

004.57
1778

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
имени М. К. Янгеля

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 30

Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник

Основан в 1968 г.

БИБЛИОТЕКА
ХИРО
№ 668424

А С

2001

ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ „ВИЩА ШКОЛА“
1983

Проблемы бионики: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 30.— Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1983.— с.

В сборнике представлены результаты исследований в области математического моделирования преобразования конечных информационных процессов и их применения в бионике.

Описаны психологические аспекты деятельности операторов сложных систем; сформулированы теоретические предпосылки преобразования произвольных предикатов; представлены формальные модели некоторых сенсорных систем. Предложены бионические устройства обработки информации: методы их синтеза и программно-аппаратурной реализации.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1983 года.

Для научных работников, аспирантов и специалистов в области кибернетики, вычислительной техники, инженерной психологии, бионики и медицины.

Редакционная коллегия: Ю. П. Шабанов-Кушнаренко (отв. ред.), М. Ф. Бондаренко (зам. отв. ред.), А. Ф. Осыка (отв. секр.), Н. М. Амосов, А. А. Волков, В. А. Грабина, А. В. Дабагян, К. А. Муромский, В. А. Ловицкий, Е. П. Пуятин, И. Б. Сироджа, В. Я. Сердюченко, В. Г. Червов

Адрес редакционной коллегии: 310218, Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники, тел. 40-93-66

Редакция естественнонаучной литературы

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Выпуск 30

Редактор А. П. Гужва, художественный редактор Воробиевко Т. П., технический редактор Л. Т. Момот, корректоры Л. А. Федоренко, Л. М. Забродина

Информ. бланк № 7610.

Сдано в набор 21.05.82. Подп. в печать 21.01.83. БЦ 09028. Формат 60x90^{1/16}. Бумага типогр. № 1. Лит. гарн. Выс. печать. 8 усл. печ. л. 8,25 усл. кр.-отт. 9,4 уч.-изд. л. Тираж 600 экз. Изд. № 1054 Зак 2-147. Цена 1 р. 30 к.

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

Харьковская книжная фабрика «Коммунист», 310012, Харьков-12, ул. Энгельса, 11

П 1502000000—012
М226(04)—83 448—83

© Издательское объединение
„Вища школа“, 1983

Ю. Э. ИЦКОВ, Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук

ОБ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЛИНЕЙНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕДИКАТА

Рассмотрим экспериментально проверяемые условия, при выполнении которых любая динамическая система может быть математически описана набором линейных функционалов. Такие динамические системы широко распространены в природе и технике. Статья продолжает исследования, начатые в работе [1].

Линейно-функциональным предикатом назовем любой предикат Φ , заданный на декартовом квадрате пространства $L_2[0, 1]$, который может быть представлен в виде

$$\Phi(x, y) = D\left(\int_0^1 x(t) a(t) dt, \int_0^1 y(t) a(t) dt\right). \quad (1)$$

Здесь D — предикат равенства; $a(t) = (a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t))$; $\{a_i\}_{i=1}^n$ — система линейно-независимых функций из $L_2[0, 1]$.

Сформулируем и докажем теорему об условиях существования линейно-функционального предиката.

Теорема 1. *Для того чтобы предикат был линейно-функциональным, необходимо и достаточно, чтобы он обладал свойствами симметричности, транзитивности, аддитивности, n -мерности и непрерывности.*

Предикат Φ мы называем *симметричным*, если из $\Phi(x, y) = 1$ следует $\Phi(y, x) = 1$, *транзитивным*, если из $\Phi(x, y) = \Phi(y, z) = 1$ следует $\Phi(x, z) = 1$, и *аддитивным*, если из $\Phi(x, y) = \Phi(u, v) = 1$ следует $\Phi(x+u, y+v) = 1$ для любых x, y, z, u, v из $L_2[0, 1]$. Предикат Φ назовем *n -мерным*, если существует система функций $\{e_k\}_{k=1}^n$ из $L_2[0, 1]$ такая, что для всякой функции x из $L_2[0, 1]$ найдется единственный набор вещественных чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, удовлетворяющий условию

$$\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right) = 1. \quad (2)$$

Если функционалы $\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x)$ непрерывны в $L_2[0, 1]$, то предикат Φ назовем *непрерывным*.

Доказательство. *Достаточность.* Вначале покажем, что предикат Φ рефлексивен, т. е. что $\Phi(x, x) = 1$ для любого x из $L_2[0, 1]$. Действительно, из n -мерности предиката Φ следует, что

для любого x найдется $y = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i$ такой, что $\Phi(x, y) = 1$

Поскольку предикат Φ симметричен, то $\Phi(y, x) = 1$. Воспользовавшись транзитивностью предиката Φ , получаем $\Phi(x, x) = 1$

Докажем далее, что функционалы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ линейны. Для этого установим их аддитивность. Пусть x и y — произвольные функции из $L_2[0, 1]$. Согласно (2) имеем

$$\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) = 1; \quad (3)$$

$$\Phi\left(y, \sum_{i=1}^n \alpha_i(y) e_i\right) = 1; \quad (4)$$

$$\Phi\left(x + y, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x + y) e_i\right) = 1. \quad (5)$$

По свойству аддитивности предиката Φ из (3) и (4) выводим

$$\Phi\left(x + y, \sum_{i=1}^n (\alpha_i(x) + \alpha_i(y)) e_i\right) = 1. \quad (6)$$

В силу n -мерности предиката Φ множители при e_i в (5) и (6) совпадают, поэтому $\alpha_i(x + y) = \alpha_i(x) + \alpha_i(y)$, ($1 \leq i \leq n$). Полученное равенство означает аддитивность функционалов α_i . Поскольку в силу непрерывности предиката Φ они еще и непрерывны, то функционалы α_i линейны.

Покажем теперь, что $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ — линейно-независимая система функционалов. Запишем уравнение $\sum_{i=1}^n \gamma_i \alpha_i(x) = 0$ (7).

Нам надо доказать, что оно выполняется лишь в случае, когда все числа γ_i равны нулю. Положим $x = \sum_{i=1}^n \gamma_i e_i$. В силу рефлексивности предиката Φ имеем $\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \gamma_i e_i\right) = 1$.

Сравнивая последнее равенство с (2), по свойству n -мерности предиката Φ получаем $\alpha_i(x) = \gamma_i$. После подстановки в (7) находим $\sum_{i=1}^n \gamma_i^2 = 0$, откуда следует $\gamma_i = 0$ для всех $i = 1, 2, \dots, n$. Это означает, что функционалы в системе $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ линейно-независимы.

Далее докажем, что равенство $\Phi(x, y) = 1$ и система равенств $\alpha_i(x) = \alpha_i(y)$, где $i = 1, 2, \dots, n$, равносильны. Пусть $\Phi(x, y) = 1$. Используя свойства симметричности и транзитивности предиката Φ и учитывая (3), (4), имеем $\Phi\left(y, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) = 1$. Сравнивая полученное равенство с (4), из n -мерности предиката Φ выводим

$a_i(x) = a_i(y)$. Обратно, если $a_i(x) = a_i(y)$, то $\sum_{i=1}^n a_i(x) e_i = \sum_{i=1}^n a_i(y) e_i$.

Отсюда, а также из (3) и (4), пользуясь симметричностью и транзитивностью предиката Φ , заключаем, что $\Phi(x, y) = 1$.

По теореме Рисса [2], об общем виде линейных функционалов в пространстве $L_2[0, 1]$ имеем $a_i(x) = \int_0^1 x(t) a_i(t) dt$ ($1 \leq i \leq n$), где $a_i(t)$ — некоторые фиксированные функции из $L_2[0, 1]$. Осталось показать, что $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — система линейно-независимых функций. Составим уравнение $\sum_{i=1}^n \gamma_i a_i(t) = 0$ (8) и докажем, что оно выполняется лишь в случае, когда все числа γ_i равны нулю. Из (8) следует, что

$$\int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i a_i(t) \right) x(t) dt = 0.$$

Вместе с тем

$$\int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i a_i(t) \right) x(t) dt = \sum_{i=1}^n \gamma_i \int_0^1 x(t) a_i(t) dt = \sum_{i=1}^n \gamma_i a_i(x).$$

Таким образом, приходим к уравнению (7), а оно, как мы уже знаем, выполняется, только когда $\gamma_i = 0$ для всех $i = 1, 2, \dots, n$. Это означает, что функции в системе $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ линейно-независимы.

Достаточность доказана.

Необходимость. Пусть выполняется равенство (1). Симметричность, транзитивность и аддитивность предиката Φ очевидны. Докажем, что предикат Φ n -мерен. С этой целью запишем систему уравнений $\sum_{i=1}^n \left(\int_0^1 a_i(t) a_k(t) dt \right) \alpha_i = \int_0^1 x(t) a_k(t) dt$ ($k = 1, 2, \dots, n$) (9) относительно неизвестных чисел α_i . Эта система уравнений ставит в соответствие каждому x из $L_2[0, 1]$ единственный набор чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$.

Для того чтобы убедиться в истинности последнего утверждения, достаточно проверить, что столбцы

$$\left\| \begin{array}{c} \int_0^1 a_i(t) a_1(t) dt \\ \int_0^1 a_i(t) a_2(t) dt \\ \dots \\ \int_0^1 a_i(t) a_n(t) dt \end{array} \right\| \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

коэффициентов при неизвестных α_i в уравнениях (9) линейно не зависят. Составим систему уравнений

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i \int_0^1 a_i(t) a_k(t) dt = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

и покажем, что она выполняется лишь при одновременном равенстве нулю всех чисел γ_i . Положим $y(t) = \sum_{k=1}^n \gamma_k a_k(t)$ и скалярно умножим левую и правую части этого равенства на $y(t)$:

$$\int_0^1 y^2(t) dt = \int_0^1 y(t) \left(\sum_{k=1}^n \gamma_k a_k(t) \right) dt.$$

Используя (11), находим, что правая часть последнего равенства равна нулю:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \gamma_k \int_0^1 y(t) a_k(t) dt &= \sum_{k=1}^n \gamma_k \int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i a_i(t) \right) a_k(t) dt = \\ &= \sum_{k=1}^n \gamma_k \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \int_0^1 a_i(t) a_k(t) dt \right) = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, $\int_0^1 y^2(t) dt = 0$, а значит, и $y(t) = 0$. Поэтому

$\sum_{i=1}^n \gamma_i a_k(t) = 0$. Поскольку функции $a_k(t)$ линейно-независимы, то все числа $\gamma_k = 0$. Следовательно, столбцы (10) коэффициентов при неизвестных α_i в уравнениях (9) линейно-независимы.

Теперь проверим, что набор чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ удовлетворяет условию n -мерности предиката Φ при условии, что в качестве системы функций $\{e_k\}_{k=1}^n$ взята система $\{a_k\}_{k=1}^n$. Согласно (9) имеем

$$\begin{aligned} \int_0^1 x(t) a_k(t) dt &= \sum_{i=1}^n \left(\int_0^1 a_i(t) a_k(t) dt \right) \alpha_i = \\ &= \int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i a_i(t) \right) a_k(t) dt, \quad (k = 1, 2, \dots, n). \end{aligned}$$

Отсюда по (1) непосредственно следует, что $\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i\right) = 1$. Никакой другой набор чисел $(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n)$ не удовлетворяет этому равенству. В самом деле, предположим, что $\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha'_i a_i\right) = 1$. Согласно (1) это означает, что

$$\int_0^1 x(t) a_k(t) dt = \int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \alpha'_i a_i(t) \right) a_k(t) dt.$$

не Иными словами,

$$\sum_{i=1}^n \left(\int_0^1 a_i(t) a_k(t) dt \right) \alpha'_i = \int_0^1 x(t) a_k(t) dt \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

Таким образом, набор чисел $(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n)$ является решением уравнения (9). А так как решение этого уравнения единственно, то $(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Этим завершается доказательство n -мерности предиката Φ .

В соответствии с (9) числа α_i представляют собой линейные комбинации чисел $\int_0^1 x(t) a_k(t) dt$ ($k = 1, 2, \dots, n$), непрерывно зависящих от x . Следовательно, функционалы $\alpha_i(x)$ непрерывны. Этим доказывается непрерывность предиката Φ .

Теорема 1 доказана.

В некотором смысле система условий теоремы 1 является эконной, о чем свидетельствует

Теорема 2. *Свойства симметричности, транзитивности, аддитивности, n -мерности и непрерывности предиката Φ независимы.*

Доказательство. Для доказательства независимости каждого свойства от остальных достаточно привести пример предиката Φ , для которого это свойство не выполняется, а остальные свойства выполняются.

1. Симметричность. Положим $\Phi(x, y) = D(Px, Py) \wedge C \|Qy\|$, где $x, y \in L_2[0, 1]$; P — ортопроектор на некоторое n -мерное подпространство L пространства $L_2[0, 1]$; Q — ортопроектор на некоторое одномерное подпространство M пространства $L_2[0, 1]$, причём $L \perp M$; $C(t)$ — предикат от вещественного аргумента t , равный 1, если t — целое число, и равный 0 — в противном случае. Выберем такое x , что $C \|Qx\| = 0$, и $y = Px$. Тогда $\Phi(x, y) = \Phi(x, Px) = D(Px, P^2x) \wedge C \|QPx\| = D(Px, Px) \wedge C(0) = 1 \wedge 0 = 0$.

Однако $\Phi(y, x) = D(Py, Px) \wedge C \|Qx\| = D(Py, Px) \wedge 0 = 0$. Это означает, что предикат Φ несимметричен.

Вместе с тем предикат Φ транзитивен. Действительно, пусть $\Phi(x, y) = \Phi(y, z) = 1$. Это значит, что $D(Px, Py) \wedge C \|Qy\| = 1$ и $D(Py, Pz) \wedge C \|Qz\| = 1$. Отсюда следует $Px = Py$, $Py = Pz$, а значит, $Px = Pz$ и $C \|Qz\| = 1$. Таким образом, $\Phi(x, z) = D(Px, Pz) \wedge C \|Qz\| = 1 \wedge 1 = 1$. Нетрудно доказать также аддитивность предиката Φ . В самом деле, пусть $\Phi(x, y) = \Phi(u, v) = 1$. Тогда $Px = Py$, $Pu = Pv$, а значит, и $Px + Pu = Py + Pv$, поэтому $P(x + u) = P(y + v)$. Кроме того, $C \|Qy\| = C \|Qv\| = 1$, следовательно, $\|Qy\|$ и $\|Qv\|$ — целые числа, а значит, и $\|Qy + Qv\|$ — целое число. Поэтому $C \|Q(y + v)\| = 1$. Таким образом, $\Phi(x + u, y + v) = D(P(x + u), P(y + v)) \wedge C \|Q(y + v)\| = 1 \wedge 1 = 1$.

Докажем n -мерность и непрерывность предиката Φ . Пусть $\{e_i\}_{i=1}^n$ — какой-нибудь ортонормированный базис в L . Тогда для

любого x из $L_2[0, 1]Px$ имеет единственное разложение: $Px = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i$, где $\alpha_i(x) = \int_0^1 x(t) e_i(t) dt$ ($i = 1, 2, \dots, n$). При этом

$$\begin{aligned} \Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right) &= D\left(Px, P\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right)\right) \wedge C\left\|Q\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right)\right\| = \\ &= D\left(P^2x, P\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right)\right) \wedge C\left\|\sum_{i=1}^n \alpha_i Qe_i\right\| = 1 \wedge C\left\|\sum_{i=1}^n \alpha_i 0\right\| = \\ &= 1 \wedge C(0) = 1 \wedge 1 = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, предикат Φ n -мерен. Непрерывность предиката Φ непосредственно вытекает из непрерывности функционалов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

2. Транзитивность. Положим $\Phi(x, y) = D(Px + Py, 0)$, где $x, y \in L_2[0, 1]$; P — ортопроектор на некоторое n -мерное подпространство L пространства $L_2[0, 1]$. Предикат Φ нетранзитивен. Действительно, $\Phi(x, -x) = \Phi(-x, x) = 1$ для любого x из $L_2[0, 1]$, однако $\Phi(x, x) = D(2Px, 0) = 0$ для тех $x \in L_2[0, 1]$, у которых $Px \neq 0$. Вместе с тем предикат Φ симметричен. Он также аддитивен. В самом деле, предположим, что $\Phi(x, y) = \Phi(u, v) = 1$. Это означает, что $Px + Py = Pu + Pv = 0$. Отсюда следует, что $P(x + u) + P(y + v) = 0$, иными словами, $\Phi(x + u, y + v) = 1$.

Докажем n -мерность и непрерывность предиката Φ . Для произвольного $x \in L_2[0, 1]$ выберем из L функцию y такую, чтобы $\Phi(x, y) = 1$. Тогда $Py = y$, а значит, $y = -Px$. Пусть $\{e_i\}_{i=1}^n$ — ортонормированный базис в L . В этом случае для любого x найдется единственный набор чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, при котором

$$\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i\right) = 1,$$

где $\alpha_i(x) = -\int_0^1 x(t) e_i(t) dt$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Итак, предикат Φ n -мерен. Непрерывность предиката Φ непосредственно вытекает из непрерывности функционалов $\alpha_i(x)$.

3. Аддитивность. Положим $\Phi(x, y) = D(\alpha(x), \alpha(y))$, где $x, y \in L_2[0, 1]$. $\alpha(x) = (\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x))$;

$$\alpha_i(x) = x_i \left(1 + \int_0^1 x(t) a(t) dt\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

x_1, x_2, \dots, x_n — координаты проекции функции x на n -мерное подпространство L в ортонормированном базисе $\{e_i\}_{i=1}^n$; a — ненулевая функция из ортогонального дополнения к подпространству L .

Предикат Φ неаддитивен. В самом деле, если бы он был аддитивен, то отсюда следовала бы аддитивность функционалов $\alpha_i(x)$, однако эти функционалы в силу своей нелинейности неаддитивны. Вместе с тем предикат Φ симметричен и транзитивен. Он также n -мерен. Действительно, пусть функция x произвольно выбрана из $L_2[0, 1]$. Положим $y = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i$. Отсюда следует, что $y_i = \alpha_i(x)$.

Так как $y \in L$ и $a \perp L$, то $\int_0^1 y(t) a(t) dt = 0$.

Таким образом, $\alpha_i(y) = y_i = \alpha_i(x)$. Следовательно, $\Phi(x, y) = 1$, г. е. $\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) = 1$. Для любого x из $L_2[0, 1]$ набор чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ существует и единственен, это непосредственно вытекает из определения функционалов $\alpha_i(x)$. Предикат Φ , кроме того, непрерывен, это непосредственно следует из непрерывности функционалов $\alpha_i(x)$.

4. n -Мерность. Положим $\Phi(x, y) = D(x, y)$, где $x, y \in L_2[0, 1]$. Предикат не n -мерен, поскольку для каждого x существует лишь единственный y , удовлетворяющий условию $\Phi(x, y) = 1$, а совокупность всех y -ков совпадает со всем пространством $L_2[0, 1]$. Вместе с тем предикат Φ симметричен, транзитивен и аддитивен. Свойство же непрерывности было определено нами только для n -мерных предикатов, поэтому вопрос о выполнимости или невыполнимости этого свойства в данном случае утрачивает смысл.

5. Непрерывность. Положим $\Phi(x, y) = D(\alpha(x), \alpha(y))$, где $x, y \in L_2[0, 1]$, $\alpha(x) = (\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x))$;

$$\alpha_i(x) = \int_0^1 P(x(t)) e_i(t) dt + \beta_i(Qx) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

P — ортопроектор на какое-нибудь n -мерное подпространство L из $L_2[0, 1]$; $\{e_i(t)\}_{i=1}^n$ — ортонормированный базис в L ; Q — ортопроектор на ортогональное дополнение L^\perp к L ; $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ — набор каких-либо аддитивных не непрерывных функционалов, заданных на L^\perp . Так как L^\perp — гильбертово пространство, то такие функционалы всегда существуют. Функционалы $\alpha_i(x)$, в силу своего определения, не непрерывны, следовательно, не непрерывен и предикат Φ .

Вместе с тем предикат Φ симметричен и транзитивен. Он также аддитивен, что непосредственно вытекает из аддитивности функционалов $\alpha_i(x)$. Докажем n -мерность предиката Φ . Пусть $x \in L_2[0, 1]$.

1). Положим $y = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i$. Тогда

$$\alpha_k(y) = \alpha_k\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) = \int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) e_k(t) dt =$$

$$= \alpha_k(x) \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

Таким образом, для любого x

$$\Phi\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i\right) = 1.$$

Набор чисел $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ единственен в силу определения функционалов $\alpha_i(x)$. Таким образом, предикат Φ n -мерен.

Теорема доказана.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Аксиоматическое построение модели цветового зрения. — Проблемы бионики, 1970, вып. 4, с. 9—12.
2. Люстерник Л. А., Соболев В. И. Элементы функционального анализа. — М.: Наука, 1965.—520 с.

Поступила в редколлегию 23.11.81

УДК 512.54.0

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, В. Л. СИГАЛОВ

ЗАДАЧА ДЕКОМПОЗИЦИИ УРАВНЕНИЯ АЛГЕБРЫ КОНЕЧНЫХ ПРЕДИКАТОВ

Алгебра конечных предикатов (а. к. п.), введенная в работах [1, 2], используется для моделирования алфавитного оператора в системах искусственного интеллекта. Декомпозицией уравнений а. к. п. называется процесс выделения часто встречающихся общих частей логического уравнения в самостоятельное уравнение и оформления в головном для этих частей уравнении ссылки на них.

Обычно при составлении уравнений, описывающих некоторый логический объект, повторяющиеся логические правила дают возможность производить эвристическую декомпозицию уравнений а. к. п. Однако иногда логика объекта может быть сильно запутана, и повторяющиеся правила трудно выявить эвристически. Данная статья посвящена формализации декомпозиции уравнений а. к. п. Декомпозиция уравнений, как оптимизационная задача, может производиться по различным критериям. Критерий минимальности числа операций уменьшает суммарную длину системы уравнений а. к. п., что используется при программировании решения уравнений. Она выделяет класс быстро решаемых задач для конкретных начальных значений. Время решения общими методами уравнений, к которым применена декомпозиция, увеличивается. Для аппаратурной реализации логических схем декомпозиция уравнений уменьшает аппаратурные затраты. Еще один важный аспект применения декомпозиции, специфический для теории искусственного интеллекта: декомпозиция по-

Назовем вершину частично сходной, если только часть дуг, исходящих из этой вершины, попарно эквивалентны между собой.

Для определения сходимости и частичной сходимости введем следующий формализм. Каждой вершине поставим в соответствие множество $M = (L_1, L_2, \dots, L_t)$ (7), где L_i — множество номеров попарно эквивалентных дуг: $L_i = (e_1, e_2, \dots, e_{g_i})$ (8). Здесь e_j — номер дуги, вступающей в i -ю эквиваленцию.

Если $M = \emptyset$ — вершина несходная, $t = 1$ и $g_1 = p$, где p — область определения переменной, — вершина сходная, в противном случае вершина частично сходная. На рис. 1 показан пример частично сходной вершины ($M = (L_1, L_2)$; $L_1 = (1, 3)$; $L_2 = (2, 4)$; $p = 6$).

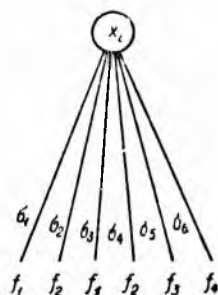


Рис. 1

где C_i — стоимость подграфа для i -й дуги; p — область определения переменной. Стоимость сходной вершины равна $C^c = C_i + 1$ (10).

Для определения стоимости частично сходной вершины определим общее число входящих в эквиваленцию дуг:

$$N = \sum_{j=1}^t g_j. \quad (11)$$

Здесь t — число членов множества M ; g_j — число членов множества L_j .

$$C^{ч.с} = \sum_{i=1}^{p-N} C_i + \sum_{j=1}^t C_j + 2(p - N) + \sum_{j=1}^t (g_j + 1), \quad (12)$$

где C_i — стоимость дуги, не входящей в эквиваленцию; C_j — стоимость дуги-представителя, входящей в L_j . Стоимость вершины, показанной на рис. 1, равна $N = 2 + 2 = 4$; $C^{ч.с} = C_{f_1} + C_{f_2} + C_{f_3} + 4 + 6$ (13).

Рядом регулярного дерева будем называть совокупность вершин, соответствующих одной переменной. Каждому ряду итеративного разложения функции по существенной переменной поставим в соответствие множество $B^k = (H_1^k, H_2^k, \dots, H_r^k)$ (14); H_i^k — множество номеров попарно эквивалентных дуг; k — номер ряда; $H_i^k(v_1, v_2, \dots, v_s)$ (15), где v_i — номер дуги, вступающей в эквиваленцию.

Ребра, функции которых тождественно равны булевой константе, назовем концевыми. Стоимость концевых ребра равна

$$C_k = \begin{cases} = 1 & \text{— если ребро } \sim 1; \\ = 0 & \text{— если ребро } \sim 0. \end{cases} \quad (16)$$

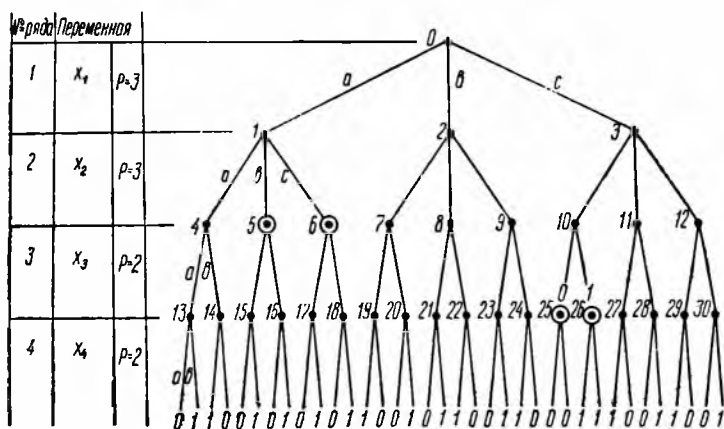


Рис. 2

Стоимость функции зависит от порядка разложения по существенной переменной. Для каждого конкретного случая разложения стоимость функции подсчитывается итеративно по рядам

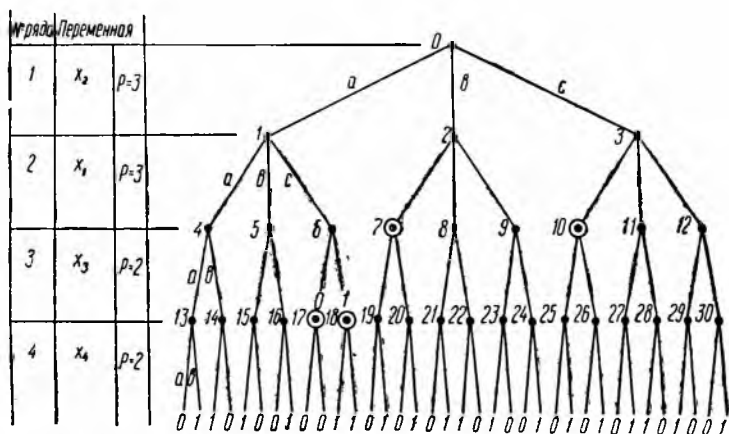


Рис. 3

дерева. При этом стоимость ребра, входящего в множество H_k^i , учитывается только один раз.

Рассмотрим два примера декомпозиции одной и той же функции, заданной таблично. Зафиксируем порядок разложения по рядам дерева от корня к листьям: (x_1, x_2, x_3, x_4) (рис. 2; \odot — обозначение сходности). Определим множество B^k ($k = 1, 4$): $B^1 = \emptyset$; $B^2 = (H_1^2, H_2^2, H_3^2)$; $H_1^2 = (4, 8, 9)$; $H_2^2 = (5, 6)$; $H_3^2 = (7, 11, 12)$; $B^3 = (H_1^3, H_2^3)$; $H_1^3 = (13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 28, 30)$; $H_2^3 = (14, 19, 22, 24, 27, 29)$. Расчет стоимости дерева и результирующая декомпозиция представлены ниже.

Стоимость	Результат декомпозиции
$C_0 = C_1 + C_2 + C_3 + 6 = 33$;	$f_0 = x_1^a f_1 \vee x_2^b f_2 \vee x_3^c f_3$;
$C_1 = C_4 + C_5 + 2 + 3 = 12$;	$f_1 = x_1^a f_4 \vee (x_2^b \vee x_2^c) f_5$;
$C_2 = C_7 + 2 + 3 = 6$;	$f_2 = x_2^a f_7 \vee (x_2^b \vee x_2^c) f_4$;
$C_3 = C_{10} + 2 + 3 = 6$;	$f_3 = x_2^a f_{10} \vee (x_2^b \vee x_2^c) f_7$;
$C_4 = C_{14} + C_{15} + 4 = 6$;	$f_4 = x_3^a f_{15} \vee x_3^b f_{14}$;
$C_5 = 1$;	$f_5 = f_{15}$;
$C_7 = 4$;	$f_7 = x_3^a f_{14} \vee x_3^b f_{15}$;
$C_{10} = 1$;	$f_{10} = x_3^a$;
$C_{14} = 1$;	$f_{14} = x_4^a$;
$C_{15} = 1$;	$f_{15} = x_4^b$;

Установим новый порядок разложения по рядам дерева от корня к листьям: (x_2, x_1, x_3, x_4) (рис. 3). Определим множество B^k ($k = 1, 4$): $B^1 = (H_1^1)$; $H_1^1 = (2, 3)$; $B^2 = (H_1^2, H_2^2, H_3^2)$; $H_1^2 = (4, 8, 11)$; $H_2^2 = (7, 10)$; $H_3^2 = (5, 9, 12)$; $B^3 = (H_1^3, H_2^3)$; $H_1^3 = (13, 16, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 30)$; $H_2^3 = (14, 15, 22, 23, 28, 29)$.

Стоимость подсчитывается ниже.

Как видим, порядок разложения, представленный на рис. 3, экономичнее на чегыре операнда.

Общее количество регулярных деревьев для функции от n переменных равно $n!$. Таким образом, предьявленный алгоритм вряд ли может иметь практическое значение. Скорее всего он может стать той теоретической базой, на основании которой могут формироваться более практичные алгоритмы.

Стоимость	Результат декомпозиции
$\bar{7}_0 = C_1 + C_2 + 2 + 3 = 29;$	$f_0 = x_2^a f_1 \vee (x_2^b \vee x_2^c) f_2;$
$\bar{8}_1 = C_4 + C_5 + C_6 + 6 = 17;$	$f_1 = x_1^a f_4 \vee x_1^b f_5 \vee x_1^c f_6;$
$\bar{E}_2 = C_7 + 6 = 7;$	$f_2 = x_1^a f_7 \vee x_1^b f_4 \vee x_1^c f_5;$
$\bar{7}_4 = C_{13} + C_{14} + 4 = 6;$	$f_4 = x_3^a f_{13} \vee x_3^b f_{14};$
$\bar{7}_5 = 4;$	$f_5 = x_3^a f_{14} \vee x_3^b f_{13};$
$\bar{7}_6 = 1;$	$f_6 = x_3^b;$
$\bar{7}_7 = 1;$	$f_7 = f_{13};$
$C_{13} = 1;$	$f_{13} = x_4^b;$
$C_{14} = 1;$	$f_{14} = x_4^a.$

Список литературы : 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О теории интеллекта. — Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 109—112. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Об алгебре предикатов с отрицанием. — АСУ и приборы автоматики, 1978, вып. 22, с. 42—49. 3. Сигалов В. Л. Задача факторизации формул алгебры конечных предикатов. — Вопросы применения ЭВМ при разработке и исследовании техн. систем. — К.: 1981, ИК АН УССР, препринт 80—42, с. 7—16.

Поступила в редколлегия 07.12.81.

УДК 519.713

В. А. ГОРОХОВАТСКИЙ, С. Ф. КАЦАЛАП, канд. техн. наук,
Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ

Известными методами распознавания, обеспечивающими инвариантность к геометрическим преобразованиям плоских изображений, являются алгоритмы, основанные на вычислении моментных инвариантов. Интегральные моменты от функций яркости распознаваемого изображения при этом соответствуют коэффициентам разложения функции яркости в вариационный ряд [1]. Точность таких методов определяется количеством используемых моментов. Однако уже для простейшего случая моментов 4-го порядка инварианты имеют довольно громоздкий вид и требуют большого объема вычислений [1]. Кроме того, эти методы не позволяют вычислять параметры геометрических преобразований изображений, необходимые для обработки изображения объекта после его опознавания, например, определения местоположения объекта в пространстве. В настоящее время

исследуются также дифференциальные алгоритмы распознавания, основанные на измерении параметров геометрических преобразований входного изображения во всех точках. Общим недостатком дифференциальных методов по сравнению с интегральными является их низкая помехозащищенность к случайным высокочастотным помехам.

Можно построить алгоритм автоматического распознавания изображений с предварительной нормализацией, который включает в себя три этапа обработки изображения: 1) вычисление параметров геометрических преобразований; 2) приведение изображения к эталонному виду (нормализация); 3) принятие решения (сравнение с эталонами).

Наиболее трудоемкими в вычислительном отношении являются этапы 2 и 3, так как они связаны с обработкой каждой точки изображения и с перебором по всему пространству эталонов. Кроме того, при приведении к эталону появляются искажения за счет погрешностей в случае вычисления параметров на этапе 1 и вторичных преобразований дискретизации и квантования изображений.

Здесь предложен алгоритм распознавания с предварительной нормализацией, лишенный указанных недостатков. Этот алгоритм связан с многократным измерением параметров геометрических преобразований для одного и того же изображения и позволяет упростить процедуру принятия решений и сократить временные затраты.

Из основной теоремы теории нормализации [2] следует, что для одного и того же класса эквивалентности изображений, образованного действием на эталон $B_0 \subset M_0$ (M_0 — множество эталонов) и группы преобразований G , существует большое разнообразие конкретных представлений нормализаторов. Анализ общего вида нормализатора, заданного преобразованием $F(B) = B\bar{\Phi}(B)$, $B \subset M$, $\bar{\Phi}: M \rightarrow G$, показывает, что это разнообразие может быть обеспечено лишь различием отображений $\bar{\Phi}(B)$, и каждое преобразование из группы G в общем случае однозначно характеризуется совокупностью параметров g , $g \in G$. Так, смещения, масштабы, косые сдвиги как геометрические преобразования определяются однозначно, повороты вычисляются с точностью до множества элементов $H \subset G$, таких что $hB = B$, $h \in H$, $B \subset M$.

Пусть $\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2, \dots, \bar{\Phi}_s$ — отображения, $\bar{\Phi}_i: M \rightarrow M_0$, $i = \overline{1, s}$, а F_1, F_2, \dots, F_s — соответствующие им операторы. Тогда если применить операторы F_1, F_2, \dots, F_s к изображению из класса эквивалентности a , порожденного G и эталоном B_0^2 на множестве M , $B = gB_0^2$, $g \in G$, будет выполняться условие $g_1 = g_2 = \dots = g_s$ (1), где g_i , $i = \overline{1, s}$ — параметры преобразования при отображениях $\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2, \dots, \bar{\Phi}_s$. Это важное свойство операторов нормализации можно использовать для распознавания изображе-

ний с целью определения их классов эквивалентности, так как равенство (1) имеет место только для изображений, связанных между собой преобразованием из группы, т. е. принадлежащих одному классу эквивалентности. Необходимое и достаточное условие нормализации [2] имеет вид

$$\bar{\Phi}(B)g = \bar{\Phi}(B_0), \quad B \subset M, \quad B_0 \subset M_0, \quad g \in G. \quad (2)$$

Задача распознавания в самом общем случае может быть представлена как задача решения уравнения (2) относительно неизвестной функции яркости B_0 . Для случая интегральных отображений $\bar{\Phi}$ уравнение (2) является интегральным и поэтому для произвольных B_0 решения не имеет.

Алгоритм предварительной нормализации находит решение уравнения (2) путем отыскания явного вида отображений $\Phi(B_0)$ и $\bar{\Phi}(B)$, определения величины g , а затем компенсации преобразования g в изображении B . Смысл же предлагаемого алгоритма распознавания сводится к тому, что изображение будет отождествлено с эталоном B_0 , если оно удовлетворяет функциональному уравнению

$$g = [\bar{\Phi}_1(B)]^{-1}\bar{\Phi}_1(B_0) = [\bar{\Phi}_2(B)]^{-1}\bar{\Phi}_2(B_0) = \dots [\bar{\Phi}_s(B)]^{-1}\bar{\Phi}_s(B_0), \quad (3)$$

где $[\bar{\Phi}(B)]^{-1}$ — отображение, обратное к $\bar{\Phi}(B)$. Выбор $\{\bar{\Phi}_i\}$, $i = \bar{1}, s$ и количество членов s в равенстве (3) в общем случае определяются разнообразием распознаваемых изображений, соотношением сигнал/шум при распознавании и свойствами самих отображений $\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2, \dots, \bar{\Phi}_s$.

В целях повышения достоверности принятия решения в условиях помех и погрешностей дискретизации и квантования, когда равенство (3) будет выполняться приближенно, правило классификации имеет вид

$$B \subset a, \text{ если } \operatorname{arg} \left\{ \min_{B_0 \subset M_0} \sum_{i=1}^s \rho(g_i, g_i) \right\} = B_0^a.$$

Здесь B_0^a — эталон класса a ; ρ — метрика на множестве действительных чисел или векторов (элементов группы). В качестве ρ можно использовать известные метрики среднеквадратического отклонения или сумм модулей разностей величин $g_i, g_j, i \neq j$.

Классификация согласно правилу (3), в отличие от методов распознавания изображений по инвариантным признакам, допускает дополнительную проверку решения. Согласно вычисленным параметрам преобразования всегда можно осуществить нормализующее преобразование входного изображения и сравнить его с эталонами. Возможным становится также визуальный контроль процесса распознавания с помощью систем отображения информации, что повышает надежность алгоритма.

удобными с точки зрения простоты вычисления являются геометрические центры изображений по отдельным уровням яркости. При этом s выбирается равным количеству градаций яркости изображения, а величина $l=2$. Предварительно для всех эталонов вычисляются векторы геометрических центров X_1, X_2, \dots, X_s по оси x и Y_1, Y_2, \dots, Y_s по оси y . Выберем в качестве условия выполнения равенства (3) минимум величины

$$R = \sum_{i \neq j} [(X_i^0 - X_j^0)^2 + (Y_i^0 - Y_j^0)^2], \quad i = \overline{1, s}; \quad j = \overline{1, s} \quad (6)$$

при переборе по всем эталонным наборам геометрических центров, причем величины X_i^0 и Y_i^0 представляют собой параметры смещения для i -го центра, определяемые по формулам $X_i^0 = X_i - X_i^*$, $Y_i^0 = Y_i - Y_i^*$, X_i^* , $i = \overline{1, s}$, Y_i^* , $i = \overline{1, s}$ — функционалы геометрических центров распознаваемого изображения. Ограничение (4) при этом выражается в отсутствии полного покоординатного совпадения векторов X_1, X_2, \dots, X_s и векторов Y_1, Y_2, \dots, Y_s для различных эталонов. Для контроля решения о распознавании в данном случае допускается усреднение вычисленных параметров преобразования

$$X^0 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s X_i^0, \quad Y^0 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_i^0$$

и осуществление нормализующего преобразования изображения с последующим сравнением с эталонами.

При нормализации в центроаффинной группе, когда $g = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, в качестве нормализаторов можно выбрать операторы, основанные на функциональных центрах тяжести с различными парами весовых функций (φ_1, φ_1') и (φ_2, φ_2') . Будем принимать решение о принадлежности распознаваемого изображения к тому классу эквивалентности, для которого совпадут решения систем линейных уравнений, коэффициентами которых выступают функциональные центры тяжести. Условия (4) для этого случая выражаются в несовпадении матриц функциональных центров тяжести, вычисленных для различных эталонных изображений. Выполнения этого условия всегда можно добиться подбором функций $\varphi_1, \varphi_1', \varphi_2, \varphi_2'$.

При оценке соотношения количества вычислительных операций, необходимых для реализации предложенного алгоритма и традиционного алгоритма распознавания с нормализацией, для случая смещений получено

$$\delta = \frac{6 + 12p}{6s + sp/m^2}, \quad (7)$$

где δ — выигрыш во времени вычислений; p — количество эталонов; s — число используемых отображений в (1); m — размеры изображений.

Выражение (7) получено в предположении, что распознавание осуществляется путем вычисления p коэффициентов корреляции последовательным способом, причем операция умножения в три раза длиннее по времени, чем операция сложения.

Из выражения (7) виден линейный характер зависимости $\delta(p)$, так как вторым членом в знаменателе для практических значений параметров m , p можно пренебречь. Таким образом, с увеличением числа эталонов p выигрыш во времени возрастает. Так, для случая $s = 10$, $p = 10$, $m = 16$ имеем $\delta = 3,1$, а при $p = 20$, $s = 10$, $m = 16$ — $\delta = 6,4$. Параллельные вычисления одновременно для всех s отображений, возможные в описанном алгоритме, позволят еще больше сократить объем вычислений.

В целях исследования эффективности предложенного алгоритма была разработана программа для ЭВМ, моделирующая процесс распознавания изображений, подвергнутых преобразованиям смещения в поле зрения. В качестве эталонных использовались изображения квадрата размером 30×30 элементов на дискретном поле 50×50 , заполненные случайными целыми числами с равномерным по амплитуде законом распределения. Для нормализации применялись функционалы геометрических центров тяжести по уровням квантования изображения. Такой выбор функционалов и изображений соответствует интересному с практической точки зрения случаю, когда интегральные характеристики у эталонных изображений примерно равны, т. е. значения признаков (в данном случае геометрические центры), используемых для распознавания, близки для различных эталонов. Для распознаваемого изображения определяли величины геометрических центров, затем вычисляли параметры смещения всех геометрических центров изображения относительно эталонных величин, хранящихся в памяти ЭВМ. Для каждого из эталонов определялась величина (6), по минимуму которой и принималось решение о классе изображения.

Для экспериментов использовали изображения с 8-ю уровнями яркости, количеством отображений $s = 8$, количество эталонов равнялось 10. Эталоны поочередно подвергались смещениям, а затем осуществлялось распознавание. Было проведено 1000 экспериментов с различными реализациями эталонов и смещений.

На этой выборке получено 3 ошибочных решения. Следовательно, вероятность правильного распознавания можно оценить величиной 0,99.

Описанные эксперименты подтверждают работоспособность и достаточно высокую достоверность опознавания.

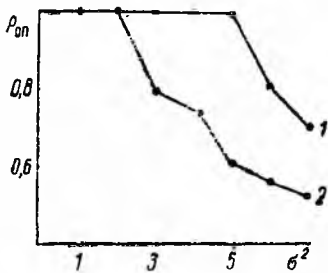
С целью оценки помехозащищенности метода были проведены статистические исследования на ЭВМ, когда изображения, помимо смещений, искажаются аддитивным нормально распределенным по амплитуде шумом. Для этого в качестве эталонов

были выбраны 5 изображений ϕ различными наборами величин геометрических центров по уровням яркости в целях удовлетворения ограничения (4). В сравнительном плане исследовался и алгоритм распознавания с применением предварительной нормализации и последующим сравнением с эталонами путем вычисления коэффициентов корреляции. При этом оценивалось соотношение сигнал — шум на входе алгоритма распознавания, при котором обеспечивается необходимая (0,95—0,99) вероятность правильного распознавания. Под соотношением сигнал — шум понимается соотношение амплитуд изображения и помехи $\delta_A = B_{\text{ср}}/\sqrt{\sigma^2}$, где $B_{\text{ср}}$ — среднее значение яркости незашумленного изображения; σ^2 — дисперсия шума.

При каждом уровне шума было проведено 100 экспериментов. В результате имитационного моделирования на ЭВМ получены экспериментальные зависимости вероятности правильного опознавания $P_{\text{оп}}$ от дисперсии случайного шума σ^2 , приведенные на рисунке.

Как видно из рисунка (кривая 1), предложенный алгоритм распознавания обладает для выбранного класса эталонов и соответствующего набора функционалов более высокой помехозащищенностью, чем традиционный алгоритм нормализации (кривая 2), и позволяет осуществлять уверенное распознавание с вероятностью $P_{\text{оп}} \geq 0,99$ до уровня помех $\sigma^2 = 5$ или $\delta_A = 1,8$. Алгоритм распознавания с нормализацией обеспечивает эту вероятность при уровне помех меньшем, чем $\sigma^2 = 2$ или $\delta_A = 2,8$. Повышенная помехозащищенность метода объясняется многократным характером измерений параметров геометрических преобразований и отсутствием нормализующих преобразований во всех точках изображения, усиливающих погрешности вычисления параметров.

Таким образом, разработанный алгоритм, обладая повышенным быстродействием, позволяет уменьшить влияние погрешностей определения параметров преобразования и упростить реализацию алгоритмов распознавания с применением предварительной нормализации.



Список литературы: 1. Шибанов Г. П. Распознавание в системах автоконтроля. — М.: Машиностроение, 1973.—424 с. 2. Путятин Е. П. Теоретические предпосылки нормализации изображений. — Проблемы бионики, 1972, вып. 10, с. 82—89. 3. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. — М.: Мир, 1976.—511 с.

Поступила в редколлегию 05.11.81.

М. А. ПЕНЬКОВ, д-р мед. наук, М. Л. КОЧИНА, Ю. А. УТКИН

АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗОХРОМ РОГОВОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА И ВЫДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Постоянная забота государства о здоровье трудящихся, прогресс науки и техники приводит к широкому распространению сложных диагностических комплексов на базе ЭВМ.

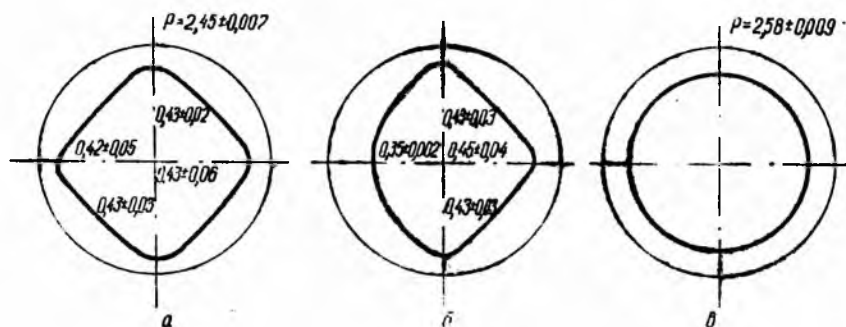


Рис. 1

В последние годы отечественная промышленность освоила серийный выпуск микро-ЭВМ разных типов, которые могут быть использованы при создании специализированных диагностических комплексов аппаратуры для массового обследования органа зрения.

Использование микро-ЭВМ в сочетании с поляризационными офтальмологическими приборами, позволяющими без контакта с роговой оболочкой глаза больного получить информацию об уровне внутриглазного давления или о состоянии глазодвигательного аппарата, позволит значительно ускорить процесс диагностики, улучшить обслуживание больных, облегчить работу медицинского персонала.

Диагностические возможности интерференционного метода, основанного на анализе формы и размеров роговичных изохром глаз в норме и при патологии, описаны в работах [1, 2].

При исследовании интерференционных картин глаз больных и здоровых людей удалось выработать геометрические эталоны изохром нормальных глаз, глаз с повышенным внутриглазным давлением и патологией глазодвигательного аппарата. Наличие геометрических эталонов позволило приступить к разработке и реализации комплекса программ, предназначенных для моделирования системы распознавания интерференционных картин глаз. На рис. 1 представлена схема интерференционной изохромы 1-го

порядка нормального глаза (эталон — норма) (а); схема интерференционной изохромы глаза со сходящимся косоглазием (эталон — косоглазие) (б); схема интерференционной изохромы глаза с внутриглазным давлением в интервале 30—35 мм. рт. ст. (эталон — глаукома) (в). Все значения геометрических параметров, представленных на схемах, приводятся в относительных величинах, т. е. все измеренные параметры разделены на среднее значение диаметра роговицы (это исключает влияние варибельности индивидуальных размеров роговицы и масштаба всего изображения).

Цель работы: установить возможности самообучающегося алгоритма анализа интерференционных изохром роговой оболочки глаза, объяснить выбор диагностических признаков и исследовать пути возможной программно-аппаратной реализации анализа выбранных признаков.

Для последующей классификации сделаем следующие допущения, упрощающие разработку алгоритма анализа интерференционных изохром роговой оболочки глаза.

1. Изображение глаза считаем плоским, не имеющим текстуры (распределения яркости), не имеющим спектра (два цвета — черный и белый), находящимся на фиксированном расстоянии от телекамеры (масштаб изображения не изменяется).

2. Центр матрицы изображения всегда совмещен с центром роговицы глаза пациента. Направление осей рамки совпадает с воображаемыми осями глаза пациента.

3. Изображения эталонов (100×100 точек), подаваемые на вход системы, составляются вручную согласно геометрическим соотношениям, полученным ранее [2], и квантуются по восьми уровням яркости. Для получения точек, принадлежащих контуру изображения, применяем операцию пространственного дифференцирования.

4. Существенное изменение кривизны контуров в местах пересечения отрезков сторон для упрощения задачи в первом варианте не учитывается.

Алгоритм анализа интерференционных изохром роговой оболочки глаза. Существенной особенностью алгоритма является автоматическое обучение (самообучение) нескольким эталонам. Изображение эталона формируется автоматически, для чего необходимо заранее резервировать память (в первом варианте алгоритма для ввода и пространственного дифференцирования необходимый объем памяти превышает 102 К байт).

Каждое изображение интерференционных изохром сопровождается своим паспортом, паспорт определяет режимы работы алгоритма — «обучение» или «диагностика» и номер области памяти (если это эталон), куда заносятся признаки изображения. В данном алгоритме резервируются только три области памяти на эталоны, однако в дальнейшем их количество будет доведено до семи.

На рис. 2 представлена схема алгоритма, по которой видно, каким образом происходит процесс анализа входного изображения. После того, как найден паспорт изображения, соответствующий эталону, выделяются признаки изображения. Первым и обязательным для всех изображений этапом выделения призна-

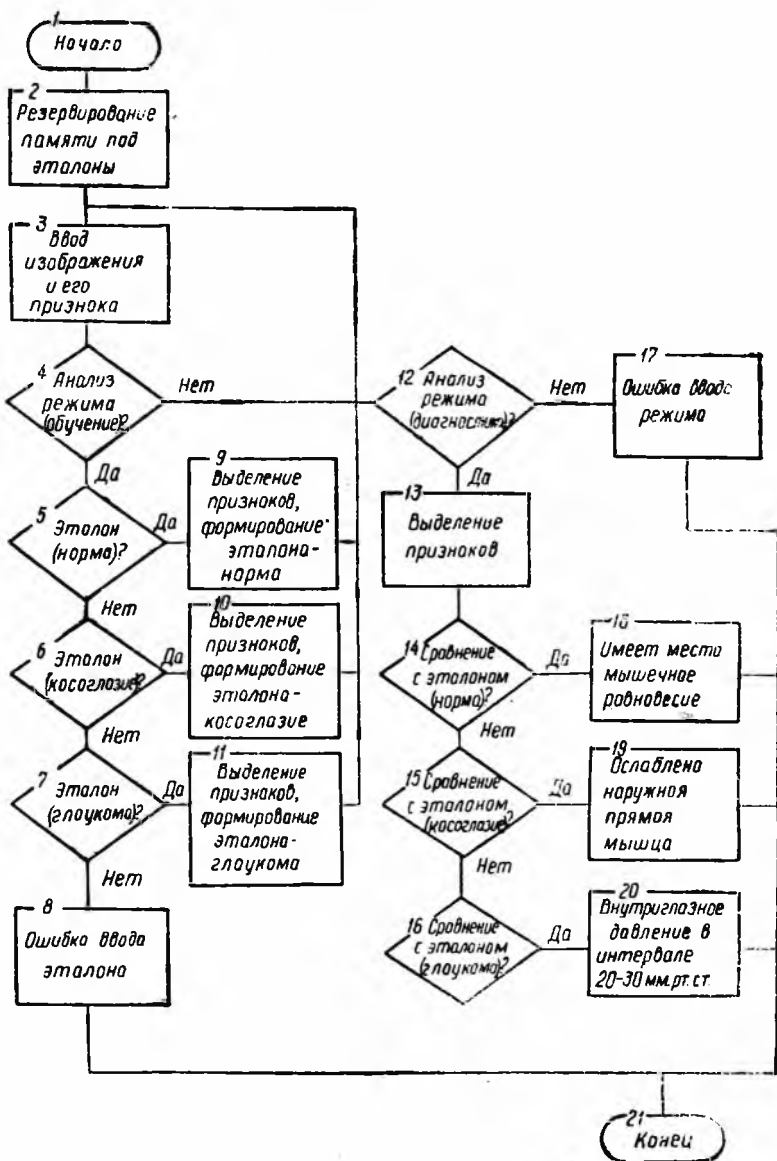


Рис. 2

ков является снижение исходного объема информации. Как было показано в работах [1—2], наиболее информативными являются интерференционные изохромы 1-го порядка роговой оболочки глаза, которые, по существу, представляют собой контурные линии. Контурное изображение может быть получено из исходного путем выделения областей, содержащих резкие переходы от темного к светлому, и подавления областей с примерно однородной интенсивностью. Согласно психофизической теории реакция зрительной системы на освещенность описывается логарифмической шкалой. Это показывает, что сначала необходимо прологарифмировать функцию интенсивности, а затем квантовать и обрабатывать дифференциальным оператором. На языке функций интенсивности контур — это область плоскости (x, y) , где велик градиент функции интенсивности $F(x, y)$. Обозначим $\log F(x, y)$ как $F_N(x, y)$, N — количество точек изображения. Схема обнаружения контуров методом подчеркивания перепадов яркости с применением порогового ограничения приведена на рис. 3.

Выбор пространственного оператора дифференцирования $H(x, y)$ очень важен. Для этих целей могут быть использованы операторы Робертса, Первитт и Собела [3], все они пригодны для выделения контура на изображении. В данном алгоритме был использован оператор Робертса, так как после его действия получается меньшее количество точек, принадлежащих контуру, что облегчает дальнейшую их фильтрацию [4].

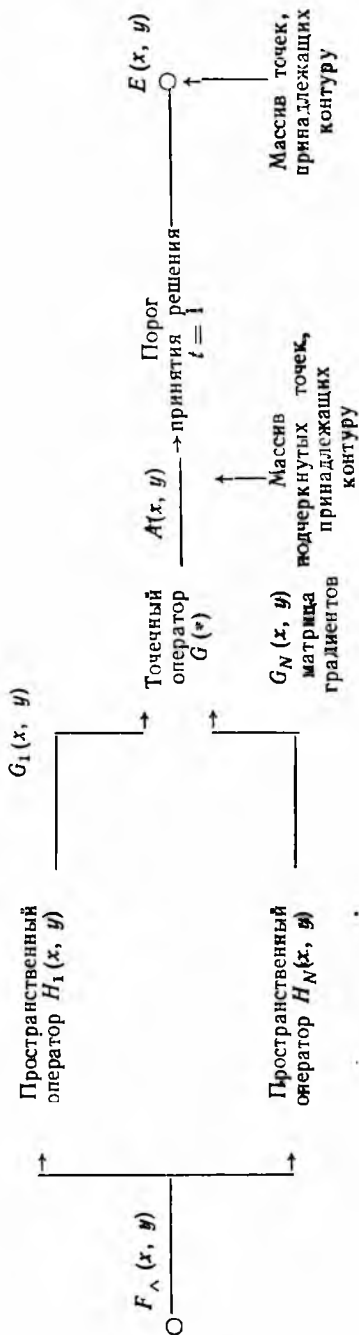


Рис. 3

В результате действия оператора формируется массив подчеркнутых точек, принадлежащих контуру (набор градиентных функций): $G_i(x, y) = F_{\wedge}(x, y) \otimes H_i(x, y)$, где \otimes означает пространственную свертку. Амплитуда $A_i(x, y)$ каждой точки находится следующим образом: $A(x, y) = \sqrt{[G_1(x, y)]^2 + [G_2(x, y)]^2}$. Эта операция занимает довольно длительное время, поэтому ее желательно упростить до вида $A(x, y) = |F_{\wedge}(x, y) - F_{\wedge}(x + 1, y + 1)| + |F_{\wedge}(x, y + 1) - F_{\wedge}(x + 1, y)|$, где x, y — координаты точек.

Если все соотношение реализовать аппаратно, то при этом придется запоминать всего две строчки массива, что существенно снизит требования к вычислительной машине и позволит применить микро-ЭВМ с небольшим объемом памяти.

Решение о наличии контура принимается в результате сравнения амплитуды $A(x, y)$ с порогом T . Если $A(x, y) > T$, то считается, что в данном месте присутствует точка контура, если же $A(x, y) < T$, то контур отсутствует. Результат обнаружения контура представляется в виде бинарного (звездочка или пробел) изображения $E(x, y)$, где звездочками обозначено наличие точек контура.

Величина порога T влияет на чувствительность пространственного дифференциального оператора. При отсутствии шума этот порог можно выбирать таким, что все перепады яркости с минимальным уровнем контрастности будут обнаружены и определены как контуры, во всех остальных точках изображения контуры будут отсутствовать. Из-за технических трудностей (составления изображения вручную) не проводились эксперименты по подбору порога T , он принят равным 1,0, что является средним его значением, полученным в работе [5].

После получения массива точек $E(x, y)$ производится фильтрация (исключаются лишние точки), что позволяет приступить к аппроксимации контура отрезками прямых и дуг окружности. После этого находятся геометрические признаки полученного контура (эталонного), они определенным образом комплектуются в памяти. Так проводится обучение эталону одного вида. Аналогично производится обучение и другим эталонам, которых в данной статье представлено три.

После режима «обучение» на вход поступает любое изображение с признаком режима «диагностика» в паспорте. Пройдя ранее описанные стадии упрощения, выделения контура и аппроксимации контура отрезками, определения набора геометрических признаков, изображение последовательно сравнивается с эталонами. Признаки эталонов задаются последовательностью чисел (допустим разброс размеров — в пределах 5 %). Возможный разброс параметров был определен экспериментально на большом количестве глаз. При попадании значения геометрического признака в заданный эталонный интервал прини-

ймается положительное решение о классификации поступившего изображения и печатается диагностическое сообщение.

Например: имеет место мышечное равновесие. Размеры диагоналей контура $S(1) = 0,44$; $S(2) = 0,43$; $S(3) = 0,43$; $S(4) = 0,44$. Такое диагностическое сообщение соответствует случаю совпадения поступившего изображения с эталоном, представленным на рис. 1, а. При несовпадении ни с одним из эталонов печатается текст: Ошибка ввода.

Исследование и объяснение выбранных диагностических признаков. Рассмотрим эталоны с точки зрения их геометрических свойств. Все они обладают симметрией и их проще рассматривать, совместив центр симметрии с центром координатной сетки (рис. 4). Как видно по рисунку, эталон легко разбивается на 4 отрезка, находящиеся в четырех обозначенных квадрантах. Каждый i отрезок может быть аппроксимирован прямой или дугой окружности. В данной задаче все отрезки аппроксимированы дугами окружностей.

Для проведения дуги окружности радиуса R с центром в точке с координатами x_c, y_c через N точек, принадлежащих контуру, минимизируется выражение

$$f(x, y) = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2} - R^2.$$

Согласованность совокупности экспериментальных точек (x_i, y_i) и дуги D измеряется функцией

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^4 f(x_i, y_i).$$

Мерой согласованности контура k , состоящего из дуг D_j , и совокупности экспериментальных точек считается функция

$$F(K) = \sum_{j=1}^4 F(D_j).$$

Условием минимизации считается выражение $F(K) = \min$.

Программа аппроксимации контура по заданным точкам осуществляется на двух уровнях. На нижнем уровне происходит построение оптимальной дуги методом последовательных приближений. На верхнем уровне по аппроксимированным дугам строится контур. Построение контура основано на методе градиентного спуска.

В результате работы программы получают следующие данные: координаты центров и радиусы дуг, размеры диагоналей кривой, которые необходимы для сравнения с эталонами.

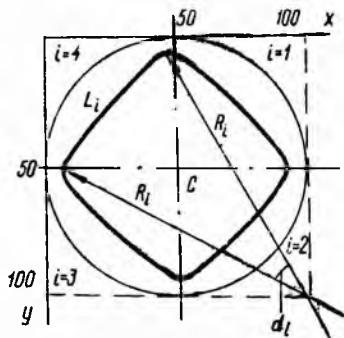


Рис. 4

Кроме того, в процессе экспериментальных исследований было установлено, что с ростом внутриглазного давления увеличивается периметр интерференционной изохромы 1-го порядка, поэтому для определения уровня внутриглазного давления необходимо знать длину интерференционной кривой.

Длина дуги в i квадранте определяется по формуле

$$L_i = \frac{2\pi R_i \alpha_i}{360^\circ} = 0,0174 R_i \alpha_i,$$

где R_i — радиус i дуги; α_i — центральный угол, соответствующий дуге окружности. Периметр P кривой — сумма длин дуг в каждом из квадрантов:

$$P = \sum_{i=1}^4 L_i.$$

Все полученные геометрические признаки исследуемого изображения сводятся в таблицу. Сравнение интерференционной кривой на роговой оболочке глаза пациента с эталонами сводится к сравнению таблиц признаков, выделенных из исследуемой изохромы и изображения эталона. Таблицы признаков эталонов могут быть заданы в готовом виде, минуя основные этапы исследования и аппроксимации.

Использование данного алгоритма анализа интерференционных изохром роговой оболочки глаза позволяет значительно ускорить и упростить процесс диагностики.

Список литературы: 1. Пеньков М. А., Кочина М. Л. Интерференционный метод в диагностике косоглазия. — Вестник офтальмологии, 1981, № 1, с. 39–41. 2. Кочина М. Л. Результаты исследования интерференционных карти глаз. — В кн.: Актуальные вопросы офтальмологии, М.: Наука, 1980, с. 47–51. 3. Дуда Р., Харг П. Распознавание образов и анализ сцен. — М.: Мир, 1976.—511 с. 4. Робертс Л. Автоматическое восприятие трехмерных объектов. Интегральные работы. — М.: Мир, 1973.—421 с. 5. Абду И. Э., Прэтт У. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением. — ТИИЭР, 1979 № 5. Распознавание образов и обработка изображений, с. 224.

Поступила в редколлегию 17.12.79

УДК 510.62

Н. Г. САРНАВСКИЙ, канд. техн. наук

РАСПОЗНАВАНИЕ ПРЕДИКАТА УПОРЯДОЧЕНИЯ КАК ФУНКЦИИ ТРЕХЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ

Пусть E — упорядоченное множество. Тогда на E естественным образом определена функция двух аргументов $D(x, y)$, принимающая три значения:

$$D(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } x = y, \\ 1, & \text{если } x < y, \\ 2, & \text{если } x > y. \end{cases} \quad (1)$$

Введем для чисел 0, 1, 2 упорядочение: $0 < 1 < 2$ и будем также рассматривать для них операции по mod 3. Функция $D(x, y)$ очевидно удовлетворяет следующим свойствам: 1) если $D(x, y) = a$, то $D(y, x) = b$, где $a + b \equiv 0 \pmod{3}$; 2) если $D(x, y) = a$, где $a = 0, 1$, то $x \leq y$; если $D(y, z) = b$, где $b = 0, 1$, то $y \leq z$; если $D(x, z) = c$, где $c = \max\{a, b\}$, то $x \leq z$. Изучим функции $T(x, y)$, представимые в виде $T(x, y) = D(f(x), f(y))$ (2). Здесь $f: E \rightarrow L$ отображение E на упорядоченное множество L .

Из свойств 1, 2 функции $D(x, y)$ сразу вытекают следующие свойства функции $T(x, y)$, представимой в виде (2): 1') если $T(x, y) = a$, то $T(y, x) = b$, где $a + b \equiv 0 \pmod{3}$; 2') если $T(x, y) = a$ ($a = 0, 1$), $T(y, z) = b$ ($b = 0, 1$), то $T(x, z) = c$, где $c = \max(a, b)$.

Из 1' получаем, что $T(x, x) = 0$; из $T(x, y) = 0$ следует $T(y, x) = 0$ (3), а из 2' — $T(x, y) = 0$, $T(y, z) = 0 \rightarrow T(x, z) = 0$ (4).

Покажем, что условия 1', 2' не только необходимы, но и достаточны для представимости функции $T(x, y)$ на $E \times E$, принимающей значения 0, 1, 2 в виде (2). Пусть $T(x, y)$ удовлетворяет условиям 1', 2'. Определим на E отношение: $x \sim y$, если $T(x, y) = 0$. Тогда в силу (3) отношение \sim симметрично и рефлексивно, а из (4) вытекает транзитивность этого отношения. Следовательно, имеет место разбиение $E = \cup E_i$, $E_i \cap E_j = \emptyset$ ($i \neq j$) (5) множества E на классы E_i эквивалентных между собой элементов.

Определим следующие отношения на множестве классов $\{E_i\}$: $E_i < E_j$, если $T(x, y) = 1$ для некоторых $x \in E_i$, $y \in E_j$.

Очевидно, что это определение корректно. Более того, легко показать, что введенное таким образом отношение $<$ на множестве классов $\{E_i\}$ превращает его в упорядоченное множество.

Положим $L = \{E_i\}$. Сопоставим каждому элементу $x \in E$ элемент $f(x) = E_i \in L$ множества L , где $x \in E_i$. Тогда $T(x, y) = D(f(x), f(y))$ (6), где функция D определена на $L \times L$.

В самом деле, если $T(x, y) = 0$, то элементы x, y принадлежат одному подмножеству E_i , а $f(x) = f(y) = E_i$ и $D(f(x), f(y)) = 0$.

Пусть $T(x, y) = 1$. Значит, $x \in E_i$, $y \in E_j$ и, согласно (1), $D(E_i, E_j) = 1$ или $T(x, y) = D(f(x), f(y))$.

Пусть, наконец, $T(x, y) = 2$. Тогда $T(y, x) = 1$ (в силу 1'). Следовательно, по доказанному $T(y, x) = D(f(y), f(x))$, откуда $T(x, y) = D(f(x), f(y))$. Это завершит доказательство.

Итак, нами установлена

Теорема 1. Пусть E — произвольное множество, а $T(x, y)$ — функция на E , принимающая значения 0, 1, 2. Равенство $T(x, y) = D(f(x), f(y))$, где $f: E \rightarrow E_1$ — отображение E на упорядоченное множество E_1 , а $D(x, y)$ — функция (1) имеет место тогда и только тогда, когда $T(x, y)$ удовлетворяет условиям 1' и 2'.

Значение. Пусть E — конечное упорядоченное множество. Положим, как и выше, $L = \{E_i\}$ (см. 5). Так как мощность множества L не превосходит мощности множества E , то существует взаимно однозначное соответствие между множеством L и некоторым подмножеством E' множества E .

Пусть элементы множеств L и E' занумерованы так, что выполняются неравенства $E_1 L \dots < E_t$ ($L = E_1 \cup \dots \cup E_t$), $\alpha_1 < \dots < \alpha_t$. Согласно доказанному, множество L упорядочено, а E' допускает естественное упорядочение как подмножество упорядоченного множества E .

Построим теперь функцию $f: E \rightarrow E'$, определенную условием $f(x) = \alpha_i$, если $x \in E_i$. Тогда $T(x, y) = D(f(x), f(y))$. В самом деле, если $T(x, y) = 0$, то $x, y \in E_i$ (для некоторого i) и $f(x) = f(y) = \alpha_i$.

Если $T(x, y) = 1$ и $x \in E_i, y \in E_j$, то, как было показано выше, это означает, что $E_i < E_j$, и тогда $\alpha_i < \alpha_j$ и $D(f(x), f(y)) = D(\alpha_i, \alpha_j) = 1$. Если же $T(x, y) = 2$, то $T(y, x) = 1$ и, значит, $T(y, x) = D(f(y), f(x))$, откуда $T(x, y) = D(f(x), f(y))$.

Исследуем теперь функции $T(x, y)$, представимые в виде $T(x, y) = D(f_1(x), f_2(x))$ (7), где f_1, f_2 — отображения множества E на некоторое упорядоченное множество L .

Найдем сначала необходимые условия, которым должна удовлетворять функция $T(x, y)$ вида (7).

1) Для любого $x \in E$ ($y \in E$) существует элемент $y \in E$ ($x \in E$) такой, что $T(x, y) = 0$.

Доказательство. Так как f_2 есть сюръективное отображение E на L , то для любого $x \in E$ существует такой элемент $y \in E$ что $f(x) = f(y)$.

Тогда $T(x, y) = D(f(x), f(y)) = 0$ (аналогичное рассуждение при перестановке аргументов x и y).

2) Если $x_1, x_2 \in E$ ($y_1, y_2 \in E$) и хотя бы для одного элемента $y \in E$ ($x \in E$) выполняется равенство $T(x, y) = T(x_2, y) = 0$ (соответственно $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 0$), то $T(x_1, y) = T(x_2, y)$ для всех $y \in E$ (соответственно $T(x, y_1) = T(x, y_2)$ для всех $x \in E$).

Доказательство. Пусть $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 0$ для некоторого элемента $y_1 \in E$, т. е. $D(f_1(x_1), f_2(y_1)) = D(f_1(x_2), f_2(y_1)) = 0$. Тогда в силу определения функции $D(x, y) f_1(x_1) = f_2(y_1) = f_1(x_2) = f_2(y_1)$ и $f_1(x_1) = f_1(x_2)$. Следовательно, для всех $y \in E$ имеем $T(x_1, y) = D(f_1(x_1), f_2(y)) = D(f_1(x_2), f_2(y)) = T(x_2, y)$ (Аналогичное рассуждение при перестановке аргументов x и y).

3) Если $T(x_1, y) = 2, T(x_1, z) = 0, T(x_2, z) = 2$, то $T(x, y) = 2$. Если $T(x_1, y) = 1, T(x_1, z) = 0, T(x_3, z) = 1$, то $T(x, y) = 1$.

Доказательство. Пусть $T(x_1, y) = 2, T(x_1, z) = 0, T(x_2, z) = 2$. Тогда $f_1(x_1) > f_2(y), f_1(x_1) = f_2(z), f_1(x_2) > f_2(z)$, откуда $f_1(x_2) > f_1(x_1) = f_2(y)$, т. е. $T(x_2, y) = D(f_1(x_2), f_2(y)) = 2$. Аналогично доказывается второй пункт условия 3.

Покажем теперь, что условия 1 — 3 для функции $T(x, y)$ на любом множестве E достаточны для ее представимости в виде (7). В самом деле, предикат $T(x, y)$ определяет два отношения эквивалентности на E : а) $x_1 \sim x_2$, если $T(x_1, y) = T(x_2, y) \forall y \in E$; б) $y_1 \sim y_2$, если $T(x, y_1) = T(x, y_2) \forall x \in E$.

Эти определения эквивалентности можно ослабить следующим образом: $x_1 \sim x_2$, если существует элемент $y \in E$, что $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 0$. Действительно, из этого равенства в силу 2 следует $T(x_1, y) = T(x_2, y)$, $\forall y \in E$, т. е. $x_1 \sim x_2$. (Аналогичное утверждение имеет место для эквивалентности б).

Рассмотрим разбиение множества E на классы эквивалентных между собой элементов (по отношению к эквивалентностям а и б): $E = \cup E_i$, $E_i \cap E_j = \emptyset$ ($i \neq j$) (8); $E = \cup E'_i$, $E'_i \cap E'_j = \emptyset$ ($i \neq j$) (9).

Положим $L = \{E_i\}$, $L' = \{E'_i\}$. Согласно 1, для каждого фиксированного класса $E_i \in L$ существует такой класс $E'_j \in L'$, что $T(x, y) = 0$ для $x \in E_i$, $y \in E'_j$. Если $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 0$, то по доказанному $y_1 \sim y_2$. Следовательно, класс E'_j однозначно определяется классом E_i . Далее для каждого класса $E'_j \in L'$ существует такой класс $E_i \in L$, что $T(x, y) = 0$, где $x \in E_i$, $y \in E'_j$. Значит, отображение $\theta(E_i) = E'_j$ (10) определяет взаимно однозначное соответствие между множествами L и L' .

Условимся обозначать класс $\theta(E_i)$ через E'_i . Покажем, что множество классов эквивалентности L и L' допускают упорядочение.

Положим $E_i < E_j$, если существует элемент $y \in E$, такой, что для $x_1 \in E_i$, $x_2 \in E_j$, $T(x_1, y) = 0$, $T(x_2, y) = 2$; $E_i > E_j$, если существует элемент $y \in E$, такой, что $T(x_1, y) = 0$, $T(x_2, y) = 1$ ($x_1 \in E_i$, $x_2 \in E_j$). Легко доказать корректность этих определений.

Аналогично определяется упорядочение на L' .

Ранее мы ввели отображение θ множества L на L' : $\theta(E_i) = E'_i$ (мы употребляем предыдущие обозначения). Покажем, что отображение θ сохраняет порядок: если $E_i < E_j$, то $\theta(E_i) < \theta(E_j)$.

В самом деле, пусть $E_i < E_j$. Тогда для $x_1 \in E_i$, $x_2 \in E_j$ и $z \in E_i$ выполняются равенства $T(x_1, z) = 0$, $T(x_2, z) = 2$. Пусть $y_1 \in E'_i$, $y_2 \in E'_j$. Имеем $T(x_1, y_1) = 0$, $T(x_2, y_2) = 0$. Вычислим $T(x_1, y_2)$.

Если $T(x_1, y_2) = 0$, то из этого равенства и $T(x_1, y_1) = 0$ вытекает, что $y_1 \sim y_2$, а это невозможно, так как $E'_i \neq E'_j$ (отображение θ взаимно однозначно). Пусть $T(x_1, y_2) = 2$. Тогда из этого равенства и равенства $T(x_2, y_2) = 0$ в силу определения упорядочения на L следует неравенство $E_j < E_i$, что противоречит условию. Следовательно, $T(x_1, y_2) = 1$, и это равенство в сочетании с $T(x_1, y_1) = 0$ показывает, что $E'_i < E'_j$, это и требовалось доказать.

Итак: $\theta: L \rightarrow L'$ есть изоморфизм упорядоченных множеств L и L' .

Построим теперь два сюръективных отображения f_1 и f_2 множества E на упорядоченное множество L : $f_1: x \rightarrow E_i$, где $E_i \ni x$;

$f_2: x \rightarrow \theta^{-1}E_i'$, где $E_i \in x$. Покажем, что $T(x, y) = D(f_1(x), f_2(y))$ (12). Действительно, если $T(x, y) = 0$, то $x \in E_i, y \in E_i'$ (для некоторого i). Значит, $f_1(x) = E_i, f_2(y) = E_i'$ и

$$D(f_1(x), f_2(y)) = D(E_i, E_i') = 0.$$

Пусть $T(x, y) = 1$ и $x \in E_i, y \in E_j'$. Пусть, далее, $T(x_1, y) = 0$. Тогда $x_1 \in E_j$ в силу определения соответствия $E_i \leftrightarrow E_i' = f(x)$.

Из равенств $T(x_1, y) = 0, T(x, y) = 1$ следует, в силу определения упорядочения в L , что $E_j > E_i$. Следовательно,

$$T(x, y) = D(f_1(x), f_2(y)) = D(E_i, E_j) = 1.$$

Пусть, наконец, $T(x, y) = 2$. Пусть $x \in E_i, y \in E_j'$ и $T(x_1, y) = 0$. Тогда $x_1 \in E_j = f_2(y)$. Из равенств $T(x, y) = 2, T(x_1, y) = 0$ вытекает на основании определения упорядоченности в L , что $E_j < E_i$. Значит, $D(f_1(x), f_2(y)) = D(E_i, E_j) = 2$. Итак, нами установлена следующая

Теорема 2. Пусть $T(x, y)$ — функция на множестве $E \times E$, принимающая значения 0, 1, 2. Функция $T(x, y)$ тогда и только тогда представима в виде $T(x, y) = D(f_1(x), f_2(y))$, где f_1 и f_2 — отображения подмножества E на некоторое упорядоченное множество L , когда $T(x, y)$ удовлетворяет условиям 1, 2, 3.

Список литературы: 1. Курош А. Г. Теория групп. — М.: Наука, 1967.—140 с.
2. Понтрягин Л. С. Непрерывные группы. — М.: Наука, 1973.—150 с.

Поступила в редколлегию 17.06.81.

УДК 519.816

Ю. А. БОБРОВСКИЙ, С. П. ГОРЕЛОВ, О. К. ИЛЮНИН, канд. техн. наук

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИЗМЕРЕНИЯМ С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРЯДКОВЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ШКАЛ

Во многих случаях в задачах аппроксимации, контроля, экспертных процедурах оценивания очень важным является сокращение числа измерений. Здесь рассмотрена комбинированная процедура измерений, позволяющая при определенных условиях уменьшить суммарные затраты на измерение в количественных шкалах за счет комплексного применения количественных и порядковых шкал.

Задача может быть сформулирована следующим образом. Заданы: L — множество объектов, которые необходимо измерить; C_r и C_p — стоимости одного измерения в порядковой и количественной шкалах соответственно; Δ — допустимая погрешность при измерении объектов.

Необходимо с минимальными затратами измерить все объекты множества L в количественной шкале, т. е. определить значения функции $f(i)$, $i = \overline{1, L}$.

В работе [1] при решении этой задачи были рассмотрены два подхода. 1. Непосредственное измерение объектов. 2. Двухэтапная процедура измерений, когда на первом этапе все объекты ранжируются, а минимальное (f_{\min}) и максимальное (f_{\max}) значения $f(i)$, $i = \overline{1, L}$ измеряются в количественной шкале. На втором этапе для измерения оставшихся ($L - 2$) объектов применяется метод дихотомии, для которого получены верхняя (ρ_{\max}) и нижняя (ρ_{\min}) оценки числа измерений [2]:

$$\rho_{\max} = \min \left[L - 2; (E \log_2(L + 1) - 1) E \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta} + 3 \right]; \quad (1)$$

$$\rho_{\min} = \min \left[E \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta}; E \log_2(L + 1) \right], \quad (2)$$

где Et — целая часть числа t , т. е. $Et \leq t < Et + 1$.

Руководствуясь принципом гарантированного результата, получено условие предпочтительности двухэтапной процедуры:

$$C_r r_{\max} + C_{\rho} \rho_{\max} < C_p (L - 2). \quad (3)$$

Здесь r_{\max} — верхняя оценка числа парных сравнений при ранжировке L объектов.

Из формул (1) и (2) видно, что для получения оценок ρ_{\max} и ρ_{\min} и условия (3) необходимо знать f_{\max} и f_{\min} , тогда как двухэтапная процедура предполагает полную ранжировку объектов еще до получения этих оценок.

Свободной от этого недостатка является разработанная в данной статье модифицированная двухэтапная процедура измерений, которая заключается в следующем.

На первом этапе с помощью одного из алгоритмов множества X выделяются максимальный (L_{\max}) и минимальный (L_{\min}) объекты, а затем они измеряются. Выбор соответствующего алгоритма $x \in X$ обусловлен следующим выражением:

$$\min_{\substack{x \in X \\ y \in Y}} \max \{ \hat{r}(x) + \bar{r}(y/\xi_x) \}, \quad (4)$$

где X — множество алгоритмов выделения минимального и максимального элементов из множества L ; $\hat{r}(x)$ — число сравнений при выделении L_{\min} и L_{\max} по алгоритму $x \in X$; ξ_x — дополнительная информация, полученная в результате реализации алгоритма $x \in X$; Y — множество алгоритмов полной ранжировки; $\bar{r}(y/\xi_x)$ — число сравнений для полной ранжировки по алгоритму $y \in Y$ при условии, что при выделении L_{\min} и L_{\max} по алгоритму $x \in X$ получена дополнительная информация ξ_x .

Под дополнительной информацией ξ будем понимать множество $\{k^{(x)}, N_i^{(x)}, i = \overline{1, k}\}$, где $k^{(x)}$ — количество групп ранжированных

элементов, полученных в результате реализации алгоритма $x \in X$; $N_i^{(x)}$, $i = \overline{1, k}$ — количество ранжированных элементов в каждой группе.

На втором этапе определяются верхняя и нижняя оценки числа измерений методом дихотомии по формулам (1) и (2).

Третий этап представляет собой выбор способа действий для непосредственного измерения объектов, который можно представить в виде следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Выбор алгоритма $y \in Y$ полной ранжировки, удовлетворяющего условию

$$\min_{\bar{r}} \max_{y \in Y} \bar{r}(y / \{k, N_i, i = \overline{1, k}\}). \quad (5)$$

Здесь $\{k, N_i, i = \overline{1, k}\} = \xi$ — информация, полученная после применения алгоритма $x \in X$ на первом этапе.

Шаг 2. Проверка условия:

$$C_r [\min_{\bar{r}} \max_{y \in Y} \bar{r}(y / \xi)] + C_p \rho_{\max} \leq C_p (L - 2). \quad (6)$$

Если условие (6) выполняется, то необходимо с помощью выбранного по условию (5) алгоритма $y \in Y$ доранжировать все множество $(L - 2)$ объектов, а затем измерить их методом дихотомии.

В противном случае возникают три возможные пути решения задачи.

1. а) Измерение минимального и максимального элементов в каждой из k ранжированных групп.

б) Измерение с помощью метода дихотомии оставшихся $(\sum_{i=1}^k N_i - 2k)$ элементов во всех k группах.

в) Непосредственное измерение элементов, не вошедших ни в одну из k групп.

При этом максимальные затраты равны

$$R_{1\max} = C_p \{L - 2(1 + k) + \sum_{i=1}^k (\rho_{i\max} - N_i)\}, \quad (7)$$

где $\rho_{i\max}$, $i = \overline{1, k}$ — оценка максимального числа измерений в каждой из k групп, вычисленная по формуле (1).

2. Проведение полной ранжировки $(L - 2)$ элементов и их измерение методом дихотомии. Тогда затраты будут определяться следующим выражением:

$$R_{2\max} = C_r [\min_{\bar{r}} \max_{y \in Y} \bar{r}(y / \xi)] + C_p \rho_{\max}. \quad (8)$$

3. а) Измерение минимального и максимального элементов в каждой из k ранжированных групп.

б) Проведение полной ранжировки $(L - 2)$ элементов.

в) Выделение p групп, состоящих из $s > 0$ неизмеренных элементов, расположенных между двумя соседними измеренными элементами. Ниже приводится алгоритм определения числа p и минимального и максимального значений элементов в каждой из p групп.

Исходные данные: на ранжированном множестве элементов L задан массив измеренных значений элементов $ZNACH(L)$ и дополнительный массив $B(L)$, состоящий из 0 и 1: 0 — если соответствующий элемент множества L еще не измерен; 1 — в противном случае.

Шаг 1. (Начальная установка). Положить $p = 0$; $FMAX(L) = 0$; $FMIN(L) = 0$.

Шаг 2. (Цикл по J). Выполнить шаг 3 при $J = 1, 2, \dots, L$.

Шаг 3. (Сравнить $B(J)$, 1). Если $B(J) = 1$, перейти к шагу 4. В противном случае перейти к шагу 7.

Шаг 4. (Сравнить J , 1). Если $J = 1$, перейти к шагу 8. В противном случае перейти к шагу 5.

Шаг 5. (Сравнить $B(J - 1)$, 1). Если $B(J - 1) = 1$, перейти к шагу 8. В противном случае увеличить p на 1, присвоить $FMAX(p) = ZNACH(J)$ и перейти к шагу 8.

Шаг 7. (Сравнить $B(J - 1)$, 1). Если $B(J - 1) = 1$, присвоить $FMIN(p + 1) = ZNACH(J - 1)$.

Шаг 8. (Сравнить J , L). Если $J < L$, увеличить J на 1 и перейти к шагу 3. В противном случае перейти к шагу 9.

Шаг 9. (Печать результата). Вывод на печать содержимого счетчика p и значений массивов $FMIN(p)$ и $FMAX(p)$.

г) Измерение элементов, входящих в каждую из групп методом дихотомии. В этом случае затраты будут равны:

$$R_{3\max} = C_r \left[\min_{\bar{r}} \max_{y \in Y} \bar{r}(y/\xi) \right] + C_p \sum_{j=1}^p \rho_{j\max}, \quad (9)$$

где p определяется по алгоритму, приведенному выше.

Шаг 3. Проверка условий

$$\begin{aligned} R_{1\max} &\leq \min \{R_{2\min}, R_{3\min}\}; \\ R_{2\max} &\leq \min \{R_{1\min}, R_{3\min}\}; \\ R_{3\max} &\leq \min \{R_{1\min}, R_{2\min}\}, \end{aligned} \quad (10)$$

обуславливающих выбор одного из рассмотренных выше способов измерения объектов. В (10) $R_{1\min}$, $R_{2\min}$, $R_{3\min}$ вычисляются по формулам (7) — (9) соответственно, в которых ρ_{\max} заменены на ρ_{\min} , вычисленные по формуле (2), а $\min \max \bar{r}(y/\xi)$ — на $\min \min \bar{r}(y/\xi)$.

Если ни одно из неравенств (10) не выполняется, то для решения задачи выбора метода измерений необходима дополнительная информация о законах распределения случайных величин \bar{r} и ρ , что является темой для дальнейших исследований.

Таким образом, в статье предложена модифицированная двух-этапная процедура измерения объектов, преимущества которой перед рассмотренными в [1] методами заключаются в уменьшении затрат на получение дополнительной информации за счет применения алгоритмов выделения максимального и минимального элементов из всей совокупности L , а не алгоритмов полной ранжировки; возможности гибкого маневрирования в пределах данной задачи по выбору способа действий в зависимости от конкретных условий.

Список литературы: 1. Илюнин О. К., Бобровский Ю. А., Горелов С. П. Анализ эффективности комбинированного метода измерений. — Проблемы бионики, 1981, вып. 27, с. 47—51. 2. Илюнин О. К. Эффективность метода дихотомии при аппроксимации неубывающих функций. — Ин-т радиоэлектроники. Х., 1979 г. (Рукопись деп. в ВИНТИ 26 июля 1979 г., № 2820—79 Деп.).

Поступила в редколлегию 14.12.81.

УДК 510.62

В. В. ШЛЯХОВ, Ю. В. НАТАЛУХА

ОБ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРЕДИКАТОВ, ПОРОЖДЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ СУММАМИ

Рассмотрим предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$, заданный на декартовом произведении $L_2[0, 1] \times L_2[0, 1] \times L_2(0, 1] \times L_2[0, 1]$, т. е. $x_1, x_2, x_3, x_4 \in L_2[0, 1]$. Поставим задачу определить условия, при которых

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4) = D \left(\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt - \int_0^1 x_3(t) K_2(t) dt, \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt - \int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt \right), \quad (1)$$

где D — предикат равенства, заданный на $R \times R$, а $K_1(t), K_2(t) \in L_2[0, 1]$.

Отметим, что при фиксации x_3, x_4 или x_1, x_2 предикат T становится предикатом, заданным на декартовом квадрате $L_2[0, 1]$, и имеет вид

$$T(x, y) = D(f(x) + c, f(y) + d). \quad (2)$$

Здесь f — линейный непрерывный функционал на $L_2[0, 1]$, не равный нулю¹; c, d — константы, в первом случае зависящие от x_3, x_4 , а во втором — от x_1 и x_2 . Назовем предикаты, которые имеют вид (2), линейно-сдвинутыми.

Теорема 1. Для того чтобы $T(x, y)$ был линейно-сдвинутым предикатом, необходимо и достаточно, чтобы он обладал следующими свойствами:

¹ В случае, если $f(x) = 0$, мы приходим к тривиальным предикатам, тождественно равным 1, когда $c = d$, и тождественно равным 0, когда $c \neq d$.

1) для любых $x_1, y_1, x_2, y_2 \in L_2[0, 1]$ из равенств $T(x_1, y_1) = T(x_2, y_1) = T(x_2, y_2) = 1$ следует $T(x_1, y_2) = 1$ (квазитранзитивность);

2) существует функция $e(t) \in L_2[0, 1]$ такая, что для любых $x, y \in L_2[0, 1]$ существуют единственные числа $F_1(x), F_2(y)$, удовлетворяющие условию

$$T(x, F_1(x)e) = T(F_2(y)e, y) = 1, \quad \int_0^1 e^2(t) dt \neq 0;$$

3) $F_1(x)$ и $F_2(y)$ непрерывны в метрике $L_2[0, 1]$;

4) для любого $x \in L_2[0, 1]$ выполняется $T(x, x + Ae) = 1$;

5) для любых $x_1, y_1, x_2, y_2 \in L_2[0, 1]$ из равенств $T(x_1, y_1) = 1, T(x_2, y_2) = 1$ следует $T(x_1 + x_2 + Ae, y_1 + y_2) = T(x_1 + x_2, y_1 + y_2 - Ae) = 1$. Число A в условиях 4, 5 равно

$$A = \frac{F_1(0) - F_2(0)}{2}.$$

Доказательство.

1. *Необходимость.* Пусть $T(x, y)$ — линейно-сдвинутый предикат, т. е.

$$T(x, y) = D(f(x) + c, f(y) + d),$$

где $f(x)$ — линейный непрерывный функционал в $L_2[0, 1]$, не равный нулю. Таким образом, $f(x) = \int_0^1 x(t)e(t) dt$ и $\int_0^1 e^2(t) dt \neq 0$.

Докажем, что из подобного вида предиката вытекают свойства 1—5. Первое свойство выясняется простой проверкой. Теперь для любых $x, y \in L_2[0, 1]$ в качестве $F_1(x)$ и $F_2(y)$ возьмем

$$F_1(x) = \frac{f(x) + c - d}{\int_0^1 e^2(t) dt}, \quad \text{а } F_2(y) = \frac{f(y) - c + d}{\int_0^1 e^2(t) dt}.$$

Тогда

$$f(F_1(x)e) + d = \int_0^1 \frac{f(x) - d + c}{\int_0^1 e^2(t) dt} e^2(t) dt + d = f(x) + c,$$

т. е. $T(x, F_1(x)e) = 1$, аналогично $f(F_2(y)e) + c = f(y) + d$ и $T(F_2(y)e, y) = 1$. Ясно, что эти числа единственны, поскольку они однозначно находятся из уравнений $f(F_1(x)e) + d = f(x) + c$ и $f(F_2(y)e) + c = f(y) + d$. Отметим, что $F_1(x), F_2(y)$ — непрерывны в метрике $L_2[0, 1]$ и

$$A = \frac{F_1(0) - F_2(0)}{2} = \frac{c - d}{\int_0^1 e^2(t) dt}.$$

Тогда

$$f(x) + c = \int_0^1 \left(x(t) + \frac{(c-d)e(t)}{\int_0^1 e^2(t) dt} \right) e(t) dt + d = f(x + Ae) + d.$$

Значит, при любом $x \in L_2[0, 1]: T(x, x + Ae) = 1$. Теперь допустим $T(x_1, y_1) = 1$ и $T(x_2, y_2) = 1$. В этом случае $f(x_1) + c = f(y_1) + d$, $f(x_2) + c = f(y_2) + d$. Если сложить эти равенства и учесть, что f — линейный функционал, то получим

$$f(x_1 + x_2) + 2c = f(y_1 + y_2) + 2d$$

или

$$\int_0^1 (x_1(t) + x_2(t)) e(t) dt + 2c = \int_0^1 (y_1(t) + y_2(t)) e(t) dt + 2d;$$

$$\int_0^1 (x_1(t) + x_2(t)) e(t) dt + 2c - d = \int_0^1 (y_1(t) + y_2(t)) e(t) dt + d.$$

Но

$$\begin{aligned} \int_0^1 (x_1(t) + x_2(t)) e(t) dt + 2c - d &= \left(\int_0^1 (x_1(t) + x_2(t)) e(t) \times \right. \\ &\times dt + c \left. \right) + \int_0^1 \frac{(c-d)e^2(t) dt}{\int_0^1 e^2(t) dt} = \int_0^1 (x_1(t) + x_2(t) + \\ &+ Ae(t)) e(t) dt + c = \int_0^1 (y_1(t) + y_2(t)) e(t) dt + d. \end{aligned}$$

Значит, $T(x_1 + x_2 + Ae, y_1 + y_2) = 1$. Аналогично доказывается вторая часть свойства 5. Таким образом, необходимость доказана.

2. Достаточность.

Пусть x и x' — произвольные функции из $L_2[0, 1]$. Тогда из 2 следует $T(x, F_1(x)e) = 1$ и $T(x', F_1(x')e) = 1$. С другой стороны, из 5 вытекает, что

$$T(x + x', F_1(x)e + F_1(x')e - Ae) = 1$$

или

$$T(x + x', (F_1(x) + F_1(x') - A)e) = 1.$$

Поскольку по условию 2 коэффициент при векторе $e(t) \in L_2[0, 1]$ находится единственным образом, то получаем, что для любых x и x'

$$F_1(x + x') = F_1(x) + F_1(x') - A. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь функцию $f_1(x) = F_1(x) - A$. Тогда из (3) вытекает

$$f_1(x) + f_1(x') = F_1(x) + F_1(x') - 2A = F_1(x + x') - A = f(x + x'). \quad (4)$$

Теперь заметим, что по условию $F_1(x)$ — непрерывная функция в $L_2[0, 1]$, значит, непрерывна и $f_1(x)$. Но из (4) следует, что $f_1(x)$ еще и аддитивна. Значит, по теореме Рисса об общем виде функционала в гильбертовом пространстве можно заключить, что

$$f_1(x) = \int_0^1 x(t) K(t) dt,$$

где $K(t)$ — ядро линейного функционала $f_1(x)$.

Точно так же, используя второе равенство из свойства 5, можно показать, что $f_2(x) = F_2(x) + A$ тоже линейный непрерывный функционал в $L_2[0, 1]$. Таким образом,

$$F_1(x) = f_1(x) + A, \quad F_2(x) = f_2(x) - A. \quad (5)$$

Далее, из условия 4 вытекает: $T(e, e + Ae) = 1$ и $T(e - Ae, e - Ae + Ae) = 1$, тогда $F_1(e) = f_1(e) + A = 1 + A$ и $F_2(e) = f_2(e) - A = 1 - A$. Следовательно, $f_1(e) = f_2(e) = 1$ (6). С другой стороны, для любого x : $T(x, x + Ae) = 1$, $T(x, F_1(x)e) = 1$, $T(F_2(x + Ae)e, x + Ae) = 1$. Учитывая, что $T(x, y)$ — квазитранзитивный предикат, получаем

$$T(F_2(x + Ae)e, F_1(x)e) = 1.$$

Но $T(-F_1(x)e - Ae, -F_1(x)e - Ae + Ae) = 1$ по условию 4 или $T(-F_1(x)e - Ae, -F_1(x)e) = 1$. Теперь, используя условие 5, имеем $T(F_2(x + Ae)e - F_1(x)e, 0) = 1$. Значит, $F_2(x + Ae) - F_1(x) = F_2(0) = -A$. Отсюда

$$\begin{aligned} f_2(x + Ae) - A - f_1(x) - A &= -A \\ \text{или } f_2(x) + Af_2(e) - A - f_1(x) &= 0. \end{aligned}$$

Учитывая (6), получаем

$$f_1(x) = f_2(x) = f(x). \quad (7)$$

В итоге

$$F_1(x) = f(x) + A, \quad F_2(x) = f(x) - A,$$

где $f(x) = \int_0^1 x(t) K(t) dt$.

Рассмотрим теперь такие x и $y \in L_2[0, 1]$, для которых $T(x, y) = 1$. Тогда $T(F_2(y)e, y) = 1$ и $T(F_2(y)e, F_1(F_2(y)e)e) = 1$, а из 1 имеем $T(x, F_1(F_2(y)e)e) = 1$. Следовательно,

$$\begin{aligned} F_1(x) = F_1(F_2(y)e), \quad f(x) + A = F_2(y)f(e) + \\ + A = f(y) - A + A = f(y) \end{aligned}$$

и, если учесть, что

$$A = \frac{F_1(0) - F_2(0)}{2},$$

то получим

$$f(x) + \frac{F_1(0)}{2} = f(y) + \frac{F_2(0)}{2}.$$

Заметим, что всю последовательность равенств можно записать наоборот, т. е. все рассуждения провести в обратную сторону. Окончательно получаем, что $T(x, y) = 1$ тогда и только тогда когда $f(x) + \frac{F_1(0)}{2} = f(y) + \frac{F_2(0)}{2}$, а это и означает, что предикат $T(x, y)$ — линейно-сдвинутый:

$$T(x, y) = D\left(f(x) + \frac{F_1(0)}{2}, f(y) + \frac{F_2(0)}{2}\right).$$

Таким образом, достаточность доказана. Значит, окончательно предикат, удовлетворяющий условиям теоремы, имеет вид

$$T(x, y) = D\left(\int_0^1 x(t) K(t) dt + \frac{F_1(0)}{2}, \int_0^1 y(t) K(t) dt + \frac{F_2(0)}{2}\right),$$

где D — предикат равенства на $R \times R$.

Теорема доказана.

Лемма. Если предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$, заданный на декартовом произведении $L_2[0, 1] \times L_2[0, 1] \times L_2[0, 1] \times L_2[0, 1]$ при фиксированных x_1, x_2 — линейно-сдвинутый и при фиксированных x_3, x_4 — линейно-сдвинутый, тогда существует предикат $F(a_1, a_2, a_3, a_4)$, заданный на $R \times R \times R \times R$ (R — поле действительных чисел), такой, что

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4) = F\left(\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt, \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt, \int_0^1 x_3(t) K_2(t) dt, \int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt\right),$$

где $K_1(t)$ и $K_2(t)$ принадлежат $L_2[0, 1]$.

Доказательство. Введем понятие эквивалентности между элементами $L_2[0, 1]$ I, II, III и IV типов.

Определение. x_1 и $x_1' \in L_2[0, 1]$ эквивалентны по I типу (обозначается $x_1 \sim x_1'$), если

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4) \equiv T(x_1', x_2, x_3, x_4)$$

для любого набора x_2, x_3, x_4 .

Совершенно очевидно, что это отношение эквивалентности

Аналогично введем $x_2 \sim x_2'$, $x_3 \sim x_3'$ и $x_4 \sim x_4'$. Теперь ясно, что лемма фактически утверждает следующее: если предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$ обладает указанными свойствами, тогда:

1) $x_1 \sim x_1'$ тогда и только тогда, когда

$$\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt = \int_0^1 x_1'(t) K_1(t) dt;$$

2) $x_2 \overset{II}{\sim} x_2$ тогда и только тогда, когда

$$\int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt = \int_0^1 x_2'(t) K_1(t) dt;$$

3) $x_3 \overset{III}{\sim} x_3$ тогда и только тогда, когда

$$\int_0^1 x_3(t) K_2(t) dt = \int_0^1 x_3'(t) K_2(t) dt;$$

4) $x_4 \overset{IV}{\sim} x_4$ тогда и только тогда, когда

$$\int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt = \int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt.$$

Докажем это. Поскольку предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при фиксированных x_1, x_2 — линейно-сдвинутый и при фиксированных x_3, x_4 — линейно-сдвинутый, тогда

$$T_{x_3, x_4}(x_1, x_2) = D(f_1(x_1) + c_1, f_1(x_2) + d_1); \quad (*)$$

$$T_{x_1, x_2}(x_3, x_4) = D(f_2(x_3) + c_2, f_2(x_4) + d_2), \quad (**)$$

где через $T_{x_3, x_4}(x_1, x_2)$ и $T_{x_1, x_2}(x_3, x_4)$ обозначены предикаты, получающиеся из $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при фиксации x_3, x_4 и x_1, x_2 соответственно; f_1 — линейный непрерывный функционал в $L_2[0, 1]$ с ядром $K_1(t)$; f_2 — линейный непрерывный функционал в $L_2[0, 1]$ с ядром $K_2(t)$.

Предположим теперь $x_1 \overset{I}{\sim} x_1$. Это означает, что для любого набора x_2, x_3, x_4 $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = T(x_1', x_2, x_3, x_4)$. Возьмем такой набор, для которого $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$ (это можно сделать), тогда

$$T_{x_3, x_4}(x_1, x_2) = T_{x_3, x_4}(x_1', x_2) = 1.$$

Следовательно, из (*) вытекает, что

$$f_1(x_1) + c_1 = f_1(x_2) + d_1, \quad f_1(x_1') + c_1 = f_1(x_2) + d_1,$$

т. е. $f_1(x_1) = f_1(x_1')$, но это и означает, что

$$\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt = \int_0^1 x_1'(t) K_1(t) dt.$$

Теперь наоборот. Пусть выполняется последнее равенство и для какого-то набора x_2, x_3, x_4 : $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$. Тогда $T_{x_3, x_4}(x_1, x_2) = 1$, т. е. $f_1(x_1) + c_1 = f_1(x_2) + d_1$. Но $f_1(x_1) = f_1(x_1')$, следовательно, $f_1(x_1') + c_1 = f_1(x_2) + d_1$ или $T_{x_3, x_4}(x_1', x_2) = 1$ и $T(x_1', x_2, x_3, x_4) = 1$. А это и будет означать, что $x_1 \overset{I}{\sim} x_1$. Значит, первое свойство доказано. Аналогично доказываются и остальные. Лемма доказана.

Теорема 2. Предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$ представим в виде (тогда и только тогда, когда при фиксации x_1, x_2 и x_3, x_4 обладает свойствами 1—6 (из теоремы 1) и удовлетворяет следующим условиям:

A) из равенства $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$ следует $T(x_1 + x, x_2 + x_3 + x, x_4 + y) = 1$ при любых постоянных на отрезке $[0, 1]$ функциях $x(t)$ и $y(t)$;

B) из равенств $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$ и $T(x'_1, x'_2, x'_3, x'_4) = 1$ следует $T(x_1, x'_1, x_3, x'_3) = 1$;

C) из равенства $T(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$ следует $T(x_2, x_1, x_3) = 1$;

D) $T(x_1, x_1, x_2, r) = 1$.

Доказательство. Достаточность. Так как предикат $T(x_1, x_2, x_3, x_4)$ при фиксации x_1, x_2 и x_3, x_4 обладает свойствами 1—6, то из леммы следует, что существует предикат $F(a_1, a_2, a_3, a_4)$, заданный на $R \times R \times R \times R$, такой, что

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4) = F\left(\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt, \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt, \int_0^1 x_3(t) K_2(t) dt, \int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt\right).$$

Из свойства A следует, что для любых констант x и y

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4) = F(a_1, a_2, a_3, a_4) = 1$$

вытекает

$$\begin{aligned} T(x_1 + x, x_2 + y, x_3 + x, x_4 + y) &= \\ &= F(a_1 + x, a_2 + y, a_3 + x, a_4 + y) = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, получается, что если $F(a_1, a_2, a_3, a_4) = 1$ то $F(a_1 - a_2, a_3 - a_4, 0, 0) = 1$, и наоборот. Значит, существует предикат $F'(x, y) = F(x, y, 0, 0)$, причем из свойств B—D следует, что $F'(x, y)$ рефлексивный, симметричный, транзитивный

Докажем теперь, что если $F'(x, y_1) = F'(x, y_2) = 1$, то $y_1 = y_2$. Предположим, что это не так и $y_1 \neq y_2$, тогда

$$F(x, y_1, 0, 0) = F(x, y_2, 0, 0) = 1$$

$$\text{и } T(x_1, x_2, x_3, x_4) = T(x_1, x'_2, x_3, x_4) = 1,$$

где

$$\begin{aligned} \int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt &= x; \quad \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt = y_1; \quad \int_0^1 x'_2(t) K_1(t) dt = y_2; \\ \int_0^1 x_3(t) K_2(t) dt &= \int_0^1 x_4(t) K_2(t) dt = 0. \end{aligned}$$

Считаем, что x_3, x_4 — фиксированы, тогда

$$T_{x_3, x_4}(x_1, x_2) = D\left(\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt + c, \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt + d\right) = 1;$$

$$T_{x_1, x_2}(x_1, x_2) = D \left(\int_0^1 x_1(t) K_1(t) dt + c, \int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt + d \right) = 1.$$

Отсюда

$$\int_0^1 x_2(t) K_1(t) dt = \int_0^1 x_2'(t) K_1(t) K_1(t) dt.$$

Но первый интеграл равен y_1 , а второй — y_2 , т. е. $y_1 = y_2$. Противоречие.

В итоге получаем, что предикат $F'(x, y) = D(x, y)$ — предикат равенства. Отсюда следует утверждение теоремы. Необходимость проверяется очевидно. Теорема доказана.

Список литературы: 1. Рисс Ф., Секефальви-Надь Б. Лекция по функциональному анализу.— М.: Мир, 1979.—587 с. Мальцев А. И. Алгебраические системы.— М.: Наука, 1970.—392 с. 3. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику.— М.: Наука, 1979.—272 с.

Поступила в редколлегию 31.10.81.

УДК 510.62

Р. М. ГРАНОВСКАЯ, И. Я. БЕРЕЗНАЯ

ЦЕЛОСТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФОРМЫ В ВИДЕ СКЕЛЕТА

Введение. Использование менее сложных изображений существенно облегчает решение задач опознавания (распознавания) и классификации как для человека, так и для ЭВМ. Поэтому во многих ситуациях применяют предварительную обработку изображений объектов для их упрощения (в дальнейшем слова «изображение объекта» и «объект» считаются синонимами). Упрощение целесообразно производить таким образом, чтобы сохранить в изображении признаки и свойства объекта, существенные для его распознавания и взаимодействия с ним. Один из способов упрощения состоит в повышении степени регулярности контура изображения, приближения его к симметричному или периодическому, другой — в сглаживании, уменьшении числа различных элементов и их разнообразия. Известно, что превращение фигуры в собственную схему или скелет также выполняет эту задачу. При формировании скелетного представления (скелета) объекта последний непрерывно утоньшается и видоизменяется ($a, b, в$) вплоть до сохранения только элементов, составляющих его «каркас» (схему — $г$) (рис. 1).

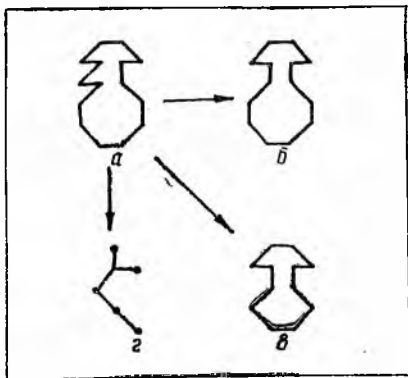


Рис. 1

В работе [1] приведены данные, позволяющие говорить о высокой степени распространенности схематического рисунка у детей. Так, 6-летние дети используют схему в 98 % своих рисунков, 7-летние — в 90 % и только с 11-летнего возраста более подробный способ изображения встречается чаще,

чем схема. Автор считает, что, рисуя, дети не столько стараются воспроизвести конкретный образ точно, сколько передать лишь общую идею предмета. Поэтому ребенок довольствуется только схемой, не обременяя ее тем, что с его точки зрения несущественно.

Исследуя рисунки детей, другие авторы, например А. Р. Лурия [1], отмечают, что ребенок, которому дана задача нарисовать предмет, трудящийся поддающийся изображению, в одном случае изображает вместо данного предмета другой, находящийся с первым в какой-либо связи, в другом случае ребенок просто рисует вместо трудно изображаемого предмета какой-нибудь условный значок. И тот и другой пути ведут от пиктографического письма к символическому, при этом первый оперирует теми же самыми средствами картинного изображения, а второй привлекает иные, качественно новые приемы. В опытах с умственно отсталыми детьми чаще наблюдается развитие обходных навыков первого типа, школа и школьное обучение дают богатые возможности для переходов второго типа.

Две возможные тенденции характерны для пиктографического письма ребенка, стоящего на достаточно высокой ступени развития: записываемый им предмет заменяется либо частью, либо схемой. И то и другое — преодоление тенденции изобразить предмет полностью, во всех его деталях, и то и другое укрепляет психологические навыки, на почве которых позднее развивается символическое письмо. Таким образом, можно допустить, что использование схемы вместо полного рисунка происходит в онтогенезе дважды как исходный процесс при изображении предметов детьми и вторично — определенном этапе овладения письмом.

Скелетное представление объектов успешно используется и при решении ряда проблем искусственного интеллекта [3-5]. Интересно привлечение скелета при распознавании видов хромосомных болезней, для этой цели проводилось предварительное преобразование исходных изображений хромосом. Скелет был эффективно использован также в качестве одного из описаний для распознавания букв. В этом случае скелет применили в качестве предварительной обработки их расплывчатых изображений [4]. Представление объекта его скелетом помогло и в объяснении механизма некоторых зрительных иллюзий, возникающих при восприятии предметов [6].

Постановка задачи. Скелет — целостное представление объекта, характеризующее все его точки одновременно. Оно обобщенное и упрощенное, при его построении происходит закругление, сглаживание локальных особенностей конфигурации исходной фигуры. Информативность скелета определяется тем, что он сохраняет ряд таких значимых свойств исходного изображения, как связность, ориентацию главной оси, симметрию. Скелет дает возможность восстановить пространственные соотношения частей объекта, не сохраняя их локальные свойства.

Для определения скелета в общем случае каждая точка плоского объекта представляется как центр наибольшего круга, который целиком содержится в этом объекте. Для точек контура радиусы таких кругов равны нулю. Скелетом объекта называется геометрическое место центров наибольших кругов, т. е. таких, которые не содержатся в других кругах. Эти центры вместе с радиусами соответствующих кругов определяют медиальную ось объекта.

В этом случае, когда фигуры построены на квадратной сетке или представлены в виде цифровых картин, при построении скелета вместо кругов используются квадраты [5]. (Далее рассматривается только дискретный случай).

Выделение скелетов связано с применением процедуры утоньшения объекта. Если обратиться к точному определению, то точки скелета с радиусами k — это как раз не точки, которые одержатся в объекте, полученном при утоньшении исходного объекта в k раз. Однократное утоньшение фигуры определяется как результат вычеркивания из нее всех точек, соседних с точками фона, k -кратное утоньшение — результат повторения этого процесса k раз ($k = 1, 2, \dots$). Если объект задан скелетом, он может быть восстановлен с некоторой погрешностью повторением процедуры расширения каждой точки скелета столько раз,

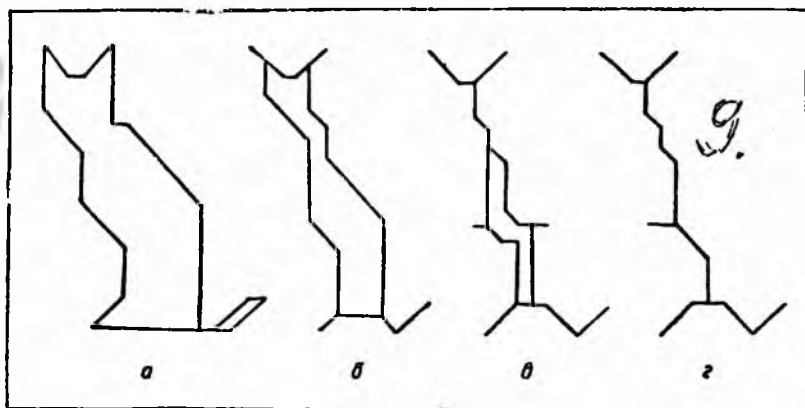


Рис. 2

каков радиус соответствующего максимального круга. Если у объекта нет дыр, его скелет имеет форму дерева, т. е. не содержит замкнутых циклов. Если в общем случае фигура — двумерное множество, то скелет является в некотором смысле его одномерным представлением (рис. 2: a — исходное изображение; b , v — соответственно 1- и 2-кратное утоньшение его; g — его скелет).

Результаты. Построение скелета фигуры — существенно последовательная процедура. При использовании одного из возможных алгоритмов выделения скелета плоских фигур, построенных на квадратной решетке, фигуры представляются матрицами с элементами a_{ij} , где a_{ij} равно единице в случае, если узел решетки с координатами (i, j) принадлежит изображению, и нулю — в противном случае. Если изображение замкнутое, то матрица конечная. Если p — точка фигуры S и соседними с ней являются точки

$aba,$

$dpe,$

$fgh,$

то p является граничной верхней точкой, если $b = 0$; граничной правой, если $e = 0$; левой, если $d = 0$, и нижней, если $g = 0$. Точки b, d, e, g называются 4-окрестностью точки p и вместе с точками a, c, f, h называются 8-окрестностью точки p . Фигура S называется 4-связной, если для любых ее точек p и q существует последовательность точек $p = p_0, p_1, \dots, p_n = q$, принадлежащая S , такая, что p_i принадлежит 4-окрестности точки p_{i+1} , $1 \leq i \leq n$; 8-связность определяется аналогично при использовании 8-окрестности вместо 4-окрестности. Точка p называется 4-изолированной, если ее 4-окрестность не пересекается с S (аналогично 8-изолированной), т. е. если $a, b, \dots, h = 0$. Точка p называется 4-концевой, если в ее окрестности есть только один нулевой элемент (аналогично 8-концевой). Граничная точка называется 4-простой, если ее 4-окрестность и множество, состоящее из 4-окрестности и точки p , имеют одинаковую связность, т. е. они одновременно либо связные, либо несвязные (аналогично 8-простой).

Использованный нами алгоритм выделения скелета для односвязных объектов [7] состоит в пошаговом стягивании точек фигуры в ветвящуюся линию при закономерном отбрасывании точек, обладающих определенными свойствами. При таком построении все точки исходной фигуры просматриваются с помощью квадратного окна 3×3 элементов с центром в рассматриваемой точке фигуры (8-окрестность). Очередная точка фигуры отбрасывается, если она граничная, простая, неизолированная и неконцевая. Окно начинает движение в одном из четырех направлений: вдоль верхнего, нижнего, левого или правого края и после одновременного отбрасывания соответствующих граничных точек на этом краю переходит на следующее направление. Выбор порядка сканирования вдоль указанных направлений произвольный, а определяется рядом глобальных свойств фигуры, которые должны сохраниться инвариантными при построении ее скелета.

С использованием введенных выше понятий были реализованы два варианта алгоритмов выделения скелетов, основывающихся соответственно на определениях связности в 8- и 4-окрестностях. При каждом варианте алгоритма происходит неоднократное одновременное отбрасывание всех точек фигуры, которые удовлетворяют указанным условиям до тех пор, пока никакие дальнейшие отбрасывания невозможны, т. е. алгоритм содержит ряд параллельных процедур.

На рис. 3 показаны примеры тестовых фигур (вверху) и их скелеты (внизу), полученные с помощью ЭВМ. Этот класс фигур был разработан нами для проведения и количественного описания экспериментальных исследований решения человеком таких задач, как опознание, классификация, ранжирование [7—11]. Каждая фигура данного класса — замкнутый многоугольник без самопересечений контура, его вершины расположены в узлах

квадратной решетки, сторона имеет длину 1 или $\sqrt{2}$ (сторона или диагональ элементарного квадрата решетки), смежные стороны образуют углы 45, 90, 135°.

В основу синтезированной нами программы машинной реализации построения скелета положен принцип, приведенный в работе [4]. Однако для повышения эффективности использования скелетов в конкретных задачах опознавания мы разработали

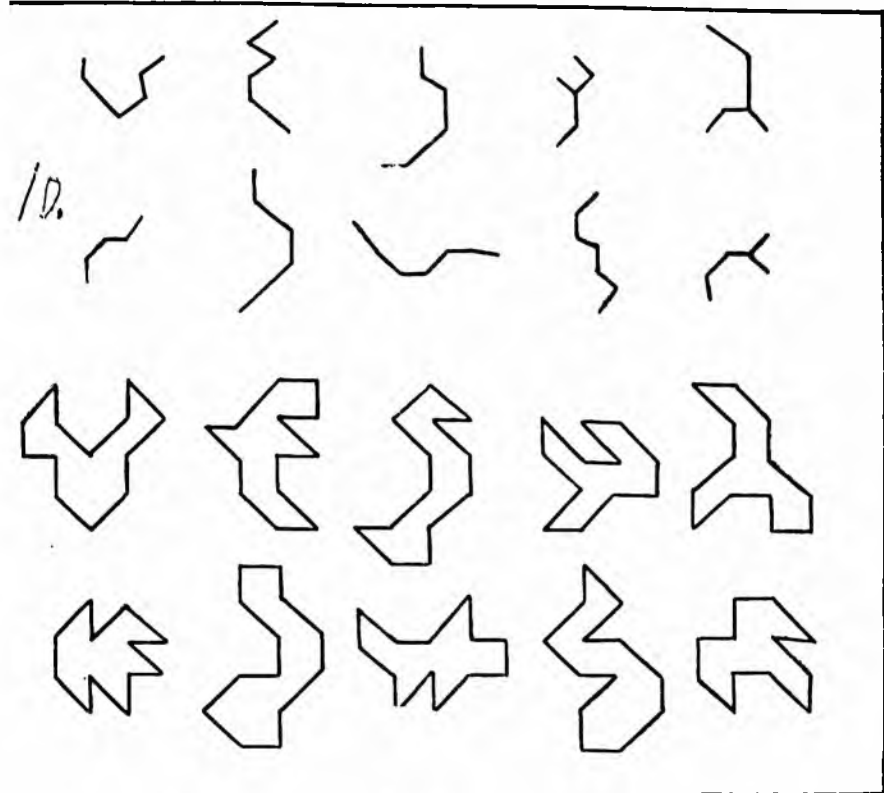


Рис. 3

оригинальный алгоритм. Так, в исходном алгоритме Розенфельда последовательность обхода сторон изображения была одинаковой для всех фигур, независимо от того, симметричны они или нет. Это приводило к тому, что при выделении скелета терялись некоторые значимые свойства формы исходного объекта. Например, скелет, построенный для симметричной фигуры, мог не обладать симметрией и, наоборот, симметрия скелета могла не соответствовать симметрии исходной фигуры или ориентации ее главной оси. Потеря информации указанного типа существенно

затрудняет решение задач распознавания при использовании вместо исходного изображения его скелетного представления.

Чтобы устранить упомянутые недостатки, мы ввели в алгоритм процедуру анализа формы исходного объекта для того, чтобы последовательность отбрасывания граничных точек зависела от вида симметрии (зеркальной или центральной) и от положения оси зеркальной симметрии. Поэтому, если фигура обладала зеркальной симметрией с вертикальной осью, то процедура отбрасывания применялась сначала для правых и левых граничных точек, а затем — для верхних и нижних. Если фигура обладала центральной симметрией, то граничные точки отбрасывались при их сканировании по часовой стрелке либо против. Для несимметричной фигуры последовательность отбрасывания точек зависела от положения главной оси фигуры так же, как для симметричных — от положения оси симметрии. Таким образом, удалось сохранить в скелете направление главной оси.

Получаемый в результате реализации алгоритма утоньшения фигуры ее скелет представляет собой ветвящуюся линию, точкам которой могут быть приписаны веса — значения расстояния от данной точки до ближайшей точки контура фигуры. Поскольку каждая ветвь скелета соответствует выпуклости контура фигуры, то чем больше радиус кривизны данного выпуклого участка, тем меньше изменение веса по длине соответствующей ветви скелета. Отбрасывая ветви с меньшим изменением весов, можно формировать все более простое по конфигурации и более обобщенное скелетное представление объекта. Эту процедуру целесообразно использовать для получения скелета при распознавании объекта со случайными локальными искажениями контура.

Мы экспериментально проверили гипотезу, могут ли испытываемые использовать при распознавании в ряде ситуаций в качестве информативного замещения объектов их скелеты. Для этой цели мы использовали количественную оценку сложности восприятия формы для человека, названную алгоритмической [9] и основанную на относительной сложности по Колмогорову конечных математических объектов. При этом сложность фигуры определялась как длина минимального ее описания относительно выбранной системы команд, позволяющего однозначно декодировать эту фигуру. Было показано, что предложенный способ вычисления алгоритмической сложности формы адекватен субъективной оценке сложности фигур испытываемыми [7]. Вычисленные коэффициенты корреляции (рангов Спирмена) для значений алгоритмической сложности исходных фигур и их скелетов в ряде тестовых наборов показало, что существует прямая корреляционная связь между этими оценками (коэффициент корреляции рангов Спирмена равен в среднем для набора 0,7 при критическом значении 0,4). Мы не утверждаем, что испытываемые реально использовали скелетное представление фигур при решении задачи ранжирования их по сложности в наших экспери-

ментах, но можем утверждать, что его использование позволяет решить эту задачу. Поскольку человек обычно не осознает, на основе каких признаков он решает зрительную задачу (а в наших опытах это неоднократно проверялось), то описанный подход позволяет, по крайней мере, построить один из возможных алгоритмов решения задачи ранжирования фигур на ЭВМ.

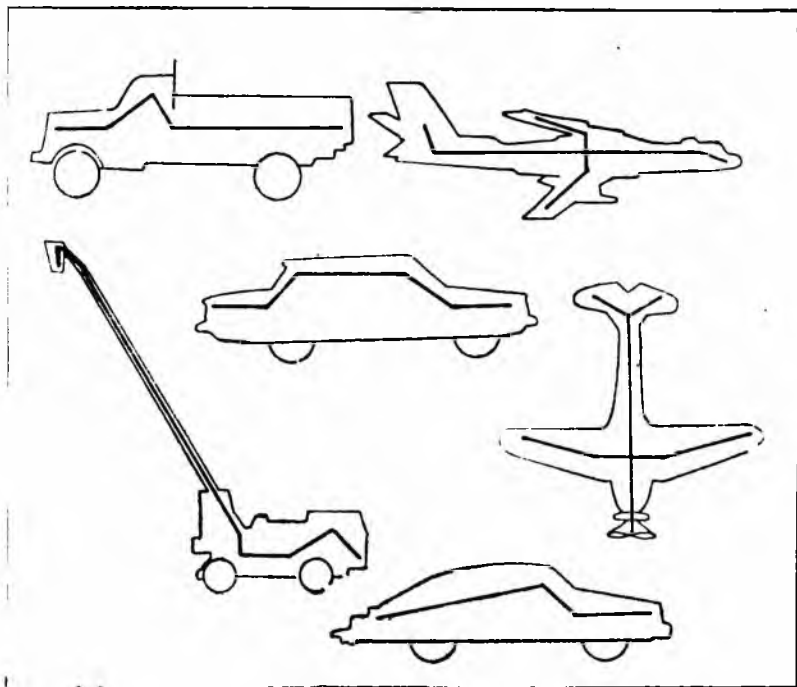


Рис. 4

Являясь обобщенным представлением объекта, скелет сохраняет ряд свойств класса изображений, куда входит исходный объект, что и позволяет использовать скелеты для опознавания в целях отнесения объектов к заданным классам. Это наглядно иллюстрируют скелеты (жирная линия) изображений нескольких типов транспортных средств, показанных на рис. 4, который отчетливо демонстрирует, что скелеты изображений различных представителей одного и того же вида транспорта (например, грузовых автомобилей) имеют общие черты, отличающие их от представлений другого вида (например, легковых автомобилей). Продуктивность представления фигуры с помощью скелета становится более очевидной при описании трехмерных сцен, в частности, при опознании движущихся объектов. В случае

движения объекта форма его изображения на сетчатке может настолько измениться, что возникает вопрос, является ли измененное изображение одной из трансформаций объекта или это другой объект? Связность скелета и некоторые другие свойства скелета как графа при движении исходного объекта в трехмерном пространстве будут меняться в меньшей степени, чем другие

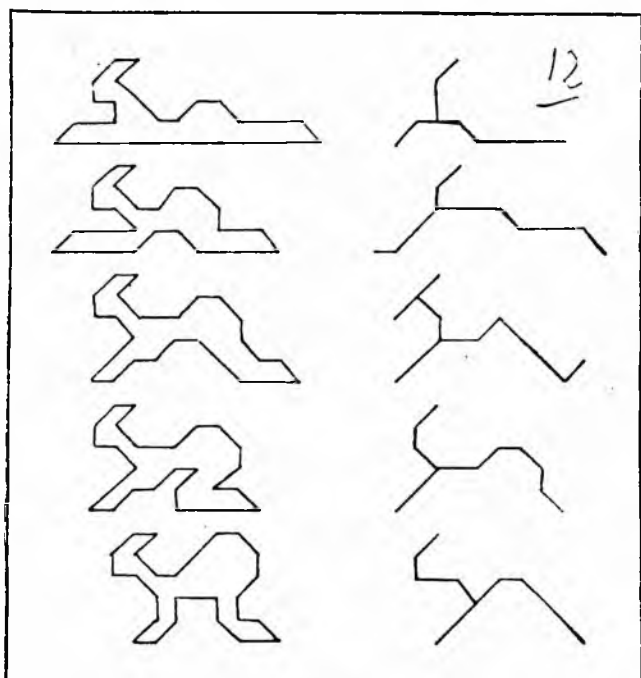


Рис. 5

признаки формы изображения. Распознавание предшествующего и последующего положений исходного объекта (представленных скелетами — справа) при его движении (слева) можно свести к установлению изоморфизма графов (рис. 5).

Полезно было бы использовать в этом случае подход, аналогичный интересному конструктивному подходу к решению задач по опознанию движущихся изображений, который был разработан В. С. Файном [12]. Он показал, что с помощью непрерывно-групповой методики вместо записи и хранения информации о всех точках последовательных подвижных изображений объекта можно записать один раз все точки объекта в форме эталонного изображения и хранить в памяти кроме эталона группу преобразований, с помощью которой можно получить из эталонного все остальные положения этого объекта. Распознавание движущегося объекта сводится в этом случае к установ-

лению его тождественности с одним из генерируемых преобразований эталонного изображения.

При использовании скелетных представлений задача опознания подвижного объекта может быть сформулирована так: выделен скелет эталонного объекта (граф), находящегося в определенном положении, и описана группа преобразований этого графа без потери его связности. Тогда, если из предъявленного для опознания объекта может быть выделен скелет, который принадлежит множеству преобразованных скелетов эталонного объекта (т. е. граф изоморфен эталонному), это может быть эталонный объект, но в другом положении, если нет, это другой объект.

Выводы. Установлено, что очень высока помехоустойчивость скелета. Он нарушается, только если удаляются (или добавляются) граничные точки или изменяется «простота» точек исходного изображения. По данному скелету можно восстановить класс исходных объектов. Все представители этого класса, содержащего сам скелет, содержатся в наиболее «толстом» из исходных объектов с данным скелетом. Этот самый толстый объект получается последовательным добавлением к скелету точек во всех направлениях их 8- или 4-окрестностей. Такое расширение производится столько раз, сколько раз было произведено утоншение (сжатие) исходного изображения при формировании его скелета.

Ранее нами [7, 10, 13] была описана разработанная и экспериментально опробованная иерархическая система признаков формы, которая может быть соотнесена с развитием у человека признаков разного уровня обобщения — от исходно локальных к сформированным глобальным и позиционным — при обучении. Обобщенные признаки более высокого уровня синтезируются в этой системе из менее обобщенных с помощью логических и арифметических операций сравнения с порогом суммирования, которые могут выполняться мысленно, в памяти.

В отличие от указанных признаков, скелетное представление зрительного объекта является исходно обобщенным его описанием и не только характеризует объект одномоментно, целостно, но и выявляет его структурные свойства и пространственные взаимоотношения всех его частей. Целостные представления типа скелета содержат в себе разнообразную информацию о числе и длительности мысленных пространственных действий с объектом, к которым можно отнести аффинные преобразования. Именно указанные свойства скелета и определяют его эффективность в задачах зрительного распознавания.

Список литературы: 1. Смирнов А. А. Детские рисунки. — Хрестоматия по возрастной и пед. психологии, 1980, вып. 12, с. 31—37. 2. Лурия А. Р. Материалы к генезису письма у ребенка. — Хрестоматия по возрастной и пед. психологии, 1980, вып. 12, с. 9—14. 3. Goetcherian V. From binary to grey tone image processing, using fuzzy logic concep concepts. — Pattern Recognition, 1980, 12, № 1, p. 21—27. 4. Rosenfeld A., Davis L. S. A note on thinning. TR — 381, University of Maryland, 1975, p. 19—24. 5. Rosenfeld A., Weszka J. S. Picture recognition. — Communication and cybernetics, 1976, 10, p. 36—43. 6. Deutch E. S. Conjectures on the perception of elongation. — In: Advanced Papers of the 2-nd Intern. Joint Confer. on Artificial Intelligence, London, 1971, p. 43—49. 7. Грановская Р. М., Березная И. Я., Григорьева А. Н. Восприятие и признаки формы. — М.: Наука, 1981. — 88 с. 8. Особенности различения формы фигур у здоровых и больных с локальными поражениями мозга/ И. Я. Березная, Р. М. Грановская, Я. А. Меерсон, И. Ф. Сидоренко. — Физиология человека, 1979, 5, № 6, с. 23—29. 9. Березная И. Я., Григорьева А. Н. Сложность формы и ее количественная оценка. — Квадратурные и кубатурные формулы (Методы вычислений), 1980, вып. 12, с. 31—36. 10. Грановская Р. М.,

Бережная И. Я. Запоминание и узнавание фигур. — Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. — 120 с. 11. Granovskaya R. M., Bereznaya I. J. Experiments on human pattern recognition: a hierarchical sign-system approach. — Pattern Recognition, 1980, 12. N1, p. 27—34. 12 Файн В. С. Опознавание изображений. — М.: Наука, 1970. — 100 с. 13. Грановская Р. М. Восприятие и модели памяти. — М.: Наука, 1974. — 160 с.

Поступила в редколлегию 04.04.81.

УДК 510.62

В. И. РУБЛИНЕЦКИЙ, С. Ф. КОРЯК

УПОТРЕБЛЕНИЕ ФОНЕТИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ ПРЕДЛОГОВ

В русском языке имеются «парные» предлоги, такие, например, как *в/во*: *в понедельник*, *во вторник*. Для краткости речи будем называть предлоги типа *в* краткими, а типа *во* — долгими. В машинных системах, предназначенных для анализа и синтеза языка, при решении первой задачи различие между краткими и долгими предлогами не важно: можно долгий отождествить с кратким. Но в задаче синтеза это различие существенно, ибо нежелательно, чтобы система породила, скажем, пару *о мне* вместо *обо мне*. Поэтому нужно исследовать правила языка, определяющие использование кратких и долгих предлогов.

Дело это не очень простое, потому что соответствующий фрагмент языка нерегулярен. Главным механизмом здесь является неудобство произнесения нескольких согласных (в случае с *о* — гласных) звуков подряд: неудобно *с свистом*, *о овце* — произносится *со свистом*, *об овце*. Но дело осложняется тем, что 1) понятие об удобстве индивидуально изменяется: одни говорят *со втянутым животом*, другие — *с втянутым животом*, так что общенациональная норма часто недетерминирована; 2) с течением времени (в диахроническом срезе языка) понятие об удобстве менялось, и то, что произносилось с трудом, сейчас произносится легко; поэтому в синхроническом срезе сохраняются элементы различных времен, причем каждые управляются своими законами: *со товарищи* — *с товарищами*, *со Ильей со Муромцем* — *с Ильей Муромцем*, *во рту* — *в ругтной ванне*, *во многом* — *в многотиражке*, *ко мне* — *к мнемоническим правилам*, *во что* — *в штопор* и т. п.

Всего в русском языке, как он представлен в словаре [1], имеется десять групп с краткими и долгими предлогами: *о/об/обо*, *в/во*, *с/со*, *к/ко*, *под/подо*, *перед/передо*, *над/надо*, *от/ото*, *из/изо*, *без/безо*. Мы опишем употребление предлогов по группам на лингвистическом уровне и параллельно выясним общие тенденции. Наша цель — удовлетворительно аппроксимировать языковую ситуацию, не особенно усложняя правила.

К сожалению, эти правила невозможно переписать из словарей, даже самых полных. Так, например, словарь [2] чаще

всего дает рекомендации вроде «перед многими словами», «в некоторых отдельных выражениях» и т. п. Поэтому описанные ниже правила отчасти являются результатом самостоятельного анализа.

Дальнейшее изложение разбито на пункты и правила в них нумеруются независимо. Так, правило 1 из пункта 2 будет называться правило 2.1 в остальных пунктах.

Мы рассматривали лексику, как она отражена в словаре [1], и придерживались фонетической терминологии, принятой в книге [3].

1. *О/об/обо*. Эта группа стоит особняком, потому что она состоит из трех слов, а основная краткая форма является гласной. Употребление *о/об* хорошо описывает следующее

П р а в и л о 1: *об* ставится, если следующее слово начинается с гласной (т. е. с букв *а, и, о, у, э, ы*); в противном случае ставится *о*.

Отклонения от этого правила часты и по-своему регулярны. *Об* встречается перед йотированными гласными: *об ящерице, об ели, об елках, об юности, о* встречается перед узким *и*: *о их ребенке, о ихтиозаврах*. Попадают и нерегулярные исключения: *Об ком? об Чацком* (Грибоедов), *И долго мечтал я об ней* (Брюсов). Однако всегда возможен (и предпочтителен) вариант, удовлетворяющий правилу.

Пока речь шла о предлогах *о/об*, управляющим предложным падежом, но эти предлоги управляют еще и винительным в смысле «приходить в столкновение с», «быть рядом»: *дробясь о мрачные скалы, сражаться бок о бок*. Здесь имеется тенденция ставить *об* как перед гласными, так и перед согласными: *ударился об дверь, ударился об открытую дверь*. Но и в этом случае следование правилу 1 не приводит к ошибкам, за исключением редких выражений старинного книжного или народного стиля: *сражаться рука об руку, биться, как рыба об лед*. Что касается употребления *обо*, то его описывает

П р а в и л о 2: *обо* ставится перед словами *мне, что*. Правда, перед косвенными падежами слова *весь* тоже употребляется *обо*: *Об этом обо всем передумал он путем* (Пушкин), но можно употребить и *о*: *девушка пела в церковном хоре о всех усталых* (Блок). То же касается слова *всякий*. Составные слова, производные от *весь*, тоже требуют *о*, а не *обо*: *о вселенной, о всемирном потопе*, поэтому *весь* не стоит включать в правило 2. Встречаются случаи, где употребляется *обо* перед нагромождением согласных в следующем слове: *рассказывал обо льне, обо льдах; ударился об встречный грузовик*, но здесь всюду *о* предпочтительнее.

Таким образом, правила 1 и 2 дают вполне удовлетворительное описание соответствующего фрагмента языка.

2. *В/во*. Звук *в* наряду с *ф* является губно-зубным, а произнесение двух таких звуков рядом, если далее стоит еще один

согласный, затруднительно. Большинство случаев употребления *в/во* описывает следующее

Правило 1: *Во* ставится, если следующее слово начинается с буквы *в* или *ф*, а далее стоит согласная; *в* ставится, если следующее слово начинается на *в* или *ф*, а далее стоит гласная буква, т. е. буква, означающая гласный или йотированный гласный звук.

Что касается употребления *в/во*, когда следующее слово начинается не с *в*, *ф*, то эти правила весьма нерегулярны. *Во* употребляется либо 1) в старинных книжных выражениях: *во главу угла*, *во главе войска*, *во исполнение приговора* и в народных выражениях: *во саду ли в огороде*, *во поле березка стояла*, *попался, как кур во щи*, либо 2) перед громоздкими сочетаниями согласных.

Синтез старинных и народно-поэтических выражений пока явно не входит в задачи машинных систем, поэтому случай 1 мы намерены игнорировать.

Случай 2 нуждается в уточнении. В результате анализа словаря [2] выделен следующий список:

1а: *время, вторник, второй, двор, дворец, мгла, мзда, мрак, мхат, сон, что;*

1б: *весь, всякий, лед, лен, лоб, много, мох, рожь, ров, рот, я.*

В этом списке слова стоят в основной форме (в именительном падеже единственного числа). Перед ними употребляется предлог *во*, если в нужных косвенных формах в начале стоят две или более согласных. Так, нас интересуют четыре формы слова *лед*: *лед*, *льды*, *льду*, *льдах*, три последние требуют предлога *во*. Некоторые слова дублируют правило 1, но это не страшно, потому что они ему не противоречат, а списком в таком виде будет удобнее пользоваться потом.

Любопытно, что перед прилагательными, производными от слов списка 1, ставится *в*, а не *во*: *во дворце — в дворцовых переходах*, *во мгле — в мглистом воздухе*, *во мраке — в мрачных покаях*, *во многом — в многочисленных случаях*. В производных от *много* существительные тоже лучше употреблять *в*: *в многоугольнике*, *в многотиражке* и т. д.

Итак, кроме правила 1 справедливо также

Правило 2: Если следующее за *в/во* слово не начинается с букв *в*, *ф*, то *во* ставится перед теми формами слов списка 1, которые начинаются на две или более согласных; иначе ставится *в*.

С некоторыми словами, не подходящими под действие правил 1 и 2, также возможно употребление *во*: *разошлись во мнениях*, но всегда можно употребить и *в*, так что в целом правила 1 и 2 удовлетворительно аппроксимируют реальную ситуацию в языке.

3. *С/со*. В этой группе ситуация в общем аналогична описанной в пункте 2, но богаче.

Звук *с* относится к сибиллянтам — переднеязычным фрикативным свистящим или шипящим звукам, которые в русском языке представлены фонемами *с, с', з, з', ж, ж'* (изображается на письме буквами *жж*), *ш, ш'* (изображается на письме через *щ* или *сч*), *ц* и *ч*. Комбинация два сибиллянта плюс согласная неудобопроизносима. Поэтому справедливо

Правило 1. Ставится предлог *со*, если следующее слово начинается на букву *щ* или комбинацию *с* (или *з*, или *ж*) плюс согласная.

Любопытно, что остальные сибиллянты *ц* и *ч* под аналогичное правило не подпадают: *с цветами, с чванством*. Примеры: *со щукой, со щекой, со счастливой улыбкой, со штыком, со шкварками, со знаменем, со звоном, со жрецом, со жнецом*.

Если слово, следующее за *с/со*, начинается не с сибиллянта, то *со* ставится 1) в отдельных книжных оборотах: *со дня на день, со временем, со крестом*; народно-поэтическом стиле: *со Ильей со Муромцем, со каликами перехожими*, либо 2) если следующее слово начинается с нагромождения неудобопроизносимых согласных. Первым классом исключений мы, как обычно, пренебрежем, а второй уточним.

Для начала заметим, что *со* употребляется со словами из списка 1, конечно, с обычной оговоркой о том, что управляемая форма должна начинаться с двух или более согласных. Помимо этого имеется обширный класс слов, начинающихся на комбинацию *в* плюс согласная. Эти слова особо не оговаривались в предыдущем пункте, потому что они подпадали под правило 2.1, но многие из них требуют предлога *со*.

Вообще слова, начинающиеся на *в*, часто имеют нагромождение согласных; число подряд стоящих согласных может доходить до четырех: *взгляд, вскрытие, встреча* и другие. Эти слова мы проанализируем по группам. По словарю легко убедиться, что имеется много слов, начинающихся на *вз*, например:

взаимный, взбудораженный, взваленный, взвод, взволнованный, взмах, взлет, взрыв, взъерошенный, взыскание, взятие, взятка.

Слова из этого списка, имеющие согласный на третьем месте, явно требуют *со*: *со взбудораженным (взволнованным) видом, со взводом, со взъерошенными волосами*; слова, где третий звук — гласный можно произносить с *с*: *любовь с взаимностью, с взяткой*, но *со* в таких случаях допустимо и предпочтительнее.

Обширную группу образуют слова, начинающиеся на *вс*: *всамделишний, вскользь, вскоре, вслед, всплеск, встреча, всюду, вся, всякий* и др.

Эти слова также допускают или требуют предлога *со*: *со всамделишним участием, со вскользь брошенным замечанием, со всплесками, со встречей, со всеми, со всяким* и т. п. Такие

примеры наводят на мысль, что если после *в* стоит сибиллянт, то надо употреблять *со*. Проверка немногочисленных слов такого рода подтверждает это предложение: *со вжатым, бороться со вшами, со в щель увиденным*. Даже если после *в* стоят сибиллянты, не вошедшие в условие правила 1, все равно *со* предпочтительнее: *со вцепившимся, со вчерашнего дня, со вчистую проигранным*. Остальные слова на *в* с иными вторыми буквами требуют или допускают предлог *с*: *с вкладывшем, с вкрадчивостью, с впрок заготовленным, с вбитым* и т. д. Предыдущие рассмотрения сводятся в три правила.

П р а в и л о 2. *Со* ставится перед теми формами из списка 1, которые начинаются на две или более согласных.

П р а в и л о 3. *Со* ставится перед словами, начинающимися с комбинации *в* плюс сибиллянт.

П р а в и л о 4. Перед словами, не указанными в правилах 1, 2, 3, ставится предлог *с*.

9. *К/ко*. Предлог *ко* употребляется в редких книжных и народных выражениях: *ко времени, ко христову дню, не спеши, коза, ко заутрени*, но мы, как обычно, исключим их из рассмотрения.

Будучи взрывным заднеязычным, звук *к* легко произносится со следующим за ним *к* или *г*, *вернее*, он вовсе не произносится, ассимилируясь со следующим звуком: *к Красной площади, к грязным дорогам*; даже единственное в языке слово *кстати*, начинающееся на *к* и еще две согласные, легко произносится с *к*: *к кстати подвернувшемуся грузовику*. Поэтому аналога правил 2.1 и 3.1 нет.

Правило, аналогичное 2.2 и 3.2, имеет место: *ко двору, ко многому, ко рту, ко всему, ко мне*. Со словами, начинающимися на *в* со многими согласными, можно ставить *ко*: *ко встрече, ко взгляду, ко вскрытию*, но можно и ставить просто *к*. Поэтому ситуацию с *к/ко* удовлетворительно описывает единственное

П р а в и л о. Предлог *ко* ставится перед словами списка 1, которые в нужной форме имеют две или более согласных; иначе ставится *к*.

5. Остальные предлоги. В этом пункте рассматриваются остальные шесть пар: *под/подо, перед/передо; над/надо, от/ото, из/изо, без/безо*.

Правила, аналогичного 2.1 и 3.1, здесь нет. Единственно, что можно здесь сказать,— это, что долгие предлоги употребляются перед некоторыми словами списка 1, а именно, перед словами списка 1б: *подо мной, надо мной, подо мхом, изо ржи, безо рта, передо лбом* и т. п., хотя многие из них можно употреблять также и с краткой формой.

Предлоги *изо* и *ото* встречаются еще в книжном выражении *изо/ото дня в день*.

Удовлетворительное приближение задает

Правило 1. Остальные долгие предлоги употребляются только с формами слов списка 1б, если эти формы начинаются с двух или более согласных.

Данные выше правила легко формализовать до машинного уровня (например, на языке алгебры конечных предикатов (а. к. п.), разработанной Ю. П. Шабановым-Кушнаренко и его школой) и пользоваться ими в автоматических системах обработки языковой информации.

Для описания фонетических вариантов предлогов на языке а. к. п. введем следующие переменные:

y_1 — первая буква слова, на которое распространяется действие предлога со значениями *а, и, о, у, э, ы, в, ф, с, з, ж, щ, д, ш, ч, л, р, я*;

y_2 — вторая буква зависимого слова со значениями, пробегающими весь алфавит русского языка;

ω — слово со значениями, пробегающими списки t_1, t_2, t_3 .

Для удобства последующего описания обозначим согласные буквы алфавита, которые могут стоять на второй позиции в словах через α :

$$\alpha = y_2^b \vee y_2^g \vee y_2^d \vee y_2^z \vee y_2^s \vee y_2^{sc} \vee y_2^k \vee y_2^n \vee y_2^m \vee y_2^h \vee y_2^l \vee y_2^p \vee y_2^c \vee y_2^m \vee y_2^f \vee y_2^x \vee y_2^h \vee y_2^c \vee y_2^u \vee y_2^u \vee y_2^b \vee y_2^g.$$

Обозначим через t_1 список, состоящий из двух слов: $t_1 = \omega^{мне} \vee \omega^{что}$.

Обозначим слова из списков 1а и 1б через t_2 и t_3 соответственно:

$$t_2 = \omega^{время} \vee \omega^{вторник} \vee \omega^{второй} \vee \omega^{двор} \vee \omega^{дворец} \vee \omega^{гла} \vee \omega^{зда} \vee \omega^{рак} \vee \omega^{хат} \vee \omega^{сон} \vee \omega^{что};$$

$$t_3 = \omega^{весь} \vee \omega^{всякий} \vee \omega^{лед} \vee \omega^{мен} \vee \omega^{люб} \vee \omega^{много} \vee \omega^{мех} \vee \omega^{рожь} \vee \omega^{ров} \vee \omega^{рот} \vee \omega^я.$$

Теперь опишем правила употребления долгих форм предлогов в виде уравнений k^1, k^2, \dots, k^n .

Предлог *об*:

$$k^1 = y_1^a \vee y_1^m \vee y_1^o \vee y_1^y \vee y_1^s \vee y_1^u = 1.$$

Предлог *обо*: $k^2 = t_1 = 1$. Предлог *во*: $k^3 = (y_1^o \vee y_1^f) \alpha = 1$.

Предлоги *во, со, ко*:

$$k^4 = (y_1^o \vee y_1^f \vee y_1^m \vee y_1^c \vee y_1^l \vee y_1^p \vee y_1^s) \wedge (t_2 \vee t_3) \alpha = 1.$$

Предлог *со*:

$$k^5 = y_1^u \vee (y_1^c \vee y_1^s \vee y_1^{sc}) \alpha = 1;$$

$$k^6 = y_1^o \wedge (y_2^c \vee y_2^s \vee y_2^{sc} \vee y_2^h \vee y_2^m \vee y_2^h) = 1.$$

Предлоги *подо, передо, предо, надо, ото, изо, безо*:

$$k^7 = (y_1^a \vee y_1^i \vee y_1^* \vee y_1^p \vee y_1^r \vee y_1^d \vee y_1^c \vee y_1^e) at_3 = 1.$$

В остальных случаях употребляются краткие формы этих предлогов.

Список литературы: 1. *Частотный словарь русского языка* /Под ред. Л. Н. Засориной.— М.: Русский язык, 1977.— 935 с. 2. *Толковый словарь русского языка*. Т. I—IV / Под ред. Д. М. Ушакова.— М.: ОГИЗ, 1934—1940.— 5000 с. 3. *Панов М. В.* Современный русский язык. Фонетика.— М.: Высшая школа, 1979.— 210 с. 4. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Об алгебре конечных предикатов.— АСУ и приборы автоматки, 1979, вып. 50, с. 14—20.

Поступила в редколлегию 29.12.81.

УДК 631.3.01

А. А. РОСЬ, канд. техн. наук

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОБЫВАНИЯ ЗНАНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

В настоящее время все больше внимания уделяется автоматизации поиска решений при управлении сложными системами на основе формально-логического подхода к описанию проблемной среды. При этом наиболее подходящим языком для построения логико-лингвистических моделей [1], позволяющим формализовать динамические процессы управления, является проблемно-ориентированный язык управления. Однако, обладая большой семантической выразительностью, он не содержит средств описания процессов добывания знаний в ходе управления. Мы предлагаем расширить проблемно-ориентированный язык управления указанными средствами, которые могут быть эффективно использованы при автоматизации синтеза управляющих программ.

Описание процесса добывания знаний. Особенностью аксиоматической теории среды в системе управления является то, что она определена на множестве динамических ситуаций, каждая из которых задает определенную интерпретацию теории, характеризуется определенным составом объектов и отношений между ними и должна удовлетворять аксиомам теории среды, если последняя правильно построена.

В связи с динамичностью обстановки знания о некоторых объектах могут быть известными только на некоторый определенный момент времени, причем с изменением ситуаций полученные знания могут через определенное время не соответствовать действительности. Поэтому возникает необходимость в наличии средств уточнения, добывания знаний в процессе управления. В этом состоит принципиальное отличие такой теории от любой математической теории, в которой множества рассматриваемых объектов и отношения между ними заранее строго определены и фиксированы.

Добывание знаний будем рассматривать как процесс определения множества элементов предметной области, удовлетворяющих заданным свойствам. Свойства объектов могут быть выражены путем описания отношений, в которых находятся искомые объекты с другими элементами предметной области. Описывать отношения можно, например, на языке исчисления предикатов первого порядка либо в виде функциональной зависимости.

В первом случае поиск нужных элементов предметной области осуществляется либо путем доказательства выводимости формулы-вопроса из системы аксиом, описывающих некоторую задачу, либо путем означивания формулы исчисления предикатов первого порядка на множестве значений предметных переменных [2]. Во втором случае — путем выполнения некоторой вычислительной процедуры, реализующей заданную функциональную зависимость. Процедуру поиска объектов, удовлетворяющих заданным свойствам, будем обозначать $TA(\vec{X}, \vec{S})$, где A — имя вычислительной процедуры или имя аксиоматической модели, или первичной формулы теории среды; \vec{X} — список имен предметных переменных; \vec{S} — результаты поиска (списки объектов, удовлетворяющих заданным свойствам). С точки зрения организации вычислительного процесса назначение процедуры T заключается либо в вызове подпрограммы с именем A и аргументами \vec{X} , либо в означивании соответствующей формулы на множестве значений предметных переменных \vec{X} с формированием списков элементов предметных переменных \vec{S} . С точки зрения теории среды процедура T предназначена для добывания требуемых знаний в процессе управления.

Чтобы описать результаты выполнения процедуры T , в целях устранения формальной тавтологии вводится предикат знания K , принимающий значение «истина» в том случае, если известен результат выполнения процедуры T . В общем случае описание результатов выполнения процедуры T можно представить следующей схемой аксиом: $L(TA(\vec{X}, \vec{S}) \rightarrow M_t \uparrow (KA(\vec{X}, \vec{S}, 1) \vee \vee KA(\vec{X}, \vec{S}, 0)))$ (1); $L(KA(\vec{X}, \vec{S}, 1) \rightarrow A(\vec{X}, \vec{S}(\vec{X})))$ (2); $L(KA(\vec{X}, \vec{S}, 0) \rightarrow \sim A(\vec{X}, \vec{S}(\vec{X})))$ (3), где $L, M_t \uparrow$ — операторы языка описания теории среды [2]; последний аргумент предиката K является признаком результата выполнения процедуры T (1 — если результатом выполнения процедуры является положительный эффект, 0 — в противном случае).

Схемой (1) утверждается, что после выполнения некоторого действия мы располагаем знаниями о характере его результата. Схемы (2) и (3) описывают результаты этого же действия. Иначе говоря, схема аксиом (1) — (3) выражает тот факт, что значения

истинности литералов $A(\vec{X}, \vec{S}(\vec{X}))$ или $\sim A(\vec{X}(\vec{S}(\vec{X})))$ известны только при наличии знаний о результатах выполнения процедуры $TA(\vec{X}, \vec{S})$, выражаемых предикатом $KA(\vec{X}, \vec{S}, \text{Пр})$ ($\text{Пр} = 1, 0$).

Кроме того, могут указываться достаточные условия выполнения процедуры T : $L(u(\vec{x}) \rightarrow M \uparrow TA(\vec{X}, \vec{S}))$ (4).

Предикаты типа $A(\dots)$ можно использовать при описании условий выполнения некоторых действий следующим образом:

$$L(A(\vec{X}, \vec{S}(\vec{X})) \rightarrow M \uparrow d_1(\dots, \vec{S}(\vec{X}), \dots)); \quad (5)$$

$$L(\sim A(\vec{X}, \vec{S}(\vec{X})) \rightarrow M \uparrow d_2(\dots)), \quad (6)$$

где d_1, d_2 — некоторые предикаты-действия.

Включение в теорию процедуры T с описанными свойствами позволяет разбивать задачи управления на функционально законченные подзадачи и описывать их содержание своими аксиоматическими моделями. Это приводит к уменьшению размерности систем аксиом и сокращению времени вывода плана действий управляющей системы. Кроме того, это средство позволяет в полном объеме реализовать идеи нисходящего проектирования прикладного программного обеспечения АСУ.

Описание циклических вычислительных процессов. Для формирования списков искомых элементов некоторой предметной области процедурой T должно быть организовано циклическое выполнение вычислительной процедуры или означивание формулы исчисления предикатов, направленные на перебор всех (или части значений) предметных переменных. В математической логике средствами описания переборов являются кванторы общности (\forall) и существования (\exists). Так, интерпретация формулы $\forall(x)P(x)$ заключается в организации цикла, схема которого приведена на рис. 1, реализация цикла, соответствующего формуле $\exists(x)P(x)$ представлена на рис. 2. Две схемы различаются только условиями выхода из цикла (символ 3). Первая схема отражает перебор по всем элементам предметной области, вторая — до первого значения переменной, при котором формула $P(x)$ истинна.

На практике может появиться необходимость в отражении ситуаций, описываемых формулами, истинными на определенном количестве наборов значений переменных. В работе [3] для анализа естественного языка путем формализованного его представления на языке исчисления предикатов были введены кванторы типа $\exists_{\Delta N}$, где вместо символа Δ может стоять любой из знаков сравнения: $=, >, \geq, \leq, <, \neq$.

Вопросы оперирования с ними в процессе логического вывода авторы не рассматривали. Однако исследования показали необходимость расширения множества кванторов, имеющих в математической логике, кванторами типа $\exists_{\Delta N}$ (существует ровно (больше, не меньше, не больше, меньше, не равно) N таких значений переменной \dots , что \dots). Они являются конкретизацией

квантора \exists (существует хотя бы одно такое значение переменной... , что...). Это позволяет ставить в соответствие переменным, охваченным кванторами типа $\exists_{\Delta N}$, функцию Сколема [4], отражающую содержание индекса ΔN . Кроме того, следует ввести правила локализации области действия отрицания для формул

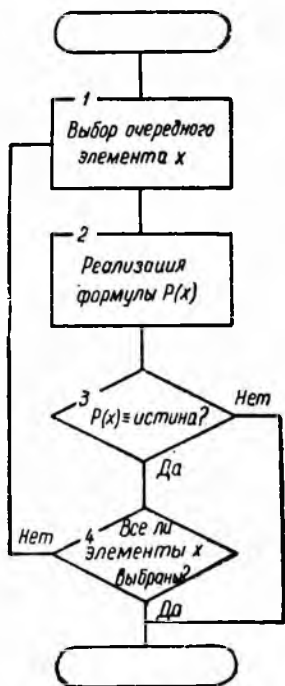


Рис. 1

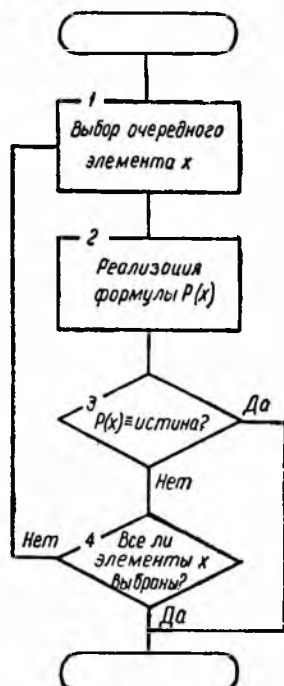


Рис. 2

типа $\sim \exists_{\Delta N}(x)P(x)$. В соответствии со смыслом, вкладываемым в кванторы $\exists_{\Delta N}$, следующим образом определим отрицание:

$$\sim \exists_{\Delta N}(x)P(x) \approx \exists_{\Delta N}(x)P(x) \vee \forall(x) \sim P(x),$$

где « \approx » обозначает «эквивалентно»; Δ — знак сравнения, двойственный знаку сравнения Δ в данной формуле (пары двойственных знаков сравнения: $=$ и \neq ; $>$ и \leq ; \geq и $<$). Функции Сколема будем представлять следующим образом: $f_{\Delta N}^K(\dots)$, где K — класс предметных областей. Отсутствие нижнего индекса говорит о том, что функция Сколема порождена квантором \exists .

На практике также возникает необходимость в определении количества и наборов значений переменных, на которых истинна некоторая формула. С этой целью введем вопросительные слова СК и КАКИЕ, являющиеся, по сути, операторами, определяющими действия по формированию списков соответствующих пере-

ных и по подсчету количества наборов значений переменных, для которых истинна некоторая формула. Вопросительное слово СК справа сопровождается скобками с перечнем переменных, количество наборов значений которых требуется подсчитать, например, СК(x, y). Вопросительное слово КАКИЕ сопровождается справа скобками типа ($x \Rightarrow S_x$), где указывается что значения предметной переменной x на которых истинна некоторая формула, следует заносить в список S_x . При преобразовании аксиом в пред

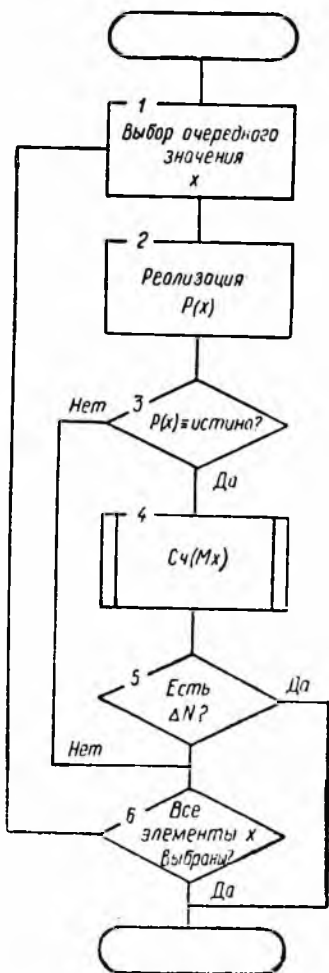


Рис. 3

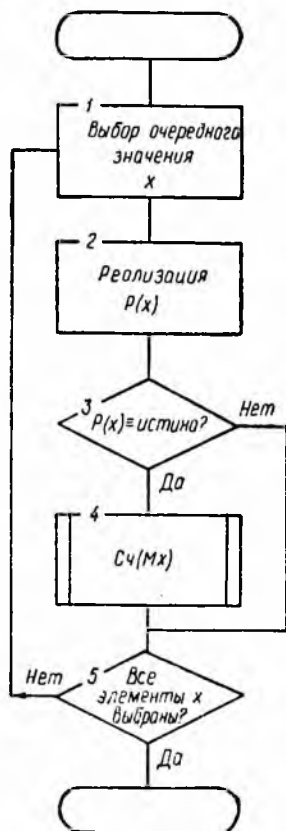


Рис. 4

ложения [5] вопросительные слова, как и кванторы, исключаются, но при этом соответствующие переменные сопровождаются необходимой информацией. Для этого слову СК поставим в соответствие букву С, а сочетанию КАКИЕ ($x \Rightarrow S_x$) — сочетание символов $K(S_x)$ и присоединим эти коды к имени переменной

(функции Сколема) через символ «*» слева. Например, запись КАКИЕ $(x \Rightarrow S_x) \forall (y) \exists_{=N}(x) P(x, y)$ преобразуется к виду

$$P(K(S_x) * f_{=N}^x(x, y)).$$

Для того чтобы организовать вычислительный процесс в соответствии со смыслом, вложенным в кванторы типа $\exists_{\Delta N}$ и вопросительные слова, необходимо сопоставить им группы операций, реализующих подсчет наборов значений переменных, на которых истинна некоторая формула (пусть это будет подпрограмма $C_4(M_x)$, где M_x — текущее значение количества элементов x , удовлетворяющих формуле $P(x)$).

Схемы программ, реализующие все возможные случаи использования кванторов и вопросительных слов, представлены на рис. 3—6. Все схемы являются однотипными и их структура не зависит от конкретных предметных областей. Это дает возможность автоматического построения программ по виду квантора.

Если вместо логической формулы $P(x)$ используется вычислительная процедура $C(x)$, то во всех схемах, приведенных на рис. 1—6, будет отсутствовать символ 3. Таким образом, рассмотренные схемы вскрывают структуру процедуры T , определяемую задачами поиска.

Характер перебора значений переменных, являющихся аргументами процедуры T , можно отразить в структуре имен этих переменных. Для таких аргументов целесообразно установить правила унификации, учитывающие, что действия с определенными параметрами включают в себя как составные элементы действия с другими параметрами. Например, перемещение объекта на отрезок l в определенном направлении включает в себя и перемещение объекта на любой отрезок x ($x \leq l$) в том же направлении. Аналогично отыскание всех пар объектов, удовлетворяющих отношению $P(x, y)$, включает и отыскание всех таких объектов y , что $P(a, y)$ для некоторого a . Обозначим такое отношение включения действий через $D_1 < D_2$ (действие D_2 включает D_1). При этом группы, состоящие из кванторов, вопросительных слов и процедур, определяют действия, которые можно упорядочить по их включению:

$$\exists(x) C(x) < \exists_{\Delta N}(x) C(x) < \text{КАКИЕ}(x \Rightarrow S_x) \exists_{\Delta N}(x) C(x) < \\ < \text{СК}(x) C(x) < \text{КАКИЕ}(x \Rightarrow S_x) C(x) < \forall(x) C(x).$$

Действия с кванторами типа $\exists_{\Delta N}$ упорядочиваются между собой следующим образом:

$$\exists_{<N}(x) C(x) < \exists_{< \wedge}(x) C(x) < \exists_{+N}(x) C(x) < \\ < \exists_{> \wedge}(x) C(x) < \exists_{> \vee}(x) C(x) < \exists_{=N}(x) C(x).$$

Если $D_1 < D_2$, то для соответствующих предикатов $D(\pi_1)$, $D(\pi_2)$ имеет место импликация $D(\pi_2) \rightarrow D(\pi_1)$.

	A	E	GE	KE	$E < N_2$	$E < N_2$	$E + N_2$	$E > N_2$
A	+							
E	+	+	+	+	+	+	+	+
CE	+		+	+				
KE	+		+	+				
$E < N_1$	+		+	+	$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$		$N_1 < N_2 + 1$
$E < N_1$	+		+	+	$N_1 < N_2 - 1$	$N_1 < N_2$		$N_1 < N_2$
$E \neq N_1$	+		+	+			$N_1 = N_2$	
$E > N_1$	+		+	+				$N_1 > N_2$
$E > N_1$	+		+	+				$N_1 > N_2 - 1$
$E = N_1$	+		+	+				$N_1 < N_2$
$KE < N_1$	+			+				
$KE < N_1$	+			+				
$KE \neq N_1$	+			+			$N_1 = N_2$	
$KE > N_1$	+			+				$N_1 > N_2$
$KE > N_1$	+			+				$N_1 > N_2 - 1$
$KE = N_1$	+			+				$N_1 < N_2$

	$E > N_2$	$E = N_2$	$KE < N_2$	$KE < N_2$	$KE \neq N_2$	$KE > N_2$	$KE > N_2$	$KE = N_2$
A								
E	+	+	+	+	+	+	+	+
CE								
KE								
$E < N_1$	$N_1 < N_2 + 2$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$		$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2 + 2$	$N_1 < N_2 + 1$
$E < N_1$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 - 1$	$N_1 < N_2$		$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2$
$E = N_1$		$N_1 < N_2$			$N_1 = N_2$			$N_1 < N_2$
$E > N_1$	$N_1 > N_2 + 1$					$N_1 > N_2$	$N_1 > N_2 + 1$	
$E > N_1$	$N_1 > N_2$					$N_1 > N_2 - 1$	$N_1 > N_2$	
$E = N_1$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 = N_2$				$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 = N_2$
$KE < N_1$			$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$		$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2 + 2$	$N_1 < N_2 + 1$
$KE < N_1$			$N_1 < N_2 - 1$	$N_1 < N_2$		$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 < N_2$
$KE \neq N_1$		$N_1 < N_2$			$N_1 = N_2$			$N_1 < N_2$
$KE > N_1$	$N_1 > N_2 + 1$					$N_1 > N_2$	$N_1 > N_2 + 1$	
$KE > N_1$	$N_1 > N_2$					$N_1 > N_2 - 1$	$N_1 > N_2$	
$KE = N_1$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 = N_2$				$N_1 < N_2$	$N_1 < N_2 + 1$	$N_1 = N_2$

В связи с этим имя параметра должно состоять из трех частей, из которых одна отражает класс перебора по данной переменной, вторая — класс предметной области, третья — тип переменной.

1. Тип переменной: константа, переменная, функция Сколема, неизвестная константа.

2. Класс предметной области указывает на принадлежность объекта к конкретной предметной области. Его мы будем указывать верхним индексом.

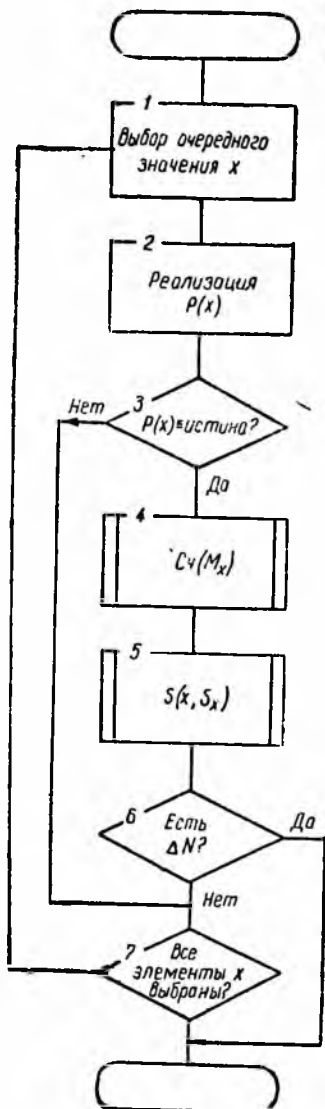


Рис. 5

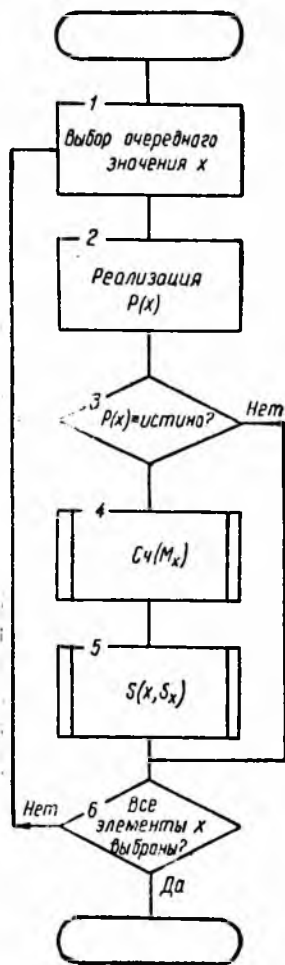


Рис. 6

3. Класс перебора отражает, каким циклом по заданной переменной следует охватить процедуру и при необходимости куда требуется поместить результат вычислений относительно этой переменной. Класс перебора зависит от типа квантора и вопросительного слова, в области действия которых находится данная переменная. Будем различать следующие классы переборов: А — переменная связана квантором общности; Е — переменная связана квантором существования; $E_{\Delta N}$ — переменная связана квантором типа $\exists_{\Delta N}$; СЕ — переменная является аргументом вопросительного слова СК, и связана квантором существования; КЕ — переменная является аргументом вопросительного слова КАКИЕ и связана квантором существования; $KE_{\Delta N}$ — переменная является аргументом вопросительного слова КАКИЕ и связана квантором типа $\exists_{\Delta N}$. Например, формула вида КАКИЕ $(y \Rightarrow Sy) \forall (x) \exists_{=2} (y) C(x, y)$ переписется следующим образом: $C(x, K(Sy) * y_{=2}(x))$.

Определим правила унификации аргументов предикатов.

1. Унификации подлежат все элементы, составляющие имя аргумента. В случае, если унификация невозможна хоть для одного элемента, полагается, что невозможна унификация аргументов в целом.

2. Унификация переменных по типу осуществляется по правилам, приведенным в [5].

3. Классы предметных областей унифицируются только в случае, если один класс является подклассом другого класса или же если классы совпадают. Пусть α и γ — классы предметных областей. Тогда $x^\alpha \Rightarrow x^\gamma$, если $\alpha \subseteq \gamma$ (« \Rightarrow » — знак подстановки).

4. Правила унификации классов переборов представим в виде таблицы, где в левом столбце записаны классы, которые можно подставлять, а в верхней строке перечислены классы, вместо которых можно подставлять. Остальные элементы таблицы указывают, разрешены ли соответствующие подстановки и при каких условиях.

Унификация аргументов процедуры T по классу переборов приводит, по сути, к унификации программ определения конкретных элементов предметной области, удовлетворяющих заданным требованиям. По виду аргументов легко синтезировать в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1—6, программы.

Список литературы: 1. *Поспелов Д. А.* Логико-лингвистические модели в системах управления.— М.: Энергонздат, 1981.— 227 с. 2. *Ярушек В. Е., Багаев А. П., Рось А. А.* Процедура означивания формулы ответа для вопросно-ответных систем.— АСУ и приборы автоматки, 1979, вып. 52, с. 122—126. 3. *Корельская Т. Д., Падучая Е. В.* Обратная теорема (алгоритмические и эвристические процессы мышления).— М.: Знание, 1978.— 62 с. 4. *Новиков П. С.* Элементы математической логики.— М.: Мир, 1959.— 400 с. 5. *Нильсон Н.* Искусственный интеллект.— М.: Мир, 1973.— 267 с.

Поступила в редколлегию 12.11.81.

*В. М. ТАУБЕ, Г. А. ШИФРИН, Н. А. НЕСТЕРЕНКО,
М. Д. ГИНЗБУРГ, Л. М. ЛЮБЧИК, В. А. МАЛОШТАН*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ К РАСЧЕТУ
ОПТИМАЛЬНЫХ ДОЗИРОВОК ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ
В КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ
ИНТЕНСИВНОЙ ТЕРАПИИ**

В настоящее время большое внимание уделяется использованию математических методов в биологии и медицине [1—3]. УГПИ «Тяжпромавтоматика» в творческом сотрудничестве с Запорожским государственным институтом усовершенствования врачей им. А. М. Горького разработали кибернетическую систему индивидуальной интенсивной терапии (КСИИТ), которая осуществляет управление процессом лечения больных с тяжелыми нарушениями различных гомеостатических систем организма гемодинамики, дыхания, водно-солевого обмена, кислотно-щелочного равновесия, терморегуляцией и т. п. КСИИТ обеспечивает врача необходимой информацией о состоянии систем гомеостаза, дает оценку состояния больного, рекомендует лечебные воздействия. В КСИИТе имеется банк данных, где хранятся исходные данные, результаты расчета, оценки состояний и рекомендации по лечению каждого больного, что позволяет по мере накопления данных производить статистическую обработку данных и уточнять лежащие в основе расчетов параметров гомеостаза эмпирические зависимости.

Рекомендуемые дозы лекарственных средств, с одной стороны, индивидуальны, так как в основе их расчета лежат индивидуальные параметры больного. С другой стороны, расчет этих доз основан на некоторой типовой (средней для данного типа больных) реакции больного на фармакотерапию, которая получена в результате статистической обработки большого числа историй болезни. Выдаваемые рекомендации успешно используются в реанимационных отделениях в Харькове, Запорожье, Днепропетровске, что позволило повысить качество лечебных воздействий за счет использования каждым практическим врачом заложенных в КСИИТе представлений современной физиологии о механизмах регулирования гомеостатических систем организма человека. В дальнейшем планируется расширение системы и подключение к ней новых пользователей.

Рассмотрим применение в КСИИТе методов теории управления, в частности, теории адаптивных систем [4] и теории динамических звеньев [5], для автоматизированного расчета оптимальных доз лекарственных средств, что позволяет вычислить строго индивидуальные дозы медикаментозных препаратов, учитывающих как индивидуальные особенности больного, так и его

индивидуальную реакцию на применяемые лечебные воздействия.

Медицинская часть работы основывается на методике, впервые примененной проф. Халфенем Э. Ш. [1], которая вкратце заключается в следующем. При первом назначении дозы учитывается средняя для данного типа больных реакция. После применения лечебного воздействия исследуется результат, и для повторного применения лечебного воздействия вычисляется доза как на основе типовой (средней) реакции, так и индивидуальной реакции системы на воздействие. (При этом все же определяющей является типовая реакция). Исследуя результат второго лечебного воздействия, вычисляется доза для третьего и т. д. При этом все большую роль играет индивидуальная реакция больного, а все меньшую — типовая реакция. Начиная с некоторого воздействия, дозы становятся строго индивидуальными, и типовая реакция не оказывает заметного влияния на ее величину.

Изложенная выше методика аналогична применяемой в теории управления [4, 5], что указывает на целесообразность использования разработанных там методов.

Разработанная нами система расчета оптимальных доз лекарственных средств реализуется посредством решения следующих задач:

1) задача идентификации, цель которой состоит в разработке математической модели, описывающей процесс лечения, и в определении параметров этой модели;

2) задача прогнозирования результатов лечебного воздействия на основе разработанной математической модели;

3) задача управления, цель которой состоит в определении на основе разработанной модели оптимальной дозы препарата, позволяющей целенаправленно изменять состояние больного.

При разработке моделей следует учитывать ряд условий. Во-первых, структура модели должна подчиняться достаточно общим законам. Если бы это было не так, то у врача отсутствовало бы то, что называется «врачебным опытом», и каждого больного необходимо было бы лечить индивидуальными лекарственными препаратами [1]. Во-вторых, параметры модели должны быть сугубо индивидуальными для каждого больного. В-третьих, существенной особенностью модели является ее нестационарный характер, поэтому параметры модели должны быть переменными. Изменение параметров модели зависит от многих физиологических и психологических факторов.

Все это указывает на целесообразность использования модели с самонастройкой параметров, работающей в режиме самообучения (адаптации). При этом модель путем автоматического поиска, как бы сама познает неизвестные свойства объекта (больного) и обучается описывать и управлять процессом лечения наилучшим образом.

Достоинства адаптивных моделей хорошо известны [4]. Прежде всего они позволяют достаточно точно определить параметры модели благодаря их непрерывному уточнению. Другими важными достоинствами является их относительная простота, большая помехозащищенность, возможность учета дополнительных факторов.

Сложность рассматриваемой задачи применительно к процессу лечения состоит в том, что, в отличие от объектов теории управления, на больном принципиально неприемлемы никакие эксперименты по определению его параметров. Другая сложность заключается в том, что задача описания и управления патологическими процессами в живых организмах связана с наличием многочисленных взаимосвязанных факторов, большой неопределенностью параметров, наличием неформализуемых признаков [1].

Анализ адаптивных алгоритмов, приведенных в [4], показывает целесообразность использования стационарных алгоритмов, при которых оценки параметров модели, получаемые по этому алгоритму, являются функциями лишь входных и выходных параметров, но не зависят явно от времени или от известных функций времени. При этом нестационарный характер модели проявляется в том, что параметры будут изменяться при последующих уточнениях.

Существенную роль при разработке алгоритмов адаптации играет глубина памяти. Для рассматриваемых нами задач существенна предыстория, поэтому необходимо применять многошаговый алгоритм идентификации. Однако, учитывая ряд преимуществ одношаговых алгоритмов (простота реализации и большая мобильность), делающих их незаменимыми при текущей идентификации нестационарных объектов, целесообразно свести задачу к одношаговой.

В существующих алгоритмах адаптивной идентификации принято выделять два режима: режим обучения и режим слежения [4]. Характерным для режима обучения является то, что оценка параметров часто начинается с некоторого произвольного значения, например с нуля, и ошибка оценки параметров объекта обычно очень велика. При этом изменение параметров модели вызвано, как правило, не изменением параметров объекта, а переходом от произвольных начальных значений параметров к индивидуальным. Для расчета доз лечебного воздействия целесообразно в качестве начальных значений параметров брать не произвольные значения, а типовые, т. е. средние значения для данного типа больных. Это позволит уже на первых шагах использовать полученные результаты для выдачи рекомендаций по лечению, так как уже первый шаг дает средние обычно применяемые дозы, а при последующих шагах происходит уточнение, т. е. индивидуализация доз.

Рассмотрим теперь конкретный вид модели. Как и в [1], синтезируем линейную модель. Больного с точки зрения теории управления рассматриваем как динамическое звено [4], а процесс лечения описываем дифференциальным уравнением вида [1, 3, 4]

$$A_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + A_1 \frac{dy}{dt} + A_0 y = \sum_{i=1}^n B_i x_i(t), \quad (1)$$

где y — выходная величина (применительно к рассматриваемым нами задачам, величина, характеризующая состояние больного, например дефицит объема циркулирующей крови, циркулирующего гемоглобина и т. д.); x_i — входные величины (в нашем случае скорости лечебных воздействий); A_2, A_1, A_0, B_i — коэффициенты (параметры) модели. Значения коэффициентов, определение которых рассмотрено ниже, задают различные типы динамических звеньев и соответственно различные стратегии лечения.

Как известно [3], в математической биологии, как и в задачах теории управления, в отличие от теории дифференциальных уравнений, главную трудность представляет не поиск решения известного дифференциального уравнения, а поиск дифференциального уравнения, соответствующего виду рассматриваемого процесса. Применительно к рассматриваемым нами задачам это означает отыскание коэффициентов уравнения (1). Для этого рассмотрим иерархию характерных временных параметров задачи $T_k \gg \Delta t > \tau$ (2), где T_k — характерное время изменения коэффициентов; Δt — промежуток времени между измерениями; τ — промежуток времени введения лечебных доз.

В силу (2) для определения коэффициентов уравнения (1) можно использовать модель «замороженных» коэффициентов, интегрируя (1) по t от t_0 до $t_0 + \Delta t$, где t_0 — начало воздействия. Записывая результат интегрирования в конечных разностях, получаем

$$y = \sum_{i=1}^{n+2} k_i z_i, \quad (3)$$

где $y = y(t_0 + \Delta t)$, $z_1 = y(t_0)$, $z_2 = y(t_0 - \Delta t)$;

$$z_{i+2} = X_i = \int_{t_n}^{t_0 + \Delta t} x_i(t) dt \quad (i = 1 - n) \quad (4)$$

— введенные дозы, а коэффициенты k_i связаны с коэффициентами уравнения (1) соотношениями

$$\begin{aligned} k_1 &= \left(\frac{2A_2}{\Delta t} + A_1 - \frac{A_0}{2} \Delta t \right) / \left(\frac{A_2}{\Delta t} + A_1 + \frac{A_0}{2} \Delta t \right); \\ k_2 &= - \frac{A_2}{\Delta t} / \left(\frac{A_2}{\Delta t} + A_1 + \frac{A_0}{2} \Delta t \right); \\ k_{j+2} &= B_j / \left(\frac{A_2}{\Delta t} + A_1 + \frac{A_0}{2} \Delta t \right) \quad (j = 1 - n). \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, задача отыскания коэффициентов уравнения (1) сводится к нахождению коэффициентов k_i . Для ее решения воспользуемся адаптивным одношаговым алгоритмом [4]

$$k_i(N) = k_i(N-1) + \frac{y(N) - y^*(N)}{\gamma^2 + \sum_{i=1}^{n+2} z_i^2(N)} z_i(N), \quad (6)$$

где

$$y^*(N) = \sum_{i=1}^{n+2} k_i(N-1) z_i(N) \quad (7)$$

— модельное значение; N — номер шага; γ — скалярный параметр, введенный для уменьшения влияния помех. Его величина зависит от уровня помех и определяется экспериментально в процессе эксплуатации системы. Чем выше уровень помех, тем большее значение надо выбрать для γ .

Существенную роль играет выбор начальных значений параметров. При первом обращении больного к КСИИТу система располагает ограниченной информацией о нем, поэтому модель упрощается, полагая $A_0=0$ и $A_2=0$. При этом больной рассматривается как идеальное интегрирующее звено с коэффициентами передачи $k_{i+2}(0) = B_i/A_2$ ($i=1-n$), значения которых выбираются типовыми. При повторном обращении к КСИИТу система располагает информацией об изменении состояния больного в результате первого лечебного воздействия, что позволяет уточнить все коэффициенты k_i ($i=1-n+2$) и, решая систему (5), найти коэффициенты уравнения (1). В зависимости от найденных значений коэффициентов A_0, A_1, A_2 реализуются различные типы динамических звеньев: идеальное интегрирующее звено; аperiodическое звено первого порядка; аperiodическое звено первого порядка с отрицательным самовывравниванием; аperiodическое звено второго порядка; колебательное звено; консервативное звено; интегрирующее звено с замедлением; дважды интегрирующее звено; квазиконсервативное звено; колебательное звено с отрицательным затуханием; неустойчивое интегрирующее звено.

Таким образом, реализована система с переменной структурой, в которую в зависимости от вычисленных коэффициентов уравнения (1) включается одно из перечисленных выше звеньев.

Передаточные функции и функции веса этих звеньев хорошо известны [5]. Это позволяет после решения задачи идентификации (т. е. вычисления значений коэффициентов уравнения (1) и определения типа звена) выдать прогноз изменения состояния объекта (т. е. больного) в результате примененного лечебного воздействия. Особенно важными являются постоянные времени, характерные для каждого типа звена. Знание

этих величин дает возможность врачу своевременно принять меры для предотвращения ухудшения состояния больного.

Зная уравнение процесса лечения (1), можно вычислить оптимальную для данного больного дозу препарата с учетом ограничения на управление. При этом врачом задается желательное для данного больного значение выходного параметра. В отличие от [1] уравнение (1) с найденными выше коэффициентами решается точно и исследуется вопрос о том, удовлетворяет ли желательный переходный процесс уравнению. При этом возможны три ситуации:

1) характеристики больного таковы, что существует доза, для которой решение уравнения (1) описывает желательный для врача переходный процесс, и в дальнейшем в состоянии больного не предвидится ухудшение. В этом случае вычисляется эта оптимальная доза;

2) характеристики больного таковы, что существует доза, для которой решение уравнения (1) описывает переходный процесс, позволяющий достичь результата за требуемое время. Однако в дальнейшем предвидится ухудшение в состоянии больного. В этом случае вычисляется эта оптимальная доза и выдается прогноз момента времени, в который потребуется новое лечебное воздействие;

3) характеристики больного таковы, что с учетом ограничений на управление (ограничений доз препаратов) не удастся достичь желательного результата. В этом случае вычисляется максимальная доза лекарственных препаратов и выдается сообщение о желательности применения других медикаментозных средств.

В разработанной версии системы оптимизация выполняется по одному параметру, который для данного типа больных является основным. При дальнейшем развитии системы планируется проводить оптимизацию по нескольким параметрам. Кроме того, предполагается использовать разработанный метод для выбора оптимальной траектории в фазовом пространстве состояний гемодинамики [6].

Разработанные задачи программно реализованы на ЭВМ ЕС-1022, язык программирования ПЛ-1 ОС ЕС.

Практическое применение адаптивного динамического многоуровневого метода расчета оптимальных доз лечебных препаратов позволяет повысить эффективность лечения за счет индивидуализации фармакотерапии и обеспечения возможности построения оптимальной тактики ведения послеоперационных больных. Все это показывает целесообразность применения методов теории управления для поиска и реализации оптимальных планов лечения.

Список литературы: 1. Халфен Э. Ш. Кардиологический центр с дистанционным и автоматическим наблюдением за больными.— М.: Медицина, 1980.— 102 с. 2. Применение математических моделей в клинике сердечно-со-

судистой хирургии / Под ред. акад. АМН СССР В. И. Бураковского.— М.: Машинное строительство, 1980.— 192 с. 3. *Методы математической биологии*. Кн. 3. Методы синтеза динамических моделей биологических систем / Под ред. М. А. Ханина.— К.: Вища школа, Головное изд-во, 1981.— 327 с. 4. *Райбман Н. С., Чадаев В. М.* Построение моделей процессов производства.— М.: Энергия, 1975.— 375 с. 5. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования.— М.: Наука, 1972.— 767 с. 6. *Шифрин Г. А., Нестеренко Н. А.* Фазовое пространство гемодинамики.— Кровообращение, 1980, № 1, с. 30—34.

Поступила в редколлегию 12.05.81.

УДК 007.51 : 681.3.015

Э. К. КОБЯЛКО

ВЫБОР ДИАЛОВОЙ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ ЭРГОНОМИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Чтобы описать качество взаимодействия пользователя и ЭВМ в автоматизированных системах, используем понятие «определенность диалога» [1]. Хорошо определенным считается такой диалог между пользователем и ЭВМ, который является не очень недоопределенным и не очень переопределенным. Неопределенный диалог характеризуется тем, что пользователь знает конечную цель диалога, но не знает, как описать для ЭВМ подзадачи, ведущие к этой цели, а ЭВМ не может ему помочь. В случае переопределенного диалога пользователь неестественно ограничен при изложении своих подзадач. Ему не позволено решать задачу своим собственным путем, в нужной ему последовательности и с его собственным структурированием задачи. Пользователь вынужден переформулировать задачу, поэтому теряет из виду свою первоначальную цель. Результатом этого является напряженность пользователя, теряющего способность ориентироваться в предлагаемых ЭВМ решениях, что вызывает дальнейшее ухудшение диалога.

Диалог является переопределенным, если ЭВМ ограничивает пользователя и без необходимости управляет его действиями. Диалог является недоопределенным, если пользователь оставлен в растерянности, что и как делать.

На определенности диалога воздействуют следующие аспекты: гибкость, общность, срочность, прерываемость, вариабельность, обратная связь.

Гибкость диалога обусловлена ограничениями, налагаемыми на него. Таким ограничением может быть, например, фиксированная длина вводимых выражений. Негибкая система становится переопределенной, а слишком гибкая — недоопределенной. Примером очень гибкого интерфейса являются языки программирования, использование которых предполагает очень высокую квалификацию пользователя.

Общность диалога обусловлена тем, насколько одними и теми же средствами языка диалога можно решать различные задачи. Срочность диалога обусловлена приемлемостью для пользователя времени реакции ЭВМ на запрос пользователя. Чем более непредсказуемым является время реакции ЭВМ, тем более недоопределенным становится диалог. Диалог, управляемый ЭВМ, имеет тенденцию к переопределенному, но может быть удовлетворительным для опытных пользователей, если время реакции достаточно мало.

Прерываемость диалога обусловлена возможностью прекратить диалог при возникновении ошибки или достижении цели диалога. Вариабельность диалога обусловлена тем, что ЭВМ может изменять языковые формы ответа при переходе пользователя от одной подзадачи к другой. Если пользователь допустил ошибку, ЭВМ при устранении ее переходит к переопределенному диалогу, позволяя пользоваться лишь ответами «да» и «нет».

Обратная связь в диалоге обеспечивается визуализацией реакции ЭВМ на запрос пользователя. Например, если команда, посланная пользователем в ЭВМ, принята и выполняется, то об этом с помощью соответствующей индикации должно быть сообщено пользователю для того, чтобы он не пытался ввести эту команду повторно.

Очевидно, что понятие определенности диалога и различные аспекты ее являются неформализованными. По этой причине для оценки определенности диалога целесообразно пользоваться лингвистическими переменными. Исходя из особенностей задачи, решаемой в процессе диалога и обеспечения определенности диалога, вырабатывается ряд требований к диалоговой процедуре. Степень выполнения этих требований определяется с помощью лингвистической переменной «Истинность» [2].

Пусть задано множество эргономических факторов, характеризующих диалоговую процедуру [3].

Представим множество вариантов диалоговых систем в виде «И/ИЛИ» графа. Будем считать, что, выбирая диалоговую процедуру, мы одновременно будем выбирать реализующую ее диалоговую систему. Степень реализации требований для каждой конечной вершины «И/ИЛИ» графа будет определяться выражением

$$K = \prod_{i=1}^n K_i^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где K_i — степень реализации i -го требования, определяемая с помощью лингвистической переменной «Истинность» экспертным методом; α_i — коэффициент весомости i -го требования, определяется по методике, предложенной в [4]. Функция принадлежности первичного термина «истинный» [2] определяется выражением

$$\mu \text{ истинный } (v) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq v \leq a; \\ 2 \left(\frac{v-a}{1-a} \right)^2 & \text{при } a \leq v \leq \frac{a+1}{2}; \\ 1 - 2 \left(\frac{v-1}{1-a} \right)^2 & \text{при } \frac{a+1}{2} \leq v \leq 1, \\ & a = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Переменная v принимает значения из интервала $[0, 1]$. Для термина «ложный» имеем μ ложный $(v) = \mu$ истинный $(1-v)$, $0 \leq v \leq 1$ (3); n — число требований.

Для каждой конечной вершины оцененная степень реализации требований K определяется выражением (1). Аналогичным выражением определяется заданная степень реализации требований A :

$$A = \bigcap_{i=1}^n A_i^{a_i}. \quad (4)$$

Здесь A_i — заданная степень реализации i -го требования задаваемая экспертами с помощью лингвистической переменной «Истинность» с использованием выражений (2), (3). При оценивании K_i и задании A_i эксперты, кроме первичных термов используют модификаторы и лингвистические связки [2].

Чтобы выбрать наиболее рациональный вариант диалоговой процедуры, необходимо исключить конечные вершины, не удовлетворяющие заданным требованиям. Для этого необходимо сравнить между собой нечеткие множества, определяемые выражениями (1), (4). Определим средние значения на нечетких множествах K и A :

$$\text{Ср}(v; K) = \frac{\sum_{v_i \in K} v_i \mu_K(v_i)}{\sum_{v_i \in K} \mu_K(v_i)}; \quad (5)$$

$$\text{Ср}(v; A) = \frac{\sum_{v_i \in A} v_i \mu_A(v_i)}{\sum_{v_i \in A} \mu_A(v_i)}, \quad (6)$$

где $\mu_K(v_i)$, $\mu_A(v_i)$ — степени принадлежности v_i множествам K и A . Для удобства вычислений будем полагать, что v в выражениях (2), (3) и v_i в выражениях (5), (6) принимает дискретные значения: 0,1; 0,2; 0,3; ... 0,9; 1,0. Вариант D диалоговой процедуры, имеющий оценку K , будем считать рациональным относительно требований A , если $\text{Ср}(v; K) \geq \text{Ср}(v; A)$ для всех конечных вершин, принадлежащих варианту D .

Задача поиска рационального варианта диалоговой процедуры ставится следующим образом. Имеется «И/ИЛИ» граф Γ , средние значения $\text{Ср}(v; K)$ и $\text{Ср}(v; A)$ для всех конечных вершин. Необ-

ходимо найти множество вариантов R , рациональных относительно требований A .

Обозначим S — множество всех конечных вершин. Пусть $\bar{S} \subset S$ — множество вершин такое, что $C_p(v; K) < C_p(v; A)$. Обозначим X — множество вершин «И/ИЛИ» графа; $F(x)$ — множество вершин графа Γ , в которые входят дуги, исходящие из $x \in X$; X_i — множество «И»-вершин. Построим множество $\bar{X} \subset X$ по следующим правилам [5]:

$\bar{S} \subset \bar{X}$; $F(x) \neq \emptyset$ и $F(x) \subset \bar{X} \Rightarrow x \in \bar{X}$; $x \in X_i$ и $F(x) \cap X \neq \emptyset \Rightarrow x \in \bar{X}$.

Чтобы решить задачу выбора рационального варианта диалоговой процедуры, необходимо:

а) построить множество \bar{S} ; б) построить множество \bar{X} ; в) если корень $x_1 \in \bar{X}$, то решений нет; г) из дерева Γ удалить все поддерева с корнями из \bar{X} ; д) в результате получаем множество R .

Усиливая или ослабляя заданные требования, мы изменяем мощность множества R . Усиление заданных требований производится заданием более высоких значений A_i , ослабление — заданием более низких значений. Усиливаем требования до тех пор, пока не получим несколько или один вариант наиболее рациональной диалоговой процедуры.

Описанный подход позволяет на ранних стадиях проектирования выбирать наиболее рациональные варианты диалоговых процедур при эргономическом проектировании процессов взаимодействия пользователя и ЭВМ. Подход также позволяет выбрать наиболее рациональный вариант диалоговой системы, отвечающий заданным требованиям. Данный подход может быть применен при разработке САПР, АСУ, систем автоматизированного обучения.

Список литературы: 1. *Thimbleby H.* Dialogue determination. — *Int. J. Man-Machine Studies*, 1980, 13, p. 295—304. 2. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 165 с. 3. *Shackel B.* The ergonomics of the man-computer interface. — *Man/Computer Communication Infotech State Art Rept.*, Maidenhead, 1979, 2, p. 299—324. 4. *Jager R. R.* Fuzzy decision making including unequal objectives. — *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1, p. 87—95. 5. *Дворянкин А. М., Половинкин А. Ч., Соболев А. Н.* Методы синтеза технических решений. — М.: Наука, 1977. — 103 с.

Поступила в редколлегию 29.12.81.

УДК 681.322.01

И. Г. ФИЛИППЕНКО, канд. техн. наук, *В. В. КАРАСЮК*, *В. С. МЕРКУЛОВ*

МОДЕЛИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ НЕЙРОНОПОДОБНОЙ ОДНОРОДНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Характерной чертой развития вычислительной техники является повышение требований к качественным показателям средств переработки дискретной информации, их надежности,

производительности и возможности реализации в микроэлектронном исполнении [1]. К тому же достижения технологии в производстве интегральных схем и микропроцессоров позволяют создавать микропроцессорные средства, напоминающие что-то «...вроде «нервной ткани», каждый элемент которой не в состоянии самостоятельно решить задачу, но вся ткань в целом решает ее» [2], т. е. разработка новых принципов структурной и функциональной организации средств вычислительной техники все в большей степени ориентируется на однородные регулярные микропроцессорные структуры [3].

В последнее время внимание специалистов привлек процесс переработки информации нервными тканями живых организмов, построенными из однородных элементов — нервных клеток [4]. Существенной особенностью нервных тканей является вероятностный характер взаимодействия их элементов. Например, аксоны клеток головного мозга имеют до четырех тысяч стохастических контактов с другими клетками ткани. При прохождении сигнала по биологическому «каналу связи» прием, преобразование и передача информации в нейронных сетях осуществляются путем последовательного взаимодействия множества элементов [5]. В зависимости от алгоритма обработки информации элементы варьируют своими мембранными потенциалами, за счет которых изменяется порог возбудимости клетки. В терминах процесса преобразования информации состояние элемента можно охарактеризовать так: покой (элемент может воспринимать любые сигналы), возбуждение (только генерация сигналов), восстановление или рефрактерность (элемент ничего не принимает и не передает, он только восстанавливает свои ресурсы). Следует отметить еще одну особенность информационных процессов в нейронных сетях — передача информации по сети осуществляется сериями электрических импульсов. Частота следования импульсов, способ их группирования в пачки зависит от силы раздражения и состояния клетки [6]. Большая надежность и высокое быстродействие таких информационных сетей, которые достигаются за счет значительного количества составляющих элементов и очень простого алгоритма преобразования информации каждым элементом, очевидны. Такие свойства биологических «информационных устройств» привлекают разработчиков технических средств, связывающих с однородными структурами будущее вычислительной техники.

Объединение нескольких процессоров в единую систему традиционно осуществляется на основе одного мощного процессора (центрального) и некоторого количества подчиненных процессоров для вспомогательных операций. Попытка увеличить вычислительную мощность путем увеличения числа центральных процессоров приводит к тому, что пропускная способность у двухпроцессора, например, выше не в два раза, чем у одного процессора, а обычно лишь в 1,6—1,8 раза, добавление большего числа процессоров дает еще более низкий полезный вы-

ход. Исследование причин сравнительно низкой производительности многопроцессорных систем показывает, что «потерянная» мощность расходуется на координацию различных одновременных действий и предотвращение конфликтов. Можно построить многопроцессорную систему, свободную от подобных «бюрократических» издержек, если заставить отдельные процессоры производить одну и ту же операцию одновременно [7].

В настоящее время известны два основных принципа построения однородных дискретных устройств: 1) использование в качестве элементного базиса для построения дискретных устройств однородных БИС, построенных на основе однородных сред и обеспечивающих аппаратную реализацию алгоритма функционирования дискретного устройства; 2) использование в качестве универсального базиса микропроцессоров, обеспечивающих программную реализацию алгоритма функционирования дискретного устройства. Хотя использование БИС представляется достаточно перспективным направлением, в настоящее время в основном практическую реализацию получил второй из этих принципов [8].

Организуем однородную вычислительную структуру (ОВС) на уровне одноразрядных обрабатывающих элементов. Работа ОВС заключается в параллельной работе составляющих ее элементов (N элементов ОВС объединены в множество всех элементов S) и информационном обмене между ними. Рассмотрим в качестве аналога взаимодействия элементов ОВС информационную модель нейронной сети. Эту структуру представим в виде достаточно большого набора однотипных элементов, детерминированно связанных в пространстве и вероятностно — во времени. Подобную структуру удобно представить графом, узлами которого являются элементы s_i , а дугами — связи x_i между ними. Представляющая ОВС сеть не может быть определена детерминированно, так как элементы функционируют в условиях неопределенности (связи между элементами зависят от случайных факторов). Поставим число A_{ik} ($0 \leq A_{ik} \leq 1$) в соответствие связи между элементами s и s_k , оно будет представлять вероятность связи между этими элементами. Если выход элемента s_i имеет связь со входами элементов множества Q , то справедливо $\sum_Q A_{ik} = 1$ (1), т. е. сумма вероятностей связи элемента s_i со всеми элементами множества Q подчиняется условию (1). Для описания системы связи всей ОВС используем вероятностную матрицу $A = \|A_{ik}\|$, где $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, N}$. Матрица A в общем случае, когда каждый элемент ОВС может взаимодействовать с любым элементом из S , является квадратной и ее элементы подчиняются условию (1), т. е.

$$\sum_{i=1}^N A_{i,k} = 1 \quad \text{и} \quad \sum_{k=1}^N A_{i,k} = 1.$$

Для выполнения определенного алгоритма обработки информации элемент s_i взаимодействует с некоторым подмножеством элементов Q , где $Q \in S$. При этом выполнение условия $Q=S$ не обязательно. В данной модели организацию взаимодействия двух элементов берет на себя активный (генерирующий) элемент. Для установления канала связи не используется центральное управляющее устройство, здесь реализован предельный случай распределенного управления обменом информацией [9]. Каждый элемент модели в любой момент модельного времени может быть либо генератором сигналов, либо их приемником. Конкретное поведение зависит от предыстории и входных сигналов. Переход из состояния приема в состояние генерации возможен, если число принятых сигналов больше или равно порогу возбуждения. Придя в состояние возбуждения, элемент сам генерирует серию импульсов и тем самым «разряжается». Частота следования импульсов в серии подчинена нормальному закону распределения, т. е. на вход элемента s_i поступает простейший поток сигналов с интенсивностью λ_i . Сигналы посылаются случайным абонентам. Если сигнал принят, то генератор сигнала получает от приемника сигнала квитанцию — подтверждение о приеме. Времена приема и обработки сигналов каждым элементом из S независимы и имеют показательное распределение со средним значением $\tau_i = \frac{1}{\beta_i}$, где β_i — интенсивность обслуживания сигналов элементом. Понятно, что для устойчивой работы системы необходимо выполнение условия

$$\lambda_i < \min_S \{\beta_i\}. \quad (2)$$

Возможна ситуация, когда принимающий элемент находится в состоянии генерации. В этом случае сигнал не принимается (пропадает для системы) и квитанция не выдается. Генерирующий элемент взамен пропавшего сигнала посылает новый случайному адресату. При этом длина временного интервала между моментом генерации сигнала и получением на него квитанции носит случайный характер.

Интенсивность потока переходов в состояние приема элементами подмножества Q :

$$\beta = \sum_{i=1}^k \beta_i,$$

где k — количество элементов в подмножестве. Определим характеристики процесса обработки сигналов в подмножестве Q . Среднее число элементов, занятых обработкой сигналов:

$$\bar{\xi} = \frac{\lambda}{\beta} k. \quad (3)$$

Здесь λ — интенсивность потока сигналов на вход элементов из Q . Среднее число элементов, готовых к приему и обработке любого поступающего сигнала:

$$\bar{\delta} = \left(1 - \frac{\lambda}{\beta}\right) k, \quad (4)$$

где отношение λ/β представляет собой коэффициент занятости. Среднее время пребывания сигнала в очереди:

$$\bar{W} = \frac{\lambda}{\beta - \lambda}. \quad (5)$$

Из анализа выражения (5) ясно, что при стремлении коэффициента занятости к единице, т. е. при $\lambda \rightarrow \beta$, неограниченно увеличивается время пребывания сигнала в очереди [10]. Эта ситуация (неограниченно долгого поддерживания сигнала на выходе элемента) для принятого биологического прототипа невозможна из-за конечных энергетических ресурсов клетки.

Для устойчивой работы структуры, как уже отмечалось, необходимо выполнение условия (2), интенсивность потока сигналов на вход элементов подмножества λ должна быть меньше, чем интенсивность потока перехода элементов этого подмножества β в состояние готовности к приему. Элемент для приема сигнала затрачивает время t_c , для генерации сигнала — t_r , время ожидания прихода подтверждения о приеме сигнала — t_k . Полный цикл работы элемента подмножества от момента получения первого сигнала, приема сигналов до приема числа сигналов, равного пороговому значению (l — пороговое значение), возбуждения элемента, генерации серии сигналов (n — количество сигналов в серии) и отдыха составляет $T_j = t_c l + (t_r + t_k) n + t_o$, где t_o — интервал времени восстановления ресурсов элемента. Интенсивность потока переходов элемента s_j в состояние готовности к приему: $\beta_j = l/T_j$. Получим интенсивность переходов в состояние готовности к приему сигналов всех элементов подмножества Q :

$$\beta = \sum_{j=1}^k \beta_j = \frac{kl}{t_c l + (t_r + t_k) n + t_o}. \quad (6)$$

Интенсивность потока сигналов на вход элементов из Q :

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i = \frac{m}{t_r + t_k}, \quad (7)$$

где m — количество элементов, посылающих сигналы на подмножество элементов Q . Подставим выражения (6), (7) в выражение для коэффициента занятости элементов подмножества

$$\frac{\lambda}{\beta} = \frac{m}{t_r + t_k} \frac{t_c l + (t_r + t_k) n + t_o}{kl} = \frac{m}{k} \left(\frac{t_c}{t_r + t_k} + \frac{n}{l} + \frac{t_o}{(t_r + t_k) l} \right). \quad (8)$$

При значительном l величиной $\frac{t_0}{(t_r + t_k)l}$ можно пренебречь. Кроме того, для биологического аналога справедливо допущение $t_r = t_c = t$. Преобразуем выражение (8):

$$\frac{\lambda}{\beta} = \frac{m}{k} \left(\frac{1}{1 + \frac{t_k}{l}} \frac{n}{l} \right).$$

Для истинности условия (2) необходимо выполнение соотношения

$$\frac{m}{k} \left(\frac{1}{1 + \frac{t_k}{l}} + \frac{n}{l} \right) < 1. \quad \text{Отсюда} \quad t < t_k \left(\frac{ml}{kl - mn} - 1 \right)^{-1}. \quad (9)$$

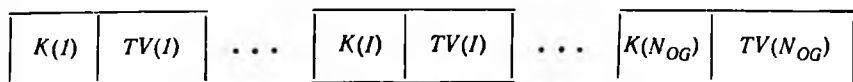
Таким образом, при сделанных допущениях для устойчивой работы элементов подмножества без пропуска сигналов необходимо выполнение условия (9). При невыполнении этого условия процесс приема сигналов элементами подмножества можно представить системой массового обслуживания с ограничениями, так как время «жизни» сигнала конечно. При этом происходит потеря сигналов, которые пробыли в очереди максимально допустимое время и не дождалась начала обслуживания приема.

Исследуем поведение ОВС на цифровой имитационной модели, так как аналитическое описание работы подобной системы невозможно, а аналоговое моделирование и макетирование крайне затруднено из-за большого количества составляющих систему элементов (порядка 600 микросхем средней интегральности на элемент). Работа модели заключается в параллельной во времени имитации поведения всех элементов ОВС. Реализация модели на ЭВМ последовательного действия предполагает применение серии специальных приемов для построения моделирующего алгоритма системы.

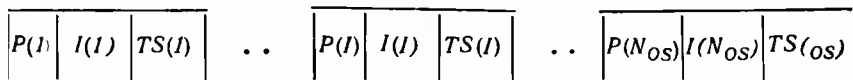
Алгоритм, моделирующий рассматриваемую систему, которая в полной мере относится к разряду сложных, построен с использованием композиции принципа «особых состояний» и принципа моделирования «по Δt ». Моделирующие алгоритмы, основанные на этих принципах, предложены и применены академиком Бусленко Н. П. [11]. Биологическая природа моделируемой системы и, как следствие этого, ряд особенностей, о которых говорилось выше, делают возможным использование подобных алгоритмов после доработок, учитывающих особенности моделируемой системы.

В процессе моделирования работы ОВС возбужденные элементы фиксируются в списке генерирующих элементов ОВ, а сигналы, ожидающие приема, — в списке сигналов, ожидающих обработки ОС. Текущее количество элементов-генераторов в системе обозначим $N_{OГ}$, число необработанных сигналов — $N_{OС}$. Каждое событие в системе характеризуется моментом времени, в которое оно наступает. Оба списка упорядочены по временам наступле-

ния событий (рис. 1). В списке $OG(a)K$ — номер элемента-генератора в системе; TV — текущее значение модельного времени элемента.



а



б

Рис. 1

В списке $OS(б)$: P — номер элемента, сгенерировавшего сигнал; I — номер элемента, которому сигнал адресован; TS — время появления сигнала, совпадающее с последним моментом моделирования элемента, сгенерировавшего сигнал.

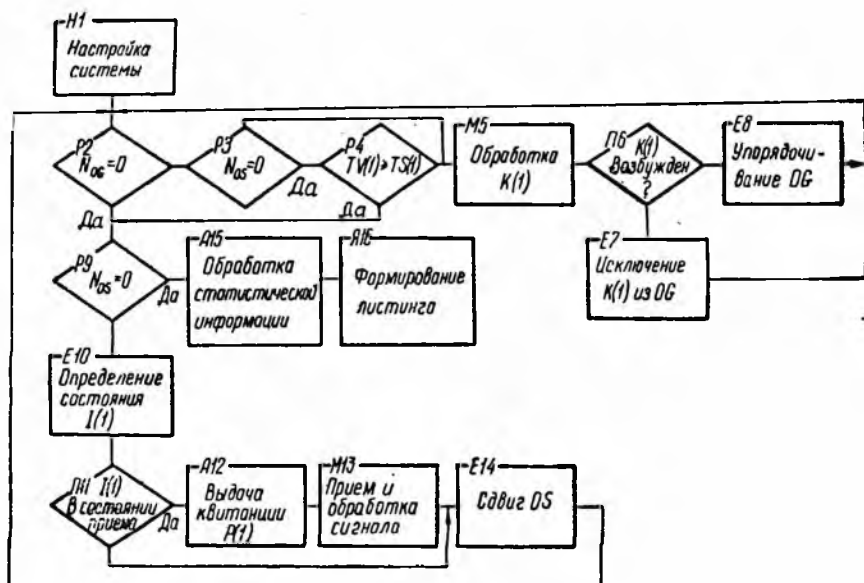


Рис. 2

Рассмотрим структуру моделирующего алгоритма (рис. 2) подробнее. Операторная схема его имеет вид

$H_1^{7,8,15} P_{2,9}^{13} P_{3,5}^{14} P_{4,15}^{18} M_5 \Pi_{6,17}^8 E_7 E_8^{2,4} P_{9,16}^{10} E_{10} \Pi_{11,14}^{12} A_{12} M_{13}^{11,13} E_{14} A_{15} Y_{16}^9$

Здесь приняты следующие обозначения: H — блок настройки системы; P — логический блок; M — моделирование поведения элементов ОВС; E — работа с очередями; Π — проверка состояния элементов ОВС; A — вычислительный блок; $Я$ — окончание моделирования и выдача результатов [11].

Настройка системы (блок H_1) зависит от цели ее функционирования и предполагает задание режима работы системы, закона распределения модельного времени, структуры связей между элементами, а также некоторых настраиваемых параметров модели (порогов возбудимости, числа импульсов в серии и пр.) Блок P_2 проверяет наличие в системе элементов, находящихся в состоянии возбуждения. Если таких элементов нет, то переходим к анализу очереди сигналов (блок P_3). При наличии элементов в состоянии возбуждения сравниваем модельное время первого элемента очереди генераторов и время генерации первого элемента очереди сигналов (блок P_4). В случае одинаковых значений сравниваемых времен приоритет при обработке имеет элемент очереди сигналов (в блок-схеме это соответствует переходу к блоку P_9), так как в тот же момент этот сигнал может быть принят и, возвратив квитанцию, он изменит тактику работы элемента-генератора с таким же значением модельного времени.

Возможен случай, когда в системе нет необработанных сигналов (например, в начале моделирования или когда обработка очередного сигнала серии завершена, но серия еще не закончена). При этом осуществляется безусловный переход к обработке особого состояния элемента-генератора. Проверку последнего условия выполняет блок P_3 и передает управление либо непосредственно блоку M_5 , либо блоку P_4 на сравнение времен. Если значение модельного времени элемента-генератора меньше, чем момент генерации первого элемента очереди сигналов, активизируется блок обработки состояния элемента-генератора (блок M_5). Здесь моделируется поведение возбужденного элемента до наступления следующего особого состояния, которое заключается в генерации сигнала и (или) переходе в невозбужденное состояние (моделирование сопровождается увеличением значения модельного времени на величину длительности обработки).

После обработки состояния возбужденного элемента он помещается в очередь генераторов согласно новому значению модельного времени (блок E_3). В блоке E_7 исключается из очереди генераторов невозбужденный элемент (любой элемент системы после генерации последнего сигнала серии переходит в невозбужденное состояние для восстановления своих ресурсов). Определение состояния элемента после последнего его моделирования и передачу управления по условиям выполняет блок Π_6 . Этими действиями завершается обработка очередного элемента-генератора и управление вновь передается блоку P_2 .

Когда в системе список генераторов исчерпан или невозможна обработка этого списка, приступаем к анализу состояния

списка необработанных сигналов. При непустой очереди сигналов обращаемся к первому элементу этой очереди и определяем: 1) состояние элемента-приемника к модельному времени прихода сигнала (блок E_{10}); ключом для поиска необходимой информации среди состояний всех элементов системы является атрибут $I(I)$; 2) возможность приема сигнала этим элементом (блок P_{11}). Сигнал обрабатывается только тогда, когда элемент находится в состоянии приема. Если элемент может принять сигнал, то прежде всего осуществляется посылка квитанции элементу-генератору, выдавшему сигнал (блок A_{12}). Возврат квитанции происходит без увеличения модельных времен элемента-приемника и элемента-генератора. Это допущение не влияет на тактику работы всей системы в целом, но позволяет оптимизировать моделирующий алгоритм, так как квитанция не заносится в очередь сигналов и не выполняются действия с очередями.

Затем этот сигнал принимается и обрабатывается (блок M_{13}), что может повлечь за собой изменение состояния принимающего элемента и связанное с этим перемещение этого элемента в очередь генераторов (если число принятых сигналов возбуждения достигло порога возбуждения). Так как обработку данного сигнала мы завершили, то его необходимо изъять из OS (так же поступаем, когда сигнал не может быть принят элементом — выход из блока P_{11}).

Выбор следующего сигнала будет заключаться в сдвиге очереди сигналов на один элемент влево. Первым опять будет элемент с минимальным значением времени (блок E_{14}). От блока E_{14} управление передается блоку P_2 и заново производится обработка списка генерирующих элементов, т. е. начинается новый цикл работы моделирующего алгоритма. Когда в системе не осталось необработанных сигналов и список генераторов исчерпан (система находится в устойчивом состоянии), обрабатываем накопленную в процессе моделирования статистическую информацию (блок A_{15}), формируем листинг результатов моделирования и завершаем работу (блок Y_{16}).

Предложенный алгоритм позволяет, варьируя перестраиваемыми параметрами, качественно исследовать поведение многофункциональной модели ОВС в различных режимах ее функционирования.

Список литературы: 1. Дернак А. Сверхбольшие интегральные схемы потрясают основы архитектуры ЭВМ. — Электроника, 1979, № 11, с. 27—53. 2. Поспелов Д. А. Введение в теорию вычислительных систем. — М.: Сов радио, 1972. — 280 с. 3. Турута Е. Н. Мультимикроспроцессорные системы. — Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 3, с. 3—26. 4. Амосов Н. М., Качаткин А. М., Качаткина Л. М. Автоматы и разумное поведение. — К.: Наук. думка, 1973. — 375 с. 5. Иванов-Миролюбов К. О., Павленко М. Г. Информация, мозг, жизнь. — К.: Рад. школа, 1979. — 88 с. 6. Мегун Г. Бодрствующий мозг. — М.: Мир, 1965. — 211 с. 7. Parkinson D. An introduction to array processors. — System international, 1977, 5, № 9, p 21—23. 8. Макглин Д. Микропроцессоры. Технология, архитектура и применение. — М.: Энергия, 1979. —

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН

О МЕХАНИЗМЕ РЕГУЛЯЦИИ МИКРОЦИРКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ. СООБЩЕНИЕ 2

Периферическая или микроциркуляторная сосудистая система кровообращения (МС) является тем завершающим звеном в сердечно-сосудистой системе (СС), на которую в конечном итоге работают все ее остальные уровни, включая сердце и центральную систему кровообращения. Именно МС ответственна за транскапиллярную функцию, обеспечивая процессы метаболизма и тканевого гомеостатического равновесия. Более того, МС в соответствии со своим функциональным режимом задает режим работы всей СС. Поэтому вполне справедливо замечание В. А. Левтова о том, что «центральная регуляция всегда настраивается на непрременном базисе местных регуляций» [1, с. 153]. Это значит, что понимание механизма регуляции МС служит ключом к раскрытию механизма регуляции всей СС, в том числе и системы центрального кровообращения.

Принято считать [2, 3], что МС формируется не только капиллярной и прекапиллярной системой, но и мелкими сосудами мышечного типа, калибр которых не превышает 200 мкм. Поэтому анализ регуляции МС должен включать оценку регуляции процессов, происходящих в сосудах мышечного и немышечного типа, что уже само по себе указывает на наличие в МС разных форм регуляции, связанных как с нервнопроводниковой иннервацией, так и с гуморальной. О дифференцированной регуляции тонуса сосудов через указанные формы свидетельствуют и морфологические данные, связанные с постепенным уменьшением мышечного слоя стенок сосудов, вплоть до их полного исчезновения на стенках капилляров [2, 3]. В то же время мышечные структуры рассматриваются как основные исполнительные (эффекторные) звенья, управляемые нервно-импульсными посылками. Поэтому сам факт наличия мышечного слоя на стенках сосудов и его состояние может указывать на преимущественную степень той или иной формы регуляции. Так, по данным [2], начиная с метартериол, толщина калибра которых 20—30 мкм, а мышечный слой заметно выделяется, имеет место в основном нервно-проводниковая регуляция. Наши [4, 5] экспериментальные данные по калиброметрии отдельных сосудов МС (в частности, эписклеральных сосудов глаза) с применением бескон-

тактного фотоэлектронного сканирующего метода, дают наглядное представление о толщине мышечного слоя и величине просвета у сосудов, начиная с 40 мкм и выше (рис. 1).

МС в общем виде можно представить как совокупность разных по конструктивной организации, определяемых спецификой органов, микрососудистых русел (МР). Каждое из них «является местом, где в конечном счете реализуется транспортная функция сердечно-сосудистой системы и обеспечивается трансапиллярный обмен, создающий необходимый для жизни тканевый гомеостаз» [2, с. 3]. Типичная схема МР, согласно [2, 4], представлена на рис. 2. Таким образом, анализ регуляции МС должен быть направлен в конечном итоге на понимание механизмов регуляции МР, выполняющего в МС роль ее функциональной единицы. В то же время анализ литературных данных показывает, что проблема регуляции МС является одной из актуальных в физиологии кровообращения.

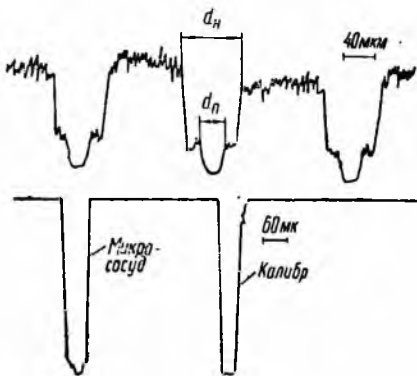


Рис. 1

«Ясно, что вопрос о регуляторных механизмах является важнейшей составной частью проблемы микроциркуляции» [2, с. 413]. А в свете последних достижений по исследованию МС [2, 3] она приобретает и большую практическую значимость. Накопившийся к настоящему времени разрозненный экспериментальный материал убедительно свидетельствует о том, что регуляция МС является многоуровневой и обеспечивается несколькими формами регуляции, включая метаболическую, нервнопроводниковую, гуморальную и нервнотгуморальную. Задача состоит в том, чтобы четко определить контуры регуляции каждой из перечисленных форм и тем самым попытаться представить схему регуляции МС в виде единой многоуровневой системы. Рассмотрим каждый из перечисленных видов регуляции отдельно.

Контур 1 регуляции на участке МР, включающего клетки органа 1 (КО), капилляры 2 (К_а), прекапиллярный сфинктер 3 (ПС_ф), прекапилляр 4 (М), артериолу 5 (А_р) со стороны артериальной системы кровообращения и капиллярные венулы 6 (КВ), венулу 7 (В) со стороны венозной системы. Согласно существующим представлениям, регуляция МР и, в частности, его участка от группы клеток органа до сфинктера подчиняется, главным образом, метаболическому механизму регуляции, в котором в качестве пускового сигнала принято считать изменение концентрации метаболитов. При этом предполагается, что про-

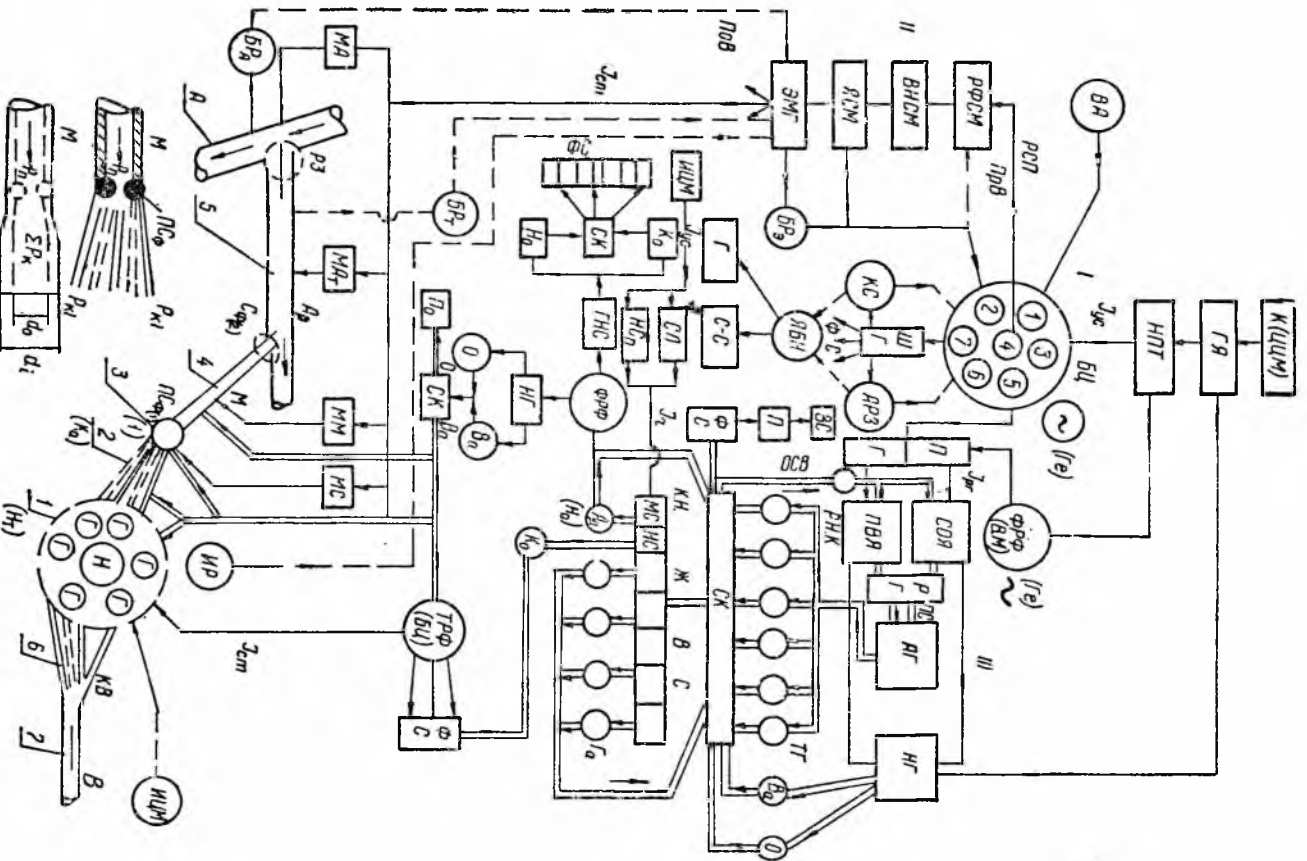


Рис. 2

дукты метаболизма, накапливаясь в межклеточной среде, воздействуют на стенки резистивных сосудов и, в частности, A_p и PC_f . Последние при наличии достаточной концентрации вазоактивных метаболитов из-за расслабления их гладких мышц увеличивают внутренний калибр русла сосуда и сфинктера и тем самым создают условия для усиленного кровотока, а вместе с ним и вымывания метаболитов из межклеточной среды. С уменьшением концентрации последних сосуды снова суживаются. По мнению И. П. Демченко, «этот процесс может носить строго периодический характер даже в условиях равномерной кинетики метаболизма» [6, с. 11]. Правда, представленный в таком общепринятом виде метаболический механизм регуляции не позволяет объяснить наличие коротких латентных периодов (1—2 с) в перестройке режима регуляции МР с весьма длительными периодами (10 с и более) накопления метаболитов, способных вызвать вазодилатацию [6].

При оценке регуляции этого контура будем исходить из двух основных фактов: тезиса И. П. Павлова о том, что «каждый орган находится под тройным нервным контролем», и экспериментальных данных, свидетельствующих о тесной взаимосвязи на клеточном уровне функций, метаболизма и кровоснабжения. Рассматривая регуляцию МР по аналогии с автономной системой замкнутого контура автоматического регулирования, прием в качестве входного сигнала, изменяющего режим регуляции МР, изменение активности метаболического процесса Δm органа и, в частности, той группы его клеток, на которые ориентировано МР. При этом будем иметь в виду, что изменение Δm сопровождается потреблением объема кровотока ΔV , т. е. $\Delta V = k \Delta m$. В свою очередь, ΔV обеспечивается изменением скорости кровотока V_k и, в частности, эритроцитов в капиллярах. Сама же величина V_k зависит от тонуса прекапиллярного сфинктера T_c , определяющего диаметр его просвета d_c , калибра просвета метартериолы d_m , калибра капилляров d_k , числа функционирующих капилляров n , перепада между давлением в метартериоле p_m и давлением в капиллярах p_k , перепада между давлением в капиллярах и давлением в капиллярных венулах p_v , эрологических свойств крови \mathcal{E} и в первую очередь ее вязкости V_v , а также электрических свойств крови, включая степень электрического заряда эритроцита e . Поэтому в общем виде изменение ΔV можно представить в виде функции

$$\Delta V = f[V_k, T_c, d_m, d_k, d_c, n, \mathcal{E}, V_v, e(p_m - p_k), (p_k - p_v)]. \quad (1)$$

Реализация же самой транскапиллярной функции в значительной степени определяется величиной ΔV , участием гормонов Γ и нейромедиаторов H_m : $T_\phi = f(\Delta V, \Gamma, H_m)$ (2).

Таким образом, изменение Δm можно рассматривать как основной критерий, по которому осуществляется регуляция МР и МС, а в конечном итоге всей СС. Кроме того, сама активность метаболического процесса M находится под контролем актив-

рующей функции ретикулярной формации РФ и, в частности, того ее участка, активирующая импульсация с которого J_p по строго дифференцированным его волокнам ориентирована именно на данный орган, в том числе и группу его клеток, с которой сопряжено МР. В общем виде запишем: $M = kJ_p$; $\Delta m = \Delta J_p$ (3).

Из уравнения (3) видно, что изменение Δm является следствием изменения J_p на ΔJ_p . Поэтому управляющим сигналом контура регуляции МР более правильно считать ΔJ_p , который вызывает изменение метаболического процесса на Δm , а вместе с ним и изменение режима регуляции МР. Само же изменение ΔJ_p может быть вызвано (различными факторами) через парасимпатическую и симпатическую нервные системы.

Регуляция МР, как и целого ряда других функциональных систем организма, начиная от малых и кончая большими, построена в виде биологического варианта многоконтурной системы связанного автоматического регулирования, в которой каждый из ее контуров имеет свои специфические особенности. Так, регуляция участка 1—3 МР построена преимущественно по принципу обычной гидродинамической схемы, т. е. на возникновении перепадов давления, а вместе с ними изменении кровотока на этом участке. При этом не исключается нервный контроль ПС_ф и КО как в рамках местных рефлекторных дуг МРД, так и со стороны высших центров (рис. 2). Гидродинамическую схему регуляции участка 1—3 МР можно представить следующим образом. С ростом Δm и к 4 М подключаются резервные K_n (пунктир на рис. 2) и возрастает скорость кровотока в 4М.

Сравним процесс метаболизма по отношению к МР с действием всасывающей помпы. При подключении резервных K_n их суммарное русло вместо первоначального d_0 станет d_i . Перепад же русла с d_0 на d_i в соответствии с правилами гидродинамики при наличии постоянного давления p_m в 4 М приведет к уменьшению напора крови в капиллярной сети и величины давления в отдельном K_n . В результате образуется перепад давления $\Delta p_n = p_m - p_k$ между 4 М и K_n , а с другой стороны, $\Delta p_a = p_a - p_m$ между A_p и 4 М. С появлением Δp_n и Δp_a возрастает напор крови из 4 М в капиллярную сеть, а это, в свою очередь, приводит к механическому расширению калибра ПС_ф. Таким образом, между Δm и калибром d_c ПС_ф существует зависимость $d_c = K \Delta m$ (4). Причем изменение d_c по формуле (4) может происходить и без изменения тонуса ПС_ф, обусловленного нервно-проводниковой и гуморальной регуляцией. При этом само изменение d_c под влиянием Δm обусловлено чисто гидромеханическими факторами. Хотя может создаться впечатление, что сфинктеры «управляются по принципу обратной связи тканевыми метаболитами» [2, с. 280]. С увеличением d_c повышается расход крови из 4 М в капиллярную сеть, что, в свою очередь, приводит к возрастанию Δp_a . Понятно, что при такой гидромеханической схеме регуляции колебания d_c будут следовать с некоторым временным сдвигом Δt за изменением Δm . Сам же тонус ПС_ф регулируется нервнопроводниковой регуляцией, а суммар-

ные колебания его d_c обусловлены не только процессами метаболизма, но и флюктуациями контуров, формирующих тонус ПС_ф с их суточными и сезонными ритмами, включая влияние на них коры и, в частности, ее структур, ответственных за интегративную деятельность мозга ИЦМ (рис. 2).

Рассматривая регуляцию МР, нельзя не упомянуть о самой сути транскапиллярной функции ТФ и ее регуляции. Наши размышления по этому вопросу привели к следующей схематичной интерпретации (с точки зрения регуляции) транскапиллярного обмена и, в частности, передачи кислорода O_2 с эритроцита Э нейрону Н. Предположим, что на пути капилляра, по которому движутся Э, размещено несколько Н со своими глиями Г (рис. 3).

Помимо, что Г выполняют функцию переносчика O_2 от Э к Н. При прохождении Э мимо Н каждая из его глий забирает у одного Э свою квантовую порцию O_2 в виде $b O_2$ и передает ее Н. Пусть за время bt глии одного Н набирают для него суммарную порцию кислорода $\Sigma b O_2$, необходимую для его функционирования в соответствии с режимом, задаваемым ему импульсацией со стороны ретикулярной формации (РФ).

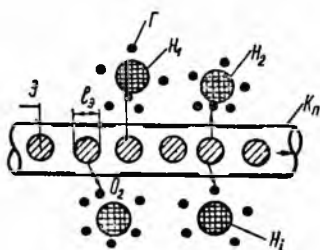


Рис. 3

Значение $\Sigma b O_2$ можно рассматривать как определенный энергетический запас E_n нейрона. При наличии такого запаса вокруг Н создается определенный электрический потенциал E_n , возможно, отрицательного знака, если иметь в виду, что заряд Э e , насыщенного O_2 , также имеет отрицательный потенциал. Понятно, что Э, проходя мимо такого Н, будут взаимно отталкиваться с силой $q = \frac{E_n e}{r^2}$. Поэтому передача O_2 эритроцитами этому Н временно, пока он не израсходует своей E_n и вокруг него не возникнет электрическое поле с положительным зарядом, прекратится. Поэтому Э вынужден будет «искать» на своем пути новый Н с положительным зарядом, чтобы отдать ему часть своего запаса O_2 , которую успели у него забрать глии Н при его прохождении мимо нейрона.

Таким образом, передача запасов O_2 , имеющихся у каждого Э, осуществляются, видимо, не сразу и не одному Н, а путем отдельных квантовых порций $b O_2$, которые забирают у него глии нейронов, встречающихся на пути его движения. Понятно, что чем выше линейная скорость движения Э (V_3), тем быстрее он отдает свои запасы O_2 , тем более активной становится ТФ, а вместе с ней и процесс метаболизма. Если условно принять время прохождения одного Э мимо Н за $t_3 = \frac{l_3}{V_3}$, то за период

Т мимо этого нейрона пройдет число Э $N_3 = \frac{T_3}{t_3}$. При $N_3 =$

=const получим $N_0 = kV_0$. Отсюда следует, что чем больше за время T проходит мимо N эритроцитов, тем быстрее его глии обеспечат ему ΣBO_2 .

При описанной выше сугубо ориентировочной схеме взаимодействия Э с Н, не говоря уже об электрическом взаимодействии эритроцитов между собой, трудно ожидать плавности в движениях Э. Поэтому наличие «прерывности движения крови в отдельных капиллярах» [2], обусловленное указанными выше взаимодействиями, можно рассматривать, с одной стороны, как подтверждение рассмотренной выше схемы, а с другой — как результат квантовых процессов, формирующих транскапиллярную функцию МС. Понятно, что с уменьшением V_0 возрастает сопротивление МС, а вместе с ним и величина диастолического давления. Особенно это резко проявляется при наличии агрегации эритроцитов и повышенной вязкости крови. Последние факторы в определенной степени зависят от уровня насыщенности Э кислородом, т. е. их способности на текущий момент аккумулялировать O_2 в легких.

Таким образом, скорость кровотока в капиллярах является надежным индикатором активности транскапиллярной функции, а вместе с ней и процесса метаболизма. И в этом смысле можно согласиться с выводом К. П. Иванова о том, что «колебания скорости кровотока в капиллярах обусловлены физиологическими колебаниями потребностей в кислороде нервных клеток» [7, с. 790].

Контур II регуляции МР связан с нервнопроводниковой иннервацией МР и прежде всего ПС_ф, А_р и 4 М. Можно предположить исходя из гистологических данных [3], что тонус этих элементов обеспечивается в основном симпатической нервной системой (СНС) и с участием таких местных факторов, как упругость самой мышечной ткани, регуляция их тонуса в рамках МРД и др. На последние факторы указывают многие авторы. Так, по мнению П. Конради, «в денервированных сосудах сохраняется местная регуляция тонуса» [8].

Нами на основе анализа литературных данных разработана схема нервнопроводниковой регуляции элементов МР в виде нескольких уровней (рис. 2). Самый высший уровень I находится в бульбарном центре (БЦ), связанном с ретикулярной формацией продолговатого мозга (РФП_{рМ}) [8]. Последнюю мы рассматриваем как биологическую электростанцию нашего организма, непрерывно генерирующую нервную импульсацию в виде тонических и физических нервных импульсных посылок. Причем тоническая импульсация генерируется тонической РФ, а физическая — физической РФ.

Можно предположить, что тоническая РФ преимущественно связана с СНС, а физическая — с парасимпатической. По-видимому тоническая РФ преимущественно размещена в продолговатом мозгу, в том числе БЦ. Поэтому исходный генерирующий сигнал $J_{ст}$, определяющий тонус мышечных сосудов с нервной

иннервацией, зарождается, очевидно, в БЦ. При этом РФ мы представляем в виде отдельных локальных групп клеток, каждая из которых рассматривается нами как энергетический узел, активизирующая функция которого направлена на свои дифференцированные участки организма. Причем каждая отдельная группа генерирующих нейронов РФ замыкается на свою группу ядер, связанных с ней и выполняющих роль усилителей слабых энергетическому потенциалу сигналов, генерируемых нейронами РФ.

В случае такой организации РФ создается возможность при относительно слабом ее энергетическом потенциале оказывать через ядра активирующую функцию на довольно большие участки организма. Из БЦ по ретикуло-спинальным путям (РСП) $I_{ст}$ направляется на более низкий уровень II вазомоторной системы, роль которого выполняют спинальные центры. Автор допускает, что на уровне II имеется своя спинальная РФ. Поэтому сигнал $I_{ст}$ поступает либо на клетки ретикулярной формации спинного мозга (РФСМ), либо через вставочные нейроны спинного мозга (ВНСМ) на ядра спинного мозга (ЯСМ). Там он усиливается и направляется на экстрамуральные симпатические ганглии (ЭМГ), где, мультиплицируясь, по постганглионарным волокнам ($П_0В$) приходит на эффекторные органы, роль которых выполняют мышечные волокна сосудов, в том числе А, А_р, М, ПС_ф. Действие сигнала $I_{ст}$ направлено на растяжение мышечных волокон, т. е. вазоконстрикцию, под действием которой создается их нейрогенный тонус и изменяется просвет кровяного русла в сторону его уменьшения. Причем чем выше тонус, тем меньше становится калибр просвета сосудов, т. е. тем больше вазоконстрикция сосудов. Эту закономерность можно представить в виде функции

$$d_c = f(1/I_{ст}).$$

Наличие РФСМ позволяет осуществлять регуляцию периферических сосудов автономно, в рамках II уровня вазомоторной системы. При этом генерирующий сигнал $I_{тcc}$ этого уровня, определяющий тонус периферических сосудов, формируется на уровне РФСМ и далее проходит по указанному выше пути. Аfferентные сигналы I_{ac} с барорецепторов артерий (БР_а), барорецепторов артериол (БР_т) и, возможно, метартериол (БР_м) замыкаются в рамках МРД через ЭМГ. В свою очередь, аfferентные сигналы с рецепторных окончаний барорецепторов (БР_а) ЭМГ, характеризующих функциональное состояние ганглия, вероятно, замыкаются через РФСМ, а возможно, и через БЦ.

Надо полагать, что аfferентная симпатическая (тоническая) иннервация направлена не только на эффекторы, но и на сами рецепторы, формируя их пороговую чувствительность в зависимости от внешней и внутренней ситуации. Поэтому от БЦ направляется также генерационный сигнал $I_{тр}$, который через

шейный симпатический узел (ШГ), а возможно, и другие спинальные узлы поступает на рецепторы каротидного синуса (КС) и аортальной рефлексогенной зоны (АРЗ). В свою очередь, афферентные сигналы $I_{арз}$ с КС и АРЗ поступают на ядра блуждающих нервов (ЯБН), модулируя активность их физических эфферентных посылок в адрес эффекторных звеньев, связанных с ними, в том числе мышц сосудов и сердца.

Представляет особый интерес действие фазической импульсации (ФИ) на сосуды, хотя до настоящего времени окончательно не решен вопрос о наличии дифференцированного воздействия тонической и фазической нервной импульсации на мышцы сосудов, тем более сосудов МР. Правда, А. Гидиков считает, что «каждая мышца, как правило, иннервируется как тоническими, так и фазическими мотонейронами [10, с. 70]. Тем не менее анализ показывает, что между тонической и фазической импульсациями (несмотря на их диаметрально противоположные действия на изменение калибра просвета сосудов) существует определенный физиологический смысл, направленный на реализацию единой цели. Создается впечатление, что тоническая импульсация регулирует динамический диапазон фазической системы. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующем сообщении. Для фазической импульсации должен быть свой нервный путь, который, вероятно, связан с парасимпатической нервной системой. Более того, ФИ помимо рефлекторных дуг должна управляться командами, поступающими на ее фазические ядра и исходящими преимущественно из зон мозга, ответственных за его интегративную деятельность (ИЦМ). Причем путь фазических волокон, также как и тонических, может проходить через СМЯ, где происходит дополнительное усиление ФИ.

Контур III регуляции связан с гипоталамо-гипофизарной системой (ГТС), а его управляющие сигналы в виде гормонов, ориентированных на сосудистую систему, направлены преимущественно на сосуды МР, в которых отсутствует или слабо выражена нервно-проводниковая иннервация. Для отдельных элементов МР свойственна смешанная форма регуляции, на что указывает А. М. Чернух [2], подробно характеризуя при этом степень участия той или иной формы регуляции в отношении каждого элемента МР. Мы предполагаем, что регуляция МР со стороны ГТС также осуществляется в тонической и фазической формах. Причем каждая из них формируется своим контуром регуляции нейроэндокринной системы. Можно предположить, что в организации исходного тонуса $ПС_{ф}$, М, В, а возможно, и $K_{п}$ с КВ, помимо нервнопроводниковой иннервации, принимают участие и ГТС с нейрогипофизом (НР) через его гормон вазопрессии (V_a). Этот агент можно рассматривать как одно из промежуточных средств, с помощью которого обеспечивается возможность продолжения нервного влияния на МС со

стороны ЦНС, но уже не в виде нервного импульса, а в форме химического субстрата. При такой трансформации для ЦНС создается возможность держать под своим контролем даже такие терминальные системы организма, как МС. И в этом смысле можно согласиться с авторами, утверждающими, что «вазоактивные вещества являются важнейшими элементами системы местной саморегуляции..., именно через них осуществляется связь центральных регуляторных механизмов с системой местной саморегуляции» [2, с. 301]. Подобная структурная связь ЦНС с ГТС (и в частности с НГ) диктуется слабым уровнем энергетического потенциала РФ. Если бы к РФ через нервно-проводниковую связь была подключена и МС, то ее энергетический потенциал должен был бы резко возрасти, не говоря уже о необходимости создания сложной нервнопроводниковой сети. Поэтому в организме эволюционно организовалась еще и гуморальная форма связи, а роль регулятора с усилительной системой отведена ГТС с ее терминальным аппаратом в виде желез внутренней и внешней секреции. Таким образом, ТФ находится под активным контролем ГТС.

Тоническая форма регуляции МС со стороны ГТС осуществляется, вероятно, через НГ и его гормон вазопрессин. Причем выделение последнего находится под контролем РФ гипоталамуса (РФГ), нервная импульсация $I_{рг}$ которого действует на нейросекреторные клетки (НСК). Последние выделяют вазопрессин, который далее по гипоталамо-гипофизарному нервному пучку (ГНП) трансформируется к НГ, где он в виде излишков депонируется, а другая его часть непрерывно выделяется в систему кровообращения (СК), осуществляя регуляцию на уровне МС. При стрессовых ситуациях подключается гипоталамо-адреналовая (ГАС) и гипоталамо-гипофизарно надпочечниковая система (ГГНС). Схематично взаимодействие между этими системами при стрессах можно представить следующим образом. Управляющий сигнал I_{yc} из ИЦМ по чревному нерву (ЧН) поступает на мозговой слой ($МС_{л}$) коры надпочечников (КН) $I_{ч}$. Под действием I_{yc} в СК выбрасывается адреналин ($A_{д}$), выполняющий роль своеобразного «горючего» для РФ, с помощью которого резко усиливается способность РФ. Роль $A_{д}$ можно сравнить с действием ФИ, а саму ГАС можно рассматривать как фазическую систему ГТС. Кроме того, $A_{д}$ резко усиливает работу сердца. Понятно, что при возросшей функции сердца — I уровня СС создается опасность для III уровня СС (МС) с точки зрения ее перегрузки. Чтобы исключить это, в ГТС должна выработаться защитная реакция для МС, и она действительно существует. Она проявляется, с одной стороны, в виде усиленной вазоконструкции сосудов МС в рамках контура II регуляции, а с другой — через увеличенный выброс вазопрессина (В) и норадреналина (H_0).

Если принять, что H_0 повышает проводимость синаптических

передач, то он тем самым повышает эффективность II контура регуляции, уменьшая латентные периоды тонической системы в обеспечении вазоконстрикции сосудов. Вазопрессин же, увеличение выброса которого достигается за счет повышения активности РФ, а также действием сигнала из ИЦМ на НГ, вазоконстрикторную функцию МС выполняет, видимо, непосредственным воздействием на мышечные клетки сосудистой системы, а характер его длительного действия на них объясняется, вероятно, его высокой аккумуляционной способностью в клетках стенок сосудов.

Сам факт депонирования вазопрессина в НГ дает основание считать, что последний используется не только в режиме спокойного состояния организма, но и при его длительной повышенной мобилизации, а также при стрессовых ситуациях. Именно при наличии запасов вазопрессина в НГ обеспечивается возможность быстрой и адекватной реакции МС в ответ на форсированный режим ГГАС. При такой постановке вопроса логично предположить, что управление НГ должно осуществляться не только со стороны гипоталамуса через нейросекреты, но и со стороны коры (ИЦМ) через нервнопроводниковую иннервацию. Разумеется, что в регуляции элементов МР принимают участие и другие гормоны и медиаторы.

Список литературы: 1. Левтов В. А. Химическая регуляция местного кровообращения.— Л.: Наука, 1967.—198 с. 2. Чернух А. М., Александров П. Н., Алексеев О. В. Микроциркуляция.— М.: Медицина, 1975.—456 с. 3. Куприянов В. В., Жица В. Т. Нервный аппарат кровеносных сосудов головного мозга.— Кншпинев: Штинца, 1975.—224 с. 4. Ананин В. Ф., Артемов Е. Н. Прибор для регистрации динамики калибра сосудов конъюнктивы склеры глаза.— Оптические приборы (тр. ВЗМИ), 1972, с. 46—48. 5. Ананин В. Ф. Автоматизированная система по оценке зрительного утомления.— Космич. биология и авиакосмич. медицина, 1978, № 1, с. 73—75. 6. Демченко И. П. Локальное кровоснабжение бодрствующего мозга; Автореф. дис... д-ра мед. наук.— Л., 1978.—38 с. 7. Иванов К. П., Кисляков Ю. Я. Динамика изменений pO_2 в тканях мозга при физиологических колебаниях скорости кровотока в капиллярах.— Физиолог. журн., 1980, 66, № 6, с. 783—790. 8. Конради Г. П. Регуляция сосудистого тонуса.— Л.: Наука, 1973. 9. Хаютин В. М., Сохина Р. С., Лукашкова Е. В. Центральная организация вазомоторного контроля.— М.: Медицина, 1977.—351 с. 10. Гидиков А. О. О существовании тонических и фазических двигательных единиц в мышцах человека и о различной афферентной организации их активности.— Сенсорная организация движений, 1975, с. 70—82.

Поступила в редколлегию 12.05.81.

УДК 510.62

А. Т. АШЕРОВ, Е. В. ИЛЬЧЕНКО, М. И. ФАЙНЮД

МОДЕЛИ ПОТЕРЬ ОТ НЕНАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ЭРГОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Опишем оценку влияния производственных возмущений, вызванных ненадежностью эргатических элементов в управленческих эрготехнических системах, на значения технико-экономи-

ческих показателей. Термин «управленческие эрготехнические системы» введен как расширение понятия «автоматизированные системы управления (АСУ)» с целью охвата вариантов управленческих систем, не являющихся по наименованию автоматизированными системами управления, но являющихся человеко-машинными системами: промышленных информационно-вычислительных систем, автоматизированных систем административной деятельности и др. Однако для конкретизации изложения все положения в тексте будут привязываться к АСУ.

Задача определения потерь от ненадежности АСУ вызвана необходимостью соотносить затраты на обеспечение надежности с реально достигнутым уровнем надежности АСУ. Одной из составляющих этих потерь являются потери из-за ненадежности эргатических элементов. Среди множества эргатических элементов, являющихся составными частями элементов расчета надежности АСУ, наибольшее влияние на эффективность оказывают эргатические элементы, являющиеся субъектами труда в технологических процессах обработки информации (ТПОИ). Поэтому изложение ведется в расчете на эти элементы.

Частичное решение задачи определения потерь из-за ненадежности эргатических элементов получено в работах С. С. Брудника, А. А. Воронова, Ю. В. Чистякова и др. [1—4]. Однако слишком большая общность рекомендуемых предложений не позволяет использовать выведенные ими зависимости при инженерных расчетах. Предлагаемые в данной статье модели потерь от ненадежности могут использоваться при разработке надежных ТПОИ в АСУ на стадиях технического и рабочего проектирования.

Структура потерь от ненадежности эргатических элементов АСУ. Ненадежность эргатических элементов АСУ приводит к прямым и косвенным потерям предприятия. Прямые потери связаны с увеличением стоимости обработки информации и тем самым (через общезаводские расходы) с себестоимостью продукции предприятия. Косвенные потери обусловлены снижением качества управления. Снижение качества управления может отразиться на деятельности других предприятий, связанных в процессе производства с рассматриваемым. Этот вид потерь назовем народнохозяйственными.

Прямые потери складываются из дополнительных затрат, связанных с процессом обработки информации. Дополнительные затраты обусловлены превышением из-за ненадежности эргатических элементов нормативного уровня следующих элементов: заработной платы персонала АСУП (основной, дополнительной, отчислений на нужды социального страхования); амортизационных отчислений от стоимости технических средств; стоимости всех видов энергозатрат; стоимости носителей информации и вспомогательных материалов, необходимых для ухода за техническими средствами и их ремонтом.

Косвенные потери предлагается оценивать через вводимые модели неокончательных и окончательных потерь. Эти потери обусловлены ошибочными управляющими воздействиями, возникающими из-за ошибок в информации, несвоевременности ее обработки и дефицита информации при принятии решений. Ошибочные управляющие воздействия при неокончательных потерях исправляются с помощью дополнительных затрат на пересчет неправильных объемов информации (прямые потери) и на возвращение управляемого объекта в режим нормального функционирования. Это возвращение сопряжено с дополнительным расходом ресурсов, изменением плановых сроков выпуска продукции, плановых объемов выпуска. Окончательные потери по своим последствиям аналогичны неокончательным, но возвращение управляемого объекта в режим нормального функционирования за определенное время невозможно.

Модели прямых потерь. Ненадежность эргатических элементов в ТПОИ приводит к увеличению времени обработки информации для получения k -го вида документа, что соответственно отражается на увеличении стоимости обработки информации; времени ожидания информации потребителем в связи с необходимостью контроля выходных документов, что увеличивает затраты на контроль и передачу сообщений об ошибках.

Приращение затрат вследствие повышения стоимости обработки информации складывается из затрат на обработку информации и затрат на ликвидацию и предупреждение ненадежности эргатических элементов. Таким образом, $M[\Pi] = M\{Z_1\} + M\{Z_2\} + M\{Z_3\}$, где $M[\Pi]$ — математическое ожидание потерь из-за ненадежности эргатических элементов ТПОИ; $M\{Z_1\}$ — математическое ожидание дополнительных затрат на обработку информации; $M\{Z_2\}$ — математическое ожидание затрат на ликвидацию и предупреждение ненадежности эргатических элементов. Эта величина зависит от выбранного комплекса мероприятий по повышению надежности обработки информации; $M\{Z_3\}$ — математическое ожидание затрат на выходной контроль документов и передачу сообщений об ошибках и вносимых изменениях.

$M\{Z_1\}$ можно определить по формуле

$$\max(\min) Z_1 = \sum_{i=1}^3 U_{(i)} \left\{ M[t_i^B] \pm U_{\rho} \sqrt{\frac{D[t_i^B]}{V_i(t)}} \right\} + \\ + U_{(i=4)} \left\{ M[t_4^B] \pm U_{\rho} \sqrt{\frac{D[t_4^B]}{V_4(t)}} + M[t_n^B] \pm U_{\rho} \sqrt{\frac{D[t_n^B]}{V_n(t)}} \right\},$$

где $U_{(i)}$ — стоимость использования средств j -го типа, р./ч; $j = 1, 4$ (рассматриваются средства сбора и регистрации данных ($j = 1$), средства передачи данных ($j = 2$), средства накопления и выдачи результатов ($j = 3$); комплекс вычислительных средств ($j = 4$)); U_{ρ} — квантиль нормального распределения при двухсто-

ронней оценке с вероятностью $(1 - p)$; t_j^a , t_n^a — соответственно накопленные времена восстановления работоспособности и восстановления информации после отказов средств j -го типа (для $j = 1 - 3$) и отказов КВС ($j = 4$). Асимптотические характеристики t_j^a и t_n^a определяются по формулам

$$M[t_j^a] \sim T_{1j} / (T_{1j} + T_{2j}), \quad D[t_j^a] \sim T_{1j}^2 T_{2j}^2 \left(\frac{\sigma_{1j}^2}{T_{1j}^2} + \frac{\sigma_{2j}^2}{T_{2j}^2} \right) / (T_{1j} + T_{2j})^3 t.$$

Здесь $T_{1j(2j)}$, $\sigma_{1j(2j)}$ — соответственно математическое ожидание и дисперсия времен идеального функционирования и восстановления элементов; $V_j(t)$ — среднее число отказов средств i -го типа за время $(0, t)$; $V_j(t)$ может быть определено по формуле $V_j(t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_j^{(n)}(t)$, где $W_j^{(n)}(t)$ — закон распределения суммы n одинаково распределенных величин $v_j(t)$, равных числу отказов причины j к моменту t . Она определяется из условия $t_{v_j}(t) < t \leq t_{v_j(t)+1}$. Величина $v_j(t)$ может принимать только целые неотрицательные значения.

Приращение затрат $M[Z_3(k)]$, связанных с контролем информации, выяснением ошибок, формированием и доведением до потребителя информации о вносимых изменениях, составит по k -му документу величину

$$M[Z_3(k)] = C_k / H_k + \sum_{v \in V} P_v S_v + \sum_{\omega \in \Omega} Q_\omega S_\omega.$$

Здесь C_k — среднегодовая заработная плата одного работника, занятого контролем k -го выходного документа; H_k — норма выработки этого сотрудника (обычно берется в размере 0,02—0,05 дней/док.); P_v — вероятность того, что запрос по неправильной информации в k -м документе потребитель делает с использованием средств связи v -го типа (в том числе курьером); S_v — затраты на передачу одного такого сообщения; Q_ω — вероятность того, что об исправлениях в ранее переданной информации сообщают с использованием средств связи ω -го типа; S_ω — затраты на передачу одного такого сообщения.

Общую величину приращения затрат $M[Z_3]$ найдем суммированием составляющих по всем документам k в виде

$$M[Z_3] = \sum_k M[Z_3(k)].$$

Модели косвенных потерь из-за ошибок в информации. Основной единицей измерения информации, циркулирующей в АСУ, является показатель. При наличии ошибок в документах возможны три взаимоисключающих случая: ошибки только в призначной части рассматриваемого показателя; ошибки только в его реквизите-основании; ошибки как в призначной части, так и в реквизите-основании.

Ошибки в реквизите-признаке могут быть двух видов: показатель, который должен быть записан в выходной массив, записан в него не будет; в выходном массиве появился другой показатель, у которого реквизит-основание имеет то же значение, а один или несколько реквизитов-признаков — другие. При ошибке первого вида искаженное значение показателя будет обязательно обнаружено, так как его призначная часть лежит за пределами допустимых значений. Поэтому на величине общей погрешности скажется лишь отсутствие показателя, в призначной части которого допущена ошибка. Ошибку второго типа система контроля может не обнаружить.

Ошибки в реквизите-основании существенным образом влияют на общую погрешность в выходном документе из-за «цифрового содержания» реквизита. Веса искаженных разрядов реквизита-основания различны, соответственно и искаженные разряды оказывают различное влияние на конечный результат.

Если ошибка в реквизите-признаке относится к первому виду, неправильная запись будет отсутствовать и, следовательно, ошибка в реквизите-основании на конечный результат не влияет. Если ошибка в реквизите-признаке относится ко второму виду, неправильная запись пройдет к пользователю. Одновременно сохраняется вероятность ошибки в реквизите-основании.

Невыявленные ошибки ведут к возникновению окончательных и неокончательных потерь. Суммарная величина этих потерь может быть определена как $M[\Pi_{\text{ом}}^k] = \left(\sum_{j \in J_k} M[\Pi_{k,j}] M[\delta_{k,j}] \right) N_k^{\text{зан}}$,

где $M[\Pi_{\text{ом}}^k]$ — математическое ожидание неокончательных и окончательных потерь из-за ошибок в k -м документе; $M[\Pi_{k,j}]$ — математическое ожидание величины потерь, которые могут возникнуть в системе из-за ошибочного отклонения на единицу j -го показателя в k -м документе; J_k — количество показателей в k -м документе; $M[\delta_{k,j}]$ — математическое ожидание величины отклонения j -го показателя в k -м документе; $N_k^{\text{зан}}$ — количество записей, содержащихся в k -м документе; $M[\delta_{k,j}]$ определяется в результате экспертного анализа на конкретном объекте. $M[\Pi_{k,j}]$ может быть определена по следующей формуле: $M[\Pi_{k,j}] = P_{k,j}^n Z_{k,j}^n + P_{k,j}^0 Z_{k,j}^0$. Здесь $P_{k,j}^n$, $P_{k,j}^0$ — вероятность возникновения неокончательных (окончательных) потерь в j -м показателе k -го документа; $Z_{k,j}^n$, $Z_{k,j}^0$ — величина затрат по устранению нарушений из-за ошибок в j -м показателе.

Модели косвенных потерь из-за несвоевременности информации. Суммарную величину косвенных потерь из-за несвоевременности получения информации можно определить по формуле $M[M_{\text{н}}^k] = \sum_{j \in J_k} M[\Pi_{k,j}^n] N_k^{\text{зан}}$, где $M[\Pi_{k,j}^n]$ — математическое ожидание величины потерь, которые могут возникнуть в системе из-за несвое-

временного получения j -го показателя в k -м документе; $N_k^{3 \times n}$ — количество записей в k -м документе.

Определение $M[\Pi_{k,j}^n]$ аналогично определению $M[\Pi_{k,j}]$, только учитываются затраты на устранение нарушений из-за несвоевременного получения j -го показателя.

Модели косвенных потерь из-за дефицита информации. Для оценки потерь из-за дефицита информации сделаем следующие допущения. 1. Все эргатические элементы равномерно загружены в течение планового периода. 2. Информация разной ценности равновероятно распределена по всему объему перерабатываемой информации. 3. Дефицит информации η_u , возникающий вследствие ненадежной работы эргатических элементов, пропорционален объему информации, непоставленной лицу, принимающему решение, в установленные сроки, т. е.

$$\eta_u = \sum_{i=1}^M v_i^* (1 - k_{r_i}),$$

где M — мощность множества функциональных задач АСУ с учетом повторяемости их решения; v_i^* — объем информации, перерабатываемой по задаче; k_{r_i} — коэффициент готовности при решении задачи: $k_{r_i} = \prod_j \prod_{j'} \prod_s [k_{r_i}(j_s) + k_{r_i}(j's) k_{r_i}(j's)]$. $k_{r_i}(j_s)$ — коэффициент готовности j -го элемента, участвующего в обработке информации ($j \in m$) при реализации s -го оператора ($s \in s_i$) i -й задачи; $k_{r_i}(j_s)$ — коэффициент простоя j -го элемента; $k_{r_i}(j's)$ — коэффициент готовности j -го элемента, который может выполнить функции отказавшего j' -го средства без увеличения времени решения задачи.

Примем, что для каждого сообщения a , входящего в η , существует ценность информации $C(a)$. Суммарная ценность дефицита информации $C(\eta_u) = \sum_{a \in \eta_u} C(a)$. Получение $C(\eta_u)$ в абсолютной

форме возможно только для некоторых частных случаев. Например, если предположить, что дефицит информации, возникающий после r -го отказа элемента, вызывает простой технологического оборудования длительностью t^n и можно задать удельные потери (сумму окончательных и неокончательных) в виде $\omega_r(t^n)$, то

$$C(\eta_u) = \Delta G = \int_0^t P_r(t^n) \omega_r(t^n) dt^n.$$

Сделанные допущения дают основание предположить, что дефицит продукции связан с дефицитом информации зависимостью $\Delta G = C(\eta_u) \eta_u$, с учетом которой потери от дефицита информации

$$M[\Pi_{\partial,u}] = 0,6 C(\eta_u) \bar{G}(k) \left[\sum_i^M v_i^* (1 - k_{r_i}) / \sum_i^M v_i^* \right] (p),$$

где $M[P_{d,u}]$ — математическое ожидание потерь от дефицита информации; 0,6 — коэффициент потерь на 1 р. дефицитной продукции, принят по данным НИИ экономики и организации МТС [5]; $\bar{G}(k)$ — величина выпуска совокупного продукта.

На стадии проектирования АСУ можно принять $C(\eta_u) = 1$, считая, что вся информация абсолютно необходима для управления. Для некоторых случаев конкретный вид $C(\eta_u)$ рассмотрен в [6].

Список литературы: 1. Воронов А. А., Чистяков Ю. В. Аналитические методы выбора технических средств АСУ.— М.: Наука, 1976.—120 с. 2. Воронов А. А., Кондратьев Г. А., Чистяков Ю. В. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления. Разработка технического задания.— М.: Наука, 1977.—200 с. 3. Брудник С. С. Экономические основы надежности АСУП.— М.: Машиностроение, 1975.—108 с. 4. Кульгицкая Е. Г. Оценка величины потерь эффективности АСУ за счет отказов линий связи.— В кн.: Автоматизированные системы управления предприятиями.— К.: ИК АН УССР, 1978, с. 31—39. 5. Проценко О. Д. Планирование запасов в увязке с производственной программой на основе межотраслевого баланса производства и распределения продукции.— В кн.: Математические методы решения экономических задач. М.: Наука, 1972, с. 31—37. 6. Овсянников Ю. Б., Фридлянд Ю. С., Чайнов В. А. Об одном подходе к понятию «ценность информации».— Вопросы промышленной кибернетики, 1971, вып. 33, с. 12—19.

Поступила в редколлегию 25.12.81.

УДК [007 : 573.6].001.57

Н. И. ДЕНИСЕНКО

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АССОЦИАТИВНЫМ КЛАССИФИЦИРУЮЩИМ СРЕДАМ КАК МОДЕЛЯМ МОЗГОВЫХ СТРУКТУР

Классификация объектов, являясь основной частью более общей задачи — распознавания образов,— самая распространенная операция в реализации процессов управления в технических системах и живых организмах. Если классифицирующее устройство сигнальному образу или их классу ставит в соответствие также сигнальный образ в той же форме представления, то оно становится базовым элементом, на основе которого могут быть построены автоматы или их системы, обучающиеся на реализацию как вычислительных функций, так и функций естественного интеллекта. Именно в исключительной универсальности операции классификации представляется перспективность данного направления, а в важности решаемых задач с ее помощью — его актуальность.

Традиционные методы решения задачи классификации своей целью ставят построение разделительных функций. Тем самым, во-первых, обеспечивается лишь унитарное кодирование сигнальных многокомпонентных образов, во-вторых, каждому классу

ставится в соответствие своя разделительная функция, что предполагает реализацию этих функций на отдельных устройствах вычислительного типа или последовательного вычисления их на универсальной ЭВМ. Как известно, ни программы реализации феноменов психической деятельности, ни устройства, например, перцептроны, специализирующиеся на формировании явном либо структурном одной разделительной функции, проблему создания классификатора, как базового элемента построения обучающихся систем управления, решить не могут.

Наиболее рационально этот вопрос разрешен в центральной нервной системе млекопитающих. По многочисленным гистологическим и физиологическим данным, функции естественного интеллекта реализуются системно. В качестве составных частей этих систем выделяются мозговые структуры, функционирование которых так или иначе связано с осуществлением классификации объектов внешнего либо внутреннего миров, пространственных пространственно-временными распределениями электрической активности нейронов — паттернами. Выделены автономные паттерны как семантические коды психической деятельности [1].

В ряде работ, посвященных исследованию организации памяти, сделан вывод о ее распределенности по структурам [2]. Исследования физиологии нервных клеток показали многофункциональность нейронов, заключающуюся в формировании ответов на стимулы разной модельности [3], а формирование ответов структуры так или иначе связывается с проложением через структуру системы временных связей — рефлекторной дуги. При этом отводится главенствующая роль дендритическим взаимодействиям тел нейронов с окружающими клетками [4]. При исследовании нейронных популяций в процессе их реакций на сложные раздражители выявилось повышение интегративных свойств нейронов по мере углубления в мозговые структуры. Так, в опытах на восприятие вербальных раздражителей замечено, что нейроны верхнего слоя реагируют на отдельные звуки и фонемы. По мере углубления замечается реакция нейронов, коррелирующая со всем словом без явного отражения частотных свойств. Причем нейроны, реагирующие на определенные сочетания звуков, возбуждаются всегда, когда это сочетание присутствует в предъявленном испытываемому тесте [5].

Интересен факт, что по мере углубления в структуру степень интеграции нейронами повышается и их ответы начинают коррелировать с частью теста, а затем — и со всем тестом. Результатом восприятия теста является генерация кода-ответа в виде автономного паттерна со сжатым представлением породивших его паттернов составляющих теста. В этом, во-первых, проявляется голографический эффект в смысле несения частью носителя информации обо всем образе, во-вторых, просматривается многоступенчатость в классификации сигнального образа и выработки по ее результатам кода-ответа. Таким образом, в мозгу

осуществляется переход от «предметного» представления окружающего мира в область формального представления и оперирования понятиями, что составляет психический аспект деятельности мозга, а также абстрактными паттернами, что составляет кибернетический аспект в обычном для информационных систем представлении.

Приведенные результаты представляют собой психофизиологический подход, развиваемый на основе ассоцианистских представлений о «стимуле-реакции», в кругу которых и допускается существование внутренних стимулов и реакций, в частности в форме автономных паттернов. В том, что отделы мозга, ответственные за классификацию первичных (поступивших из внешней среды) образов, являются ассоциативными структурами (в основе функционирования их лежит образование ассоциаций активированных нейронов), подтверждается многими исследователями [4, 6]. В качестве элементарной единицы этих ассоциаций выделяются нейронные ансамбли [7], выполняющие роль носителей в фрагментарной теории Гебба [8].

На основании приведенных физиологических данных следует что пространственно-временная мозаика — паттерн — является распределением активности нейронов, наблюдаемым в сечении мозговой структуры. Другими словами, паттерновая организация реакции является следствием объединения (ассоциации) нейронов в рефлекторные дуги, пучности которой и представляют собой вероятностно-статистические (временные) ансамбли в их интерпретации [7].

Вовлечение смежных морфологических ансамблей нейрона в ответ на стимул осуществляется после того, как реакция нейронов данного ансамбля уже сформирована [9]. Поэтому процедура формирования рефлекторной дуги представляется как волновой процесс последовательной активации энграмм памяти нейронных популяций вглубь структуры. Основываясь на причинно-следственной связи стимула и реакции, следует вывод о непрерывности формируемых рефлекторных дуг. При этом информация о классифицируемом сигнальном образе может быть заключена в форме сигнальных путей, составляющих рефлекторную дугу. Время, необходимое для классификации одного объекта, равно времени прохождения волны активности через мозговую структуру [10].

Одно из основных свойств мозга — способность к обучению. Протекает обучение мозговой структуры, по данным [11], как минимум на основе двух входов: входа информации — нисходящий путь и входа управления — восходящий путь. Принцип двойственности в мозге закреплен и структурно. Наиболее яркий тому пример — строение сенсорных систем, где наличие нисходящих и восходящих путей, взаимодействующих между собой, является правилом [12]. В обобщение принципа двойственного представления — входного сигнального образа и прообраза кода-

ответа могут быть приведены и факты морфологического строения рецепторов и эффекторов [13]. Являясь граничными полюсами сенсорных систем, они не только выдают в систему первичный сигнальный образ или принимают из системы код-ответ, но и соответственно получают из системы вторичный (воспроизведенный) сигнальный образ или генерируют прообраз кода-ответа, используемые как для регуляции информационных потоков от рецепторов, так и участия в формировании встречных потоков, необходимых для протекания процессов обучения.

Особенно многообразны мнения исследователей относительно форм представления памяти в центральной нервной системе. Несомненным, с точки зрения экспериментальных данных, представляется присутствие жесткой (генетической) и гибкой (индивидуально приобретенной) памяти [14]. Большинство исследователей сходятся на том, что переход в долгосрочную память осуществляется через фазу краткосрочной памяти. Носителем краткосрочной памяти являются реверберационные и циклические процессы электродинамического характера, а функцию долгосрочной памяти связывают с синтезом белковых макромолекул в синапсоммах нейронов [15]. С точки зрения волновой нейродинамики краткосрочная память должна подразделяться на динамическую ориентирующую и динамическую кратковременную. Первая фаза краткосрочной памяти необходима для вовлечения структур в акт восприятия теста и заканчивается построением рефлекторной дуги (системы сигнальных путей между афферентами и эфферентами отдела мозга). Вторая фаза основана на удержании этой системы за счет реверберации и циклического процесса (повторения) — создает предпосылки для активации энграмм долгосрочной памяти и (или) подкрепления ее следов.

На основе приведенных результатов по электрофизиологии мозга уже в настоящее время можно осуществить попытку создания модели технической реализации процесса классификации, уподобляющейся естественной хотя бы в общих чертах.

Проведем описание модели в форме изложения требований к ее архитектуре и принципам функционирования.

Структурно модель должна представлять собой однородную среду, называемую далее классифицирующей, разделенную на ячейки. Архитектура среды должна быть представлена в виде однослойного или многослойного ансамбля ячеек со стохастическими связями.

В основу функционирования классифицирующей среды (КС) должны быть положены дискретные волновые процессы ассоциативного типа по подобию процессоров в волновых коммутирующих средах для сред с унитарным кодированием классов и по подобию мозговых структур для сред с комбинационным кодированием.

Операция классификации должна осуществляться системно. В этой связи КС уподобляется сенсорной системе с разделенным

или совмещенным представлением нисходящих и восходящих каналов обработки информации. Первый тип организации будем называть двухструктурным, а второй — одноструктурным.

Информация о классифицируемых сигнальных образах должна быть заключена в формах сигнальных путей, ставящихся в соответствие рефлекторным дугам в ЦНС. В этой связи множеством специфических афферентов и эфферентов нисходящего (прямого) канала ставятся в соответствия множества вершин-источников и вершин-приемников в основной структуре, а множествам неспецифических афферентов и эфферентов в восходящем канале (обратном канале) ставятся в соответствия множества вершин-источников и вершин-приемников в дополнительной структуре. В одноструктурной организации роль носителей процессов в обратном канале должны выполнять ячейки (или их части), ориентированные навстречу основным ячейкам, образующим прямой канал. Следствием введенных ограничений на структурную организацию КС является совпадение конфигураций сигнальных путей в прямом и обратном каналах при одноструктурной организации или взаимное соответствие сигнальных путей при двухструктурной организации.

В КС должно присутствовать три вида памяти: динамическая ориентирующая, динамическая кратковременная и статическая долговременная. В результате работы первой фазы краткосрочной памяти в обеих структурах обеспечивается построение систем сигнальных путей, начинающихся на возбужденных вершинах-источниках и оканчивающихся на всех достижимых (для волн активности) вершинах-приемниках. Кратковременная динамическая память обеспечивает удержание систем сигнальных путей на время, необходимое для записи (или дозаписи) в память ячеек состояний их включения в сигнальные пути. Причем процесс записи в одной ячейке должен протекать успешно, если со стороны дополняющей структуры или ячеек присутствует возбуждение. Таким образом, осажденная рефлекторная дуга представляет собой пересечение систем сигнальных путей, построенных в дополняющих друг друга структурах или системах ячеек при одноструктурной организации. Статическая долговременная память, будучи распределенной по структурам, обеспечивает долговременное хранение состояний активности полюсов ячеек.

Время удержания в памяти ячеек состояний их включения должно убывать с понижением частоты предъявления классифицируемых образов и (или) их воспроизведения, т. е. ячейки должны обеспечивать реализацию феномена «забывания» как очистительной от избыточной информации процедуры.

Процесс записи нового сигнального образа в КС должен протекать успешно только при одновременном присутствии сигнального образа на вершинах-источниках основной структуры и образа кода-ответа на вершинах-источниках дополнительной

структуры или соответствующих им ячеек в одноструктурной организации.

Процесс обучения в КС представляется как совместное протекание процессов записи при повторных предъявлениях сигнального образа и прообраза кода-ответа на фоне мешающих объектов и реализации функции забывания у ячеек. В результате воздействия этих двух процессов должно достигаться выделение сигнальных образов, связанных с полезными объектами, и создаваться предпосылки для закрепления более коротких (по числу компонент) сигнальных путей.

По окончании обучения основная и дополнительная структуры КС должны обеспечивать самостоятельное функционирование: основная структура — реализовывать процесс классификации первичных сигнальных образов с выработкой по ним кодов-ответов; дополнительная структура — реализовывать процесс воспроизведения с выработкой вторичного сигнального образа, совпадающего с первичным при одноструктурной организации или однозначно соответствующего первичному при двух- и более структурной организации по предъявленному прообразу кода-ответа.

Взаимодополняющие структуры КС должны обеспечивать модуляцию активности ячеек друг друга. Причем модулирующее влияние должно превалировать по мере приближения к вершинам-источникам каждой структуры. В центральных слоях структур должно осуществляться «перемешивание» сигнальных путей без подавляющего влияния одной структуры на другую. В этом плане КС должна удовлетворять принципу экранности, присутствующему сенсорным системам.

Первые слои ячеек каждой структуры должны реагировать на элементы и (или) группы элементов сигнального образа или прообраза кода-ответа, образующие мелкие их фрагменты. Второй и последующие слои в качестве входных воздействий используют реакции ячеек предыдущих слоев, увеличивая степень интеграции своих реакций. В частности, ячейки второго слоя реагируют на более крупные фрагменты сигнального образа. Наконец, реакция ячеек центрального слоя должна коррелировать со всем сигнальным образом. В центральном слое должна быть возбуждена система сигнальных путей — промежуточный сигнальный образ, каждый элемент которого должен коррелировать со всем сигнальным образом. Начиная с центрального слоя, промежуточный образ должен подвергаться модулирующему влиянию дополнительной структуры так, что код-ответ приводится в соответствие со своим прообразом. Модуляция должна носить характер управления и потому воздействовать на узлы генерации выходных сигналов.

Потеря энтропии сигнального образа возрастает по мере углубления в структуру. Обработка сигналов должна осуществляться в местах слияния сигнальных путей, например, конъюнк-

тивным восприятием реакций входных полюсов ячеек, связанных с сигнальными путями.

Форма сигнальных путей, проецирующихся на один элемент кода-ответа или промежуточного образа, должна быть древо-видной. Ветви дерева «упираются» в возбужденные элементы сигнального образа, ствол — в возбужденный элемент ответа.

В частном дереве (соотнесенном одному элементу ответа) должны присутствовать в качестве составляющих частей части других деревьев, «упирающихся» в общие фрагменты данного сигнального образа или других сигнальных образов.

В целях достижения объединения сигнальных образов в классы ячейки среды должны обладать многофункциональностью в смысле обеспечения реакции на разные комбинации сигнальных путей (фрагменты разных сигнальных образов), например, реализацией дизъюнктивных функций от групп входных полюсов, конъюнктивно реагирующих на комбинации связанных с ними сигнальных путей.

В качестве механизма, приводящего к объединению (ассоциации) ячеек в непрерывные сигнальные пути, может выступать гоночная борьба за «захват» ячеек в условиях воздействия латеральных запрещающих связей между смежными ячейками или их полюсами.

Помимо введенных ограничений на структуру и принципы функционирования КС от ячеек необходимо потребовать наличие рефрактерности и регистровости проведения импульсов. Эти свойства необходимы для обеспечения динамической памяти в КС с комбинационным кодированием сигнальных образов.

В заключение отметим, что классифицирующая среда с комбинационным кодированием, построенная по изложенным требованиям, будет обладать голографическим эффектом в смысле несения частью носителя информации обо всем образе. Поэтому при достаточной развитости систем входных полюсов и связности ячеек она может обладать практически неограниченной информационной емкостью.

Исследования моделей КС на ЭВМ показали, что, как и в голографических моделях, в классифицирующих средах точность записи образа падает с повышением «плотности записи», под которой в данном случае понимается число фрагментов образов, сходящихся на одной ячейке. Искажения, сопровождающие информационную перегрузку КС, возможны только в сторону выпадания фрагментов, т. е. точности записи. При этом среда к выпавшим фрагментам нечувствительна.

Поскольку каждый элемент выходного кода-ответа коррелирует со всем образом, налицо дублирование всей процедуры преобразования входной информации, что приводит к попаданию «пораженных» участков среды на пути формирования составляющих от разных компонент кода-ответа. Это, в свою

очередь, приводит к исключительной надежности функционирования среды при больших информационных нагрузках.

Список литературы: 1. *Бехтерева Н. П.* Нейрофизиологические аспекты психической деятельности человека. Изд. 1-е, 2-е.—Л.: Медицина, 1971, 1974.—118 с.; 151 с. 2. *Ашмарин И. П.* Загадки и открытия биохимии памяти.—Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975.—160 с. 3. *Гейз Р.* Образование нервных связей/Пер. с англ.—М.: Мир, 1972.—304 с. 4. *Косицын Н. С.* Микроструктура дендритов и аксодендритических связей в ЦНС.—М.: Наука, 1976.—200 с. 5. *Бундзен В. П.* К анализу информационно управляющих функций энграмм долгосрочной памяти. Механизмы модуляции памяти.—Л.: Наука, 1976.—212 с. 6. *Кохонен Т.* Ассоциативная память. Пер. с англ.—М.: Мир, 1980.—240 с. 7. *Коган А. Б.* Функциональная организация нейронных механизмов мозга.—Л.: Медицина, 1979.—223 с. 8. *Hebb O. O.* The organization of behaviour N.-Y., 1949.—270 p. 9. *О нейрофизиологическом кодировании психических явлений человека. Память в механизмах нормальных и патологических реакций/Н. П. Бехтерева, П. В. Бундзен, А. С. Каплуновский.*—Л.: Медицина, 1976.—400 с. 10. *Виноградова О. С.* Гиппокамп и память.—М.: Наука, 1976.—334 с. 11. *Физиология сенсорных систем/* Под ред. А. С. Батуева.—Л.: Медицина, 1976.—400 с. 12. *Леонтович Т. А.* Нейронная организация подкорковых образований переднего мозга.—М.: Медицина, 1978.—334 с. 13. *Ильинский О. Б.* Физиология сенсорных систем. Часть третья. Физиология механорецепторов.—Л.: Наука, 1975.—560 с. 14. *Коган А. Б.* Жесткие и нежесткие системы мозга.—Проблемы физиологии и патологии высшей нервной деятельности.—М.: Наука, 1970.—350 с. 15. *Манина А. А.* Субклеточная и микрохимическая перестройка синапсов при стимуляции и обучении. Механизмы модуляции памяти.—Л.: Наука, 1976.—212 с.

Поступила в редколлегию 14.11. 80.

УДК 37.037

В. М. ЛАБСКИР, канд. пед. наук, *С. Т. ОМЕЛЬЧЕНКО*

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА МОДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА АСУ

Для изучения деятельности оператора широко применяется моделирование рабочего процесса. При этом предполагается, что исходные уровни модельных характеристик оптимальны, а динамика их изменения вызвана физиологическим утомлением и нервно-эмоциональным напряжением [1]. Вместе с тем определение оптимальности того или иного показателя включает возможность его изменчивости в границах, определяемых формой адаптации к рабочему процессу [2].

Для оценки указанной изменчивости модельных характеристик деятельности операторов АСУ был использован процентильный метод анализа статистических распределений [3]. В исследовании приняли участие 206 человек в возрасте от 18 до 47 лет. Значения отдельных процентилей приведены в табл. 1. Ее данные свидетельствуют о наличии существенных диапазонов в величинах модельных показателей. Крайние высокие и крайние низкие значения выходят за пределы допустимых границ

и требуют использования дополнительных мероприятий для обеспечения надежности работы оператора АСУ.

Таблица 2

Процентили	Модельные характеристики				
	Время сложной реакции	Ошибки реагирования	Объем перерабатываемой информации	Скорость переработки информации	Частота движений
	мс	%	бит	бит/с	уд/с
10%	290	0	250	1,7	7,3
20%	320	0	230	1,6	6,5
50%	360	20	200	1,1	6,1
80%	420	30	120	0,8	5,3
90%	470	40	110	0,6	4,7

В качестве направленных воздействий были апробированы различные физические нагрузки. Эффективность такого подхода изучалась на выборке из 28 испытуемых с высокой переносимостью физических нагрузок [4]. Кроме того, мы ограничили изучение наиболее распространенными характеристиками — объемом перерабатываемой информации (ОПИ) и скоростью переработки информации (СПИ). Полученные значения в зависимости от вида физических нагрузок приведены в табл. 2. Существенное изменение физиологических и модельных показателей работоспособности происходит по двум основным вариантам.

Таблица 2

Виды дозированных нагрузок	Средние значения и доверительные интервалы		
	Объем перерабатываемой информации (ОПИ)	Скорость переработки информации (СПИ)	Частота сердечных сокращений (ЧСС)
	биты	бит/с	ударов/с
Комплексы гимнастических упражнений	18 ± 10	0,27 ± 0,09	18 ± 10
Бег на 100 м	34 ± 16	0,22 ± 0,08	65 ± 10
Бег на 1000 м (мужчины)	—60 ± 12	—0,33 ± 0,14	55 ± 11
Бег на 500 м (женщины)	—22 ± 9	—0,26 ± 0,10	71 ± 12
Плавание на 100 м вольным стилем	16 ± 5	0,27 ± 0,10	62 ± 9
Фехтовальные бои	42 ± 18	0,32 ± 0,14	59 ± 12
Соревнования по фехтованию	—42 ± 12	—0,28 ± 0,13	33 ± 9

Для максимальных нагрузок кратковременного характера (бег на 100 м, фехтовальные бои), а также для нагрузок средней интенсивности, хотя и длительных по времени (плавание, комплексы гимнастических упражнений), наблюдалось четко выраженное улучшение ОПИ и СПИ. Для длительных нагрузок высокой интенсивности или очень длинных нагрузок средней интенсивности

(бег на 500 и 1000 м, соревнования по фехтованию) наблюдается заметное снижение показателей ОПИ и СПИ. Более высокая информативность отмечена для показателей СПИ, поэтому дальнейший анализ проводился только для данной характеристики. Ее значение до физических нагрузок мы обозначили V_0 , а после них — V_k . Кроме того, вводилась величина изменения СПИ $\Delta V = \frac{V_k - V_0}{V_0} 100\%$. Для прогнозирования воздействия физических нагрузок мы ограничились линейным уравнением регрессии [3]: $\Delta V = a + bV_0$. Значения a и b , полученные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели	Виды дозированных нагрузок			
	Бег на 100 м	Бег на 1000 м	Комплексы гимнастических упражнений	Фехтовальные бои
r — коэффициент корреляции	—0,73	0,87	—0,67	—0,79
a — коэффициент уравнения регрессии	1,03	—1,18	1,12	1,07
b — коэффициент уравнения регрессии	—0,65	1,06	—0,80	—0,76

Таким образом, существует определенное значение V_0 , после которого не наблюдается прироста СПИ под влиянием физических нагрузок. Для нагрузок первого варианта оно составляет 1,5—1,6 бит/с. Аналогично для нагрузок второго варианта существует минимальное значение $V_0 = 1,1—1,15$ бит/с, не вызывающее дальнейшего снижения СПИ под воздействием указанных нагрузок. Следовательно, в диапазоне исходных уровней СПИ 1,1—1,6 бит/с возможно использование физических нагрузок в качестве оптимизирующего средства для достижения высокой эффективности работы операторов АСУ. Дополнительным условием является повторность дозированных нагрузок первого варианта не менее 2—3 раз в неделю. Существенное снижение оптимального значения СПИ наблюдалось после 15—20-дневного перерыва в использовании нагрузок.

Список литературы: 1. *Навакатилян А. О., Крыжановская В. В.* Возрастная работоспособность лиц умственного труда.— К.: Здоровье, 1979.— 207 с. 2. *Душков Б. А.* Индустриально-педагогическая психология.— М.: Просвещение, 1981.— 120 с. 3. *Гласс Дж., Стенли Дж.* Статистические методы в педагогике и психологии.— М.: Прогресс, 1976.— 40 с. 4. *Амосов Н. М., Бендет Я. А.* Физическая активность и сердце.— К.: Здоровье, 1975.— 78 с.

Поступила в редколлегию 18.11.81.

**СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ**

В настоящее время электроэнцефалограмма (ЭЭГ) применяется при решении большого класса задач. Так, ЭЭГ применяется в клинике при исследованиях поражений мозга, действия фармакологических веществ, изучении сна, определении профессиональной пригодности [1].

Много научных работ посвящено методам классификации ЭЭГ по различным признакам. Но на данном этапе эта работа еще далека от полного завершения. Трудности, возникающие при решении такого рода задач, обуславливаются, во-первых, отсутствием разработанной системы между нейрофизиологическими и биоэлектрическими понятиями, которыми пользуются в электрофизиологии; во-вторых, исключительной вариабельностью ЭЭГ как для различных испытуемых, так и при различных функциональных состояниях.

Поэтому при исследовании биоэлектрической активности мозга особенно важным является вопрос о корректной постановке задачи анализа и об адекватности метода количественной обработки.

Понятия, которые послужат основой для объективных классификаций ЭЭГ, могут возникнуть лишь в результате развития методов обработки экспериментальных кривых. Применение ЭВМ для анализа экспериментальных кривых позволяет широко раздвинуть границы исследования, служит процессу автоматизации научного исследования.

1. *Исследование отдельных параметров электрограммы головного мозга.* Рассмотрим наиболее распространенный метод анализа ЭЭГ — визуальный. Методы визуальной оценки ЭЭГ хорошо освещены в ряде монографий [2, 3].

Предметом визуального анализа является определение ритмического состава ЭЭГ, выделение доминирующего ритма, волн специфической формы, исследование их временных и пространственных соотношений. Основными параметрами визуального анализа являются амплитуда и частота. Исследуя электрограммы мозга, под частотой понимают число волн, наблюдаемых за единицу времени, под длительностью — протяженность одной волны во времени. Здесь частота и длительность не обязательно связаны строгой обратной пропорциональной зависимостью. Волны различаются по форме, они могут быть синусоидальными, острыми, пикоподобными.

В зависимости от частоты, амплитуды и формы различают несколько типов волн и комплексов на ЭЭГ [3]. Следует отметить, что частотные границы для классификации волн весьма условны.

Если волны определенной частоты и формы непрерывно следуют друг за другом, то говорят о соответствующем ритме — α , θ , δ , β , γ или регулярной ритмической активности. Визуальная оценка α -, ..., γ -активности есть анализ ЭЭГ по частоте. Общая частотная характеристика дается путем определения стандартных показателей или индексов, например, под α -индексом понимается процент времени, в течение которого на ЭЭГ наблюдается выраженный α -ритм.

В основном метод визуального анализа носит качественный характер и часто не выявляет доминирующих компонентов на ЭЭГ. Поэтому он дополняется простейшими методами количественного анализа: а) определение индексов, т. е. степень выраженности различного вида активности; б) определение волнового индекса, т. е. произведения максимальных амплитуд и максимальной продолжительности волн на рассматриваемом участке ЭЭГ; в) определение средней частоты волн.

Для анализа взаимосвязи частоты и амплитуды в электрограмме пользуются гистографическими методами, в результате измерений строятся гистограммы, характеризующие зависимость между амплитудой и частотой. Для оценки амплитуды колебаний служит планиметрический метод. С его помощью определяют площадь, описываемую кривой ЭЭГ.

Но этим простейшим количественным методам присуща субъективность оценки, трудоемкость, большая затрата времени на расчеты, неудовлетворенность физиологов.

Многие из этих недостатков устранены в результате применения автоматических приборов для анализа ЭЭГ.

Появились методы автоматического измерения интенсивности биоэлектрических потенциалов. Во-первых, регистрация огибающей ритма. В этом случае на осциллограмме записывается кривая (огibaющая), которая характеризует изменение уровня интенсивности. Во-вторых, измерение суммарной биоэлектрической активности, которое сводится к измерению площади автоматически с помощью интеграторов [2]. Они позволяют проследить динамику среднего напряжения ЭЭГ под влиянием различных воздействий (фармакологических, психических и пр.). Более точные амплитудные изменения ЭЭГ получают путем измерения спектра амплитуд.

Некоторые исследователи ставят перед собой задачу анализа фазовых соотношений. Под фазой сигнала понимают временные соотношения между соответствующими элементами волн в двух или нескольких отведениях [2]. Строгое употребление этого термина применимо к гармоническим колебаниям одной частоты. Фазовые соотношения исследуют периодограммным методом, в этом случае выделяемые частоты соответствуют реальным периодическим составляющим электрограммы. Одновременно можно вычислять начальные фазы этих составляющих.

Недостатками периодограммного метода является его трудо-

емкость, отсутствие физиологических коррелят. Большое развитие получили методы, в которых термин фаза употребляется применительно к единичным волнам или отдельным ритмам.

Итак, предметом визуального анализа является определение ритмического состава ЭЭГ, выделение доминирующего ритма, волн специфической формы, исследование их временных и пространственных отношений. При визуальном анализе производят лишь словесное описание ЭЭГ. Такой анализ электрограмм мозга, безусловно, носит субъективный характер. Результат его в большой степени зависит от искусства специалиста. Накопленный опыт визуального анализа передается с трудом, многие термины до сих пор не имеют строгих определений. Сам процесс анализа очень трудоемкий, в течение эксперимента получают большой объем информации, она в свою очередь требует квалифицированного труда. Получаемые количественные оценки часто не имеют физиологических коррелят, плохо поддаются автоматизации.

2. *Традиционные методы математического анализа электрограмм.* Математический анализ электроэнцефалографических данных позволяет получать более полную информацию о функциональном состоянии мозга. Применение математических методов расширяет и углубляет наше знание о сложных физиологических явлениях, помогает в клинических исследованиях.

Стремление исследователей использовать при анализе ЭЭГ большое количество параметров, получать результативные и объективные характеристики процесса настойчиво требует применения ЭВМ. Широкое применение ЭВМ неизбежно ведет к возрастающей роли математических методов анализа ЭЭГ.

Роль выбора метода обработки электрофизиологических кривых чрезвычайно важна и сложна. Поскольку кривые биоэлектрической активности мозга в общем случае не обладают свойством стационарности и гауссовости процесса, то они могут быть описаны множеством параметров. И сейчас продолжают поиски наиболее информативных из этих параметров. Естественный путь поиска метода обработки ЭЭГ должен основываться на гипотезе, объясняющей данное явление для того, чтобы помочь раскрытию его механизмов. Это обуславливает особые требования к корректности постановки задачи исследования и адекватности метода обработки.

Традиционный математический анализ электрограмм осуществляется по следующей схеме:

а) экспериментальной кривой $f(t)$ сопоставляется множество теоретических кривых $L(c_1, c_2, \dots, c_n, t)$, так называемых оценочных функций;

б) находятся конкретные числовые параметры $c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*$ для данной кривой из условия минимума некоторой меры расхождения теоретической и экспериментальной кривых;

в) выделенная из множества оценочных функций конкретная функция $L^*(c_1^*, \dots, c_n^*, t)$ является моделью исследуемой электроэнцефалограммы.

В зависимости от выбора функции различают традиционные математические методы анализа ЭЭГ. Остановимся кратко на характеристике некоторых из них.

2.1. Частотный анализ. Математической базой частотных методов анализа является разложение отрезка ЭЭГ в ряд Фурье (1) или интеграл Фурье (2):

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx}, \quad c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx; \quad (1)$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\alpha) e^{i\alpha x} d\alpha, \quad c(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\alpha t} dt, \quad (2)$$

т. е. представление отрезка ЭЭГ в виде суммы синусоидальных гармоник. Существует много работ по частотному анализу [2—4]. При частотном анализе в качестве числовых характеристик ЭЭГ берут значения интегрируемого сигнала по каждой выделяемой частоте, а затем производят распознавание в пространстве этих значений.

В работе [4] показано, что частотный анализ существенных преимуществ перед визуальным анализом не имеет. Применяя частотный анализ, исследователи рассматривают сигнал ЭЭГ как детерминированный процесс, все характеристики которого определены заранее во времени и пространстве. Поэтому результаты анализа ЭЭГ зависят от выбора участка ЭЭГ и от его длительности. А также большое число гармоник при частотном анализе мешает получению полезной информации и ограничивает изучение ЭЭГ в динамике.

2.2. Статистические методы анализа рассматривают электрические колебания мозга как случайный процесс. И это оправдано, так как спонтанная ЭЭГ, как и всякий динамический процесс, протекает под действием случайных возмущений внутреннего и внешнего характера.

Для описания основных особенностей случайного процесса таких числовых характеристик, как математическое ожидание, дисперсии недостаточно. Чтобы уловить внутреннюю структуру случайного процесса, находят другие характеристики, например корреляционную функцию, или определяют закон распределения рассматриваемой случайной функции. Так как электроэнцефалограмма представляет результат суперпозиции потенциалов огромного числа функциональных элементов мозга, прежде всего корковых нейронов, то, учитывая закон больших чисел (при достаточной независимости функционирования этих элементов), следует ожидать проявления закона распределения, близкого к нормальному. Распределение параметров ЭЭГ по нормальному закону отмечается многими исследователями.

2.3. Корреляционный анализ является одним из статистических методов, выявляющим закономерности в случайных процессах.

В работах [2, 5] показано преимущество корреляционного метода анализа ЭЭГ по сравнению с другими. С его помощью выделяют и анализируют сигналы, не доступные визуальной обработке, выделяют и регулярные биоэлектрические колебания, и слабые электрические ответы. Корреляционный анализ позволяет выявить периодические компоненты кривой даже тогда, когда их амплитуда в несколько раз меньше амплитуды колебаний случайного происхождения. В работах, посвященных корреляционному анализу ЭЭГ, различными способами вычисляется коэффициент корреляции, корреляционное отношение, строятся графики автокорреляционных и кросскорреляционных функций.

Корреляционная функция показывает степень взаимодействия между двумя мгновенными значениями сигнала, разделенными временной задержкой τ и усредненными за большой промежуток времени T . Автокорреляционная функция оценивает преобладание периодических, квази-периодических или непериодических составляющих в исследуемом процессе. В этом случае процесс сравнивается со своими копиями, сдвинутыми на различные интервалы времени. Кросскорреляционная функция оценивает присутствие тех или иных компонент, общих для двух процессов, определяет их фазовые и временные соотношения. В этом случае можно сопоставлять биопотенциалы в различных структурах головного мозга, в разных участках одной и той же структуры.

В клинической электроэнцефалографии применение корреляционного метода облегчает выявление патологической активности при опухолях головного мозга. Так, М. Брезье [5] использовала этот метод для дифференцирования нормальных и патологических ЭЭГ. Место патологического очага обнаруживается по характеру графиков автокорреллограмм.

С теоретической точки зрения корреляционная функция полностью характеризует только нормальный и стационарный процесс. При использовании корреляционного метода важно выбрать время, в течение которого статистические характеристики ЭЭГ изменяются незначительно (обычно берут 10 с.). Так как ЭЭГ не является строго нормальным и стационарным процессом, то метод корреляционного анализа дает полную информацию о сигнале ЭЭГ.

2.4. Спектральный анализ ЭЭГ применяется в последние годы все шире. Распространению этого метода способствует применение быстродействующих ЭