, несколько более компактным и наглядным. Теоретико-множественное описание категорий [3] также полезно и целесообразно; оно, в частности, облегчает построение формальных категорий

График F_Z представим в виде (2) (или в виде (3) [3]), где $K_Z(x, y) = \{ \bigwedge_{j=1,6}^{j-1,6} (P(x) \cap P_j \neq \emptyset) \Rightarrow y = z_j \} \wedge \{ (P(x) \cap P_7 \neq \emptyset) \wedge$

$$\bigwedge (P(x) \cap P_{11} = \emptyset) \Rightarrow y = z_7 \} \wedge \{ (P(x) \cap \bigcup_{j=1,13}^{j-1,13} P_j = \emptyset) \Rightarrow y = z_{11} \}. P_i =$$

$$= P_{\Phi_i} (i = 1, 5, 7, 8, 9, 11; \text{последняя буква каждого признака } P_i \text{ отмечена знаком } \sim, \text{ обозначающим возможность наличия постфикса } \text{ся} \text{ или } \text{сь} [3]), P_2 = \{\text{ешь, ишь}\}, P_3 = \{\text{ет, ит, ст. есть}\}$$

$P_4 = \{\text{ем, им}\}$, $P_6 = \{\text{ат, ят, ут, ют, суть}\}$, $P_{10} = \{\text{ли}\}$, $P_{12} = \{\text{мте, м-ка, мте-ка}\}$, $P_{13} = \{\text{ите, ьте, йте, ите-ка, ьте-ка, йте-ка}\}$.

Алгоритмы A_Z и A'_Z доведены до уровня действующих (реализованы на ЭЦВМ «Урал-14Д» с помощью транслятора АЛГОЛ-ЦЭМИ). A_Z принят в Республиканский фонд алгоритмов и программ [9]. Модель A'_Z , в силу метода своего построения, безошибочно функционирует на любой синтетической личной форме глаголов из словаря [10] на 104 тыс. слов. При практическом функционировании A'_Z ошибок также не было обнаружено. Вероятность p_{AZ} достоверного предсказания алгоритма A_Z , определенная (с вероятностью $p(t)=0,95$ и точностью $\varepsilon=0,002$) на данных частотного словаря [11], составляет $0,991 \pm 0,002$. Если гла-

голы на *ите* относить к повелительному наклонению, что целесообразно делать при действии модели на текстах разговорного стиля, то для полученного анализатора $A'_Z - P_{A'_Z}^n = 0,994 \pm 0,002$.

При функционировании A_Z на выборках (сформированных с помощью таблиц случайных чисел) $n_1=2200$ словоформ из газетных текстов, $n_2=2200$ — из литературных, $n_3=1000$ — из математических и $n_4=1000$ — из технических не было обнаружено ни одной ошибки. Результаты подсчета вероятностных характеристик моделей (разработанных в статье [3]) также свидетельствуют о высоком качестве последних.

Описанные общие анализатор и классификатор гораздо проще, чем модели, полученные в результате простого объединения частных алгоритмов классификации по признакам M, T, N, L и G . Такое представление A_Z и A'_Z оказалось возможным благодаря тому, что в личных формах русского глагола грамматические значения некоторых категорий выражаются одинаковыми формальными признаками (флексиями, суффиксами и т. п.). Использованный принцип упрощения общих моделей, основанный на анализе грамматических фактов, назовем грамматическим.

Можно предложить и другие принципы упрощения, пригодные не только для моделей классификации глагольных форм, например, принцип учета иерархических отношений между категориями.

Среди категорий можно обнаружить определенную иерархию. Для анализа отношений между категориями в заданном классе словоформ введем некоторые определения. Будем говорить, что категория S^0 (обозначения соответствуют обозначениям в работе [3]) сильнее категории S_c^0 и обозначать $S^0 > S_c^0$, если $S' \supset S_c'$. В случае $(S' \supseteq S_c') \wedge (S_c' \supseteq S') \wedge (S' \cap S_c' \neq \emptyset)$ назовем категории S^0 и S_c^0 нейтральными, в случае $S' \cap S_c' = \emptyset$ — независимыми, если же $S' = S_c'$ — равносильными. Будем называть категорию S_c^0 подчиненной категории $S^0 = \{S_1^0, \dots, S_k^0\}$ и обозначать $S^0 \gg S_c^0$ при выполнении одного из условий $S_i^0 \supseteq S_c^0$ ($i = \overline{1, k}$). Если выполнено $S^0 \gg S_c^0$, то обязательно выполнено и $S^0 > S_c^0$ ($S^0 \gg S_c^0 \Rightarrow S_i^0 \supseteq$

$\supseteq S_c^0 \Rightarrow S' \supseteq S_c' S^* > \Rightarrow S_c^0$), обратное утверждение верно не всегда). Будем говорить, что категории $S_{c1}^0, S_{c2}^0, \dots, S_{cm}^0$ находятся на 1-й 2-й ..., m -й ступени иерархии подчинения, если $S_{c1}^0 \gg S_{c2}^0 \gg \dots \gg S_{cm}^0$.

Анализируя категории наклоения, времени, числа, лица и рода глагола [3], соответственно получим, что для множества X личных форм $S_M^0 > S_T^0, S_M^0 > S_L^0, S_M^0 > S_G^0, S_T^0 > S_G^0, S_N^0 > S_T^0, S_N^0 > S_L^0, S_N^0 > S_G^0, S_T^0$ и S_L^0 нейтральны, S_M^0 и S_G^0 независимы, S_M^0 равносильна S_N^0 . Нетрудно убедиться в том, что $S_M^0 \gg S_T^0 \gg S_G^0$. Наличие между категориями отношений подчинения позволяет пользоваться при моделировании правилами I или II.

I. В первую очередь определяются значения категорий, находящиеся на высшей ступени иерархии подчинения.

II. Значения категорий определяются в порядке расположения их на ступенях иерархии подчинения. В случае, если какая-либо из рассматриваемых категорий S не связана ни с какой другой отношениями подчинения, то значения S определяются после значений категории, которая сильнее S . Если же категории нейтральны, независимы или равносильны, их значения определяют в произвольном порядке.

При использовании правил I и II внутри алгоритма как бы происходит переход от автоматического режима функционирования к полуавтоматическому (использующему дополнительные признаки), а это значительно облегчает процесс классификации. В результате использования этих правил были построены модификации общих моделей.

Разработаны и другие варианты алгоритмов A_Z и A_Z^f на основании принципа учета информативности грамматических категорий, которую можно оценить в результате логико-грамматического анализа. Рассмотрим кратко некоторые вопросы такого анализа.

Построенные модели основаны на способности человека опираться в процессе морфологической классификации на внешние признаки словоформ. Человек может также использовать при классификации внутренние признаки, упрощающие классификацию. Более того, психологические эксперименты и анализ данных грамматики показали, что грамотный человек без труда определяет некоторые внутренние признаки с помощью других, не обращаясь к словоформе. Например, если известно значение* рода (G_1, G_2 или G_3), то испытуемый легко отыщет значения всех ос-

* При анализе внутренних признаков нам удобнее пользоваться грамматическими категориями и значениями не в теоретико-множественном представлении, а в смысле признаков. Для конкретности описания будем производить логико-грамматический анализ на примере словоизменительных категорий и значений глагола (для личных глагольных форм). Если множество признаков категорий обозначить через CS , а множество признаков значений через C , то для выбранных категорий и значений получим, что $C^S = \{M, T, N, L, G\}$, $C = \{M_1, M_2, T_1, T_2, T_3, N_1, N_2, L_1, L_2, L_3, L_4, G_1, G_2, G_3, G_4\}$.

тальных словоизменительных категорий, не зная глагольной формы, и т. д. Это свидетельствует о тесной взаимозависимости внутренних признаков и о различных уровнях их информативности.

Если при решении задач по обработке словесной информации необходимо обращение к словоформе, назовем такие задачи грамматическими, если нет — логико-грамматическими. Целью последних является исследование взаимосвязей и взаимозависимостей внутренних признаков. Полезно изучить сочетаемость грамматических категорий и значений (о сочетаемости грамем см. в работе [12], разрозненные сведения имеются также в грамматиках). Одним из результатов логико-грамматического анализа можно считать данные об уровне информативности рассматриваемых признаков.

Уровни информативности значения и категории будем характеризовать соответственно функциями f и φ (принимающими целочисленные значения). $f(c)$ равняется числу значений (наличий значений), найденных на основании значения c без обращения к словоформе, т. е. длине кортежа $z(c)$, составленного из этих значений; а $\varphi(c^s) = \sum_{c_i \in c^s} f(c_i)$.

Введя функции f^0 и φ^0 , характеризующие уровни информативности грамматических категорий (S^0) и их значений, получим: $f^0(G_i) = 3 (i = \overline{1,3})$, $\varphi^0(G) = 9$, $f^0(T_1) = f^0(T_2) = 1$, $\varphi^0(T) = 2$; $f^0(L_3) = 1$, $\varphi^0(L) = 1$; остальные функции равны 0.

Аналогичным образом введены функции f' и φ' , которые определены на формальных категориях глагола и их значениях. Не представляет труда определить и функции информативности от нескольких аргументов. Значения введенных функций определены для собственно грамматических категорий и значений глагола.

Информативность категорий связана с отношениями иерархичности среди них. Так, выполнение условия $\varphi(c_1^S) \leq \varphi(c_2^S)$ обязательно влечет $S_{c_1} > S_{c_2}$. Если же $\varphi(c_1^S) < \varphi(c_2^S)$, то $S_{c_1} \gg \gg S_{c_2}$. Обратные утверждения также верны.

Логико-грамматический анализ внутренних признаков может представить интерес при использовании методов дополнения, обращения и ограничения [5], при синтаксическом анализе. Сказанное выше в одинаковой мере справедливо как для слов (глаголов и других частей речи), так и для псевдослов. Идея логико-грамматического анализа можно использовать не только для русского, но и для других языков. Несмотря на свою несомненную пользу, логико-грамматический анализ не может и не должен (за исключением, быть может, редких случаев), заменять грамматический, так как это приведет к сужению круга задач и неполному их решению. Поэтому логико-грамматический анализ, который по существу является полуавтоматическим, целесообразно рассматривать наряду с автоматическим, основанным на исследовании формальной структуры слова.

Сущность принципа информативности для упрощения общих моделей сводится к тому, что значения категорий определяются

в порядке убывания информативности последних. Алгоритм, построенный на основании принципа информативности, будет существенно отличаться от алгоритма, построенного в результате применения принципа иерархичности, так как, например, наиболее информативная категория рода (значения которой, следуя принципу информативности, определяются первыми) находится в то же время на низшей ступени иерархии подчинения (и по принципу иерархичности ее значения будут определяться последними).

Принципы учета иерархичности и информативности категорий позволяют построить более простые алгоритмы, чем алгоритм, состоящий из частных моделей. Однако в данном случае эти алгоритмы сложнее моделей A_Z и A_Z^f , полученных на основании грамматического принципа.

Модели A_Z и A_Z^f являются универсальными, используют минимум (особенно A_Z) статической информации, действуют в автоматическом режиме, с высоким быстродействием и обладают хорошими вероятностными оценками качества.

С целью минимизации времени обработки словоформ мы получили (с помощью ЭЦВМ) сведения о частоте встречаемости букв и буквосочетаний в личных формах. Эти данные учтены в моделях для повышения их быстродействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Пильщиков Б. В. Математическое моделирование монокулярного зрительного восприятия. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 40—44.
2. Майстровская Л. М., Ольховский Ю. Г., Шабанов-Кушнаренок Ю. П. О некоторых бинарных отношениях. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 37—40.
3. Соловьева Е. А. К вопросу о построении общего алгоритма классификации глагольных форм русского языка. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 15, Харьков, 1975, с. 143—149.
4. Соловьева Е. А. Исследование процессов классификации омографичных глагольных форм. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16, Харьков, 1976, с. 104—114.
5. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Соловьева Е. А. Бионические аспекты моделирования речевого поведения человека. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 13, Харьков, 1974, с. 59—66.
6. Соловьева Е. А. Автоматический морфологический анализ суженной парадигмы глагола. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 12, Харьков, 1974, с. 139—142.
7. Шиханович Ю. А. Введение в современную математику. М., «Наука», 1965. 376 с.
8. Грамматика современного русского языка. Отв. ред. Шведова Н. Ю. М., «Наука», 1970. 767 с.
9. Соловьева Е. А. Алгоритм автоматического определения значений числа у глагольных форм. — РФАП АН УССР. Справка № 70, Киев, 1974.
10. Орфографический словарь русского языка. Изд. 11-е. Под ред. Бархударова С. Г. и др. М., «Сов. энциклопедия», 1971, с. 520.
11. Штейнфельдт Э. А. Частотный словарь современного русского литературного языка. Таллин, 1963. 316 с.
12. Волоцкая З. М., Молошная Т. Н., Николаева Т. М. Опыт описания русского языка в его письменной форме. М., «Наука», 1964. 186 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Сердюченко В. Я., Грабина В. А. Математическое моделирование индуктивного цветового контраста	3
Колотенко Г. А. К анализу электрической информации головного мозга. <i>Сообщение 5.</i>	9
Колотенко Г. А. Синхронные и асинхронные потенциалы головного мозга. <i>Сообщение 6.</i>	17
Марченко С. Ф. Бионические аспекты анализа элементов самоорганизующихся систем.	26
Бугай Ю. П. Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. <i>Сообщение 5.</i>	40
Вол И. А. О некоторых свойствах обобщенного ветвящегося процесса, моделирующего процесс эволюции популяции. <i>Сообщение 1.</i>	49
Вол И. А. О некоторых свойствах обобщенного ветвящегося процесса, моделирующего процесс эволюции популяции. <i>Сообщение 2.</i>	55
Потапов В. И., Братцев С. Г. О среднем времени «жизни» избыточных систем с адаптивными нейроразобными восстанавливающими органами.	61
Сердобольский В. И. О математическом моделировании семантики естественного языка.	67
Огороднейчук И. Ф., Леонов В. П., Бых А. И. Кратковременная память и временные параметры электрохемиллюминесцентного сумматора.	70
Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Усенко С. А., Приходько С. Ю. Некоторые вопросы шкалирования громкостных интервалов в слухе.	75
Пономарева И. Д. Анализ случайных функций с помощью разложения в ряд из производных.	80
Бугай Ю. П., Куманин Ю. А. Оптическая система для исследования биоолографических моделей нервных структур. <i>Сообщение 3.</i>	85
Бондарев В. М., Ловицкий В. А. Формирование понятий как процесс построения логической функции	91
Родионов Ю. В. Об оптимальной фильтрации повторяющихся сигналов сложной формы.	97
Усенко С. А. Анализ щелчков включения.	101
Тищенко В. В. Структура ЭВМ и математические модели бионики.	107
Свинарь Н. К. К вопросу морфологической классификации имен существительных.	111
Чугун А. И. Некоторые вопросы формального описания русского глагола.	114
Бузницкая Э. М. Некоторые вопросы моделирования морфологии русского языка	116
Соловьева Е. А. Анализатор и классификатор личных форм по наклонению и их исследование.	118
Соловьева Е. А. Моделирование процессов морфологической классификации с учетом омографии.	126

РЕФЕРАТЫ

УДК 62.506.2

Математическое моделирование индуктивного цветового контраста. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Сердюченко В. Я., Грабина В. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 3—8.

Рассмотрены вопросы построения математической модели явления одно-временного цветового контраста зрения человека.

Список лит.: 14 назв.

УДК 612.82.014.42.001.57

К анализу электрической информации головного мозга. Сообщение 5. Колотенко Г. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 9—17.

Анализируются биоэлектрические колебания головного мозга. Анализ ЭЭГ колебаний по длительности импульсов на некотором амплитудном уровне возможен при помощи логических элементов, реализующих, в частности, операцию «И» и «ИЛИ».

УДК 612.82.014.42.001.57

Синхронные и асинхронные потенциалы головного мозга. Сообщение 6. Колотенко Г. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 17—26.

Формулируются основные положения системы нейрокибернетического анализа пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62.506.2

Бионические аспекты анализа элементов самоорганизующихся систем. Марченко С. Ф. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 26—40.

Обсуждаются бионические аспекты проблемы адаптивных самоорганизующихся систем. В результате анализа адаптивного функционирования биологических систем предложена обобщенная структурно-функциональная схема средств самоорганизации.

Ил. 1. Список лит.: 5 назв.

УДК 62.506.2

Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение 5. Бугай Ю. П. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 40—49.

Проведен анализ некоторых особенностей восприятия действительности субъектом, отражающих его способность выделять объекты, события, процессы, свойства, отношения и другие элементы действительности. Обсуждаются возможные основания возникновения представлений субъекта о перечисленных и других элементах действительности и целесообразность имитации некоторых особенностей субъективного восприятия в искусственных системах отображения.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62.506.05

О некоторых свойствах обобщенного ветвящегося процесса, моделирующего процесс эволюции популяции. Сообщение 1. Вол И. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 49—55.

Освещены вопросы исследования жизнеспособности популяции. Процесс эволюции популяции рассматривается как обобщенный случайный ветвящийся процесс в дискретном времени с конечным числом частиц, исследование траекторий которого проводится с помощью специальных вспомогательных функций. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования процес-

са во множестве частиц определенного вида и условия существования в популяции стабильной структуры.

Список лит.: 6 назв.

УДК 62.506.2

О некоторых свойствах обобщенного ветвящегося процесса, моделирующего процесс эволюции популяции. Сообщение 2. Вол И. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 55—61.

Эта статья является продолжением статьи с таким же названием (сообщение 1) в настоящем сборнике. Поставлена задача отыскания достаточных условий, при которых часто встречающийся процесс эволюции популяции (частиц типа Γ) не покинет множество состояний. Кроме того, сформулированы и доказаны необходимые и достаточные условия существования стабильной структуры в популяции, состоящей из частиц того же типа.

Список лит.: 4 назв.

УДК 62.506.2

О среднем времени «жизни» избыточных систем с адаптивными нейроподобными восстанавливающими органами. Потапов В. И., Братцев С. Г. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 61—67.

Рассматриваются математические модели избыточных систем с двумя типами адаптивных нейроподобных восстанавливающих органов, отличающихся принципом работы и алгоритмом адаптации, для которых получены аналитические выражения среднего времени наработки между отказами при произвольном числе входов восстанавливающих входов. Проводится сравнительный анализ среднего времени «жизни» рассмотренных систем при наличии отказов и сбоях на входах восстанавливающих органов.

Ил. 2.

УДК 62.506.2

О математическом моделировании семантики естественного языка. Сердобольский В. И. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 67—70.

Обсуждаются возможности развития математических моделей семантики естественного языка на базе использования формальных вероятностных грамматик. Вводится энтропийный критерий оценки моделей и обсуждается вопрос о построении оптимальных вероятностных лингвистических моделей. Целевое поведение, связанное с генерацией фраз языка, оценивается по минимизации суммы априорной оценки фраз и логарифма вероятности их порождения.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62.506.2

Кратковременная память и временные параметры электрохемилюминесцентного сумматора. Огороднейчук И. Ф., Леонов В. П., Бых А. И. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 70—75.

Приводятся результаты исследования кратковременной памяти в электрохемилюминесцентных (ЭХЛ) композициях для нескольких люминесцирующих веществ. Рассматриваются зависимости интенсивности ЭХЛ от длительностей возбуждающих импульсов.

Табл. 1. Ил. 3. Список лит.: 3 назв.

УДК 62.506.2

Некоторые вопросы шкалирования громкостных интервалов в слухе. Шабапов-Кушнаренок Ю. П., Усенко С. А., Приходько С. Ю. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 75—80.

Формулируются условия существования психофизической шкалы громкости. Проведена экспериментальная проверка этих условий. Дано теоретическое обоснование шкалы громкости в слухе.

Табл. 2. Список лит.: 3 назв.

УДК 15.370.153

Анализ случайных функций с помощью разложений в ряд из производных. Пономарева И. Д. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 80—85.

Случайный процесс интерпретируется как выход линейной системы, на вход которой поступает случайная последовательность прямоугольных импульсов. Параметры системы зависят от значений автокорреляционной функции процесса и ее производных в заданных точках. Доказывается возможность разложения непрерывной случайной функции в ряд из ее производных. Обосновывается вы-

бор системы базисных функций, ортогонализация этой системы. Обсуждается возможность практического применения.

УДК 62.506.2

Оптическая система для исследования биологографических моделей нервных структур. Сообщение 3. Бугай Ю. П., Куманин Ю. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 85—91.

Введено понятие избыточности и информационной емкости оптической моделирующей системы в режиме записи-воспроизведения изображений при использовании некогерентного света. Проведена количественная оценка указанных параметров. Обсуждаются возможности системы, ее недостатки и пути увеличения разрешающей способности и информационной емкости путем использования многослойных масок и линз.

Ил. 2. Список лит.: 2 назв.

УДК 62.506.2

Формирование понятий как процесс построения логической функции. Бондарев В. М., Ловицкий В. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 91—97.

Описывается один из способов формирования понятий-правил, позволяющих определить принадлежность объекта к одному из двух непересекающихся классов. Доказывается возможность представления таких правил, в форме логической функции в том случае, если описания объектов содержат лишь двузначные признаки.

Ил. 2.

УДК 62.506.2.

Об оптимальной фильтрации повторяющихся сигналов сложной формы. Родионов Ю. В. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 97—101.

Освещены вопросы оптимальной по критерию минимума среднеквадратичной ошибки фильтрации повторяющихся сигналов с помощью аналоговых вычислительных устройств, реализующих метод когерентного накопления. Рассмотрено влияние нелинейности запоминающих блоков на критерий оптимальности при фильтрации сигналов из шума с известной дисперсией.

Ил. 3. Список лит.: 3 назв.

УДК 621.396.1

Анализ щелчков включения У с е н к о С. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 101—107.

Подробно рассматриваются теоретические аспекты возникновения щелчка при включении чистого синусоидального тона. Исследуется влияние начальной фазы на громкость щелчков. Экспериментально найдена форма кривой, при которой слышимость щелчка минимальна.

Табл. 1. Список лит.: 2 назв.

УДК 62.506.2

Структура ЭВМ и математические модели бионики. Тищенко В. В. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 107—111.

Предлагается принцип построения ЭВМ для реализации моделей бионики. Рассматриваются вопросы построения системы программирования и операционной системы ЭВМ с аналоговыми процессами.

Список лит.: 7 назв.

УДК 62.506.2

К вопросу морфологической классификации имен существительных. Свилярь Н. К. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 111—114.

Рассматривается задача классификации, заключающаяся в категоризации исходного множества элементов, в качестве которого взято множество псевдосуществительных (морфологических выражений), которые испытуемый может принять за имена существительные русского языка).

Табл. 2. Список лит.: 2 назв.

УДК 62.506.2

Некоторые вопросы формального описания русского глагола. Чугун А. И. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 114—116.

Описаны математические модели способности человека классифицировать личные формы глаголов и псевдоглаголов русского языка по признакам наклонения, времени, лица, числа и рода.

УДК 62.506.2

Некоторые вопросы моделирования морфологии русского языка. Бузницкая Э. М. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 116—118.

Предлагаются математические модели грамматических категорий, основанные на теоретико-множественном подходе. Исследуются вопросы формального описания имен прилагательных русского языка.

УДК 62.506.2

Анализатор и классификатор личных форм по наклонению и их исследование. Соловьева Е. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 118—126.

Созданы модели процессов классификации личных глагольных форм русского языка по признаку категории наклонения (а также времени, числа и др.) с учетом и без учета омографии. Исследован процесс морфологической классификации глаголов комплексной парадигмы по признаку категории репрезентации, предложена его модель (с учетом омографии). Введена формальная категория репрезентации и установлена ее связь с грамматической. Модели доведены до уровня действующих. На основании разработанной методики определены вероятностные оценки моделей классификации.

Ил. 3. Список лит.: 10 назв.

УДК 62.506.2

Моделирование процессов морфологической классификации с учетом омографии Соловьева Е. А. — «Проблемы бионики», 1976, вып. 17, с. 126—135.

Рассмотрена постановка задач морфологической классификации. Создана действующая модель процесса морфологической классификации глагольных форм по признакам всех собственно грамматических категорий с учетом (и без учета) омографии. Установлены иерархические отношения между категориями, введены функции информативности категорий и значений. Разработаны вопросы логико-грамматического анализа и принципы упрощения общих моделей.

Ил. 2. Список лит.: 12 назв.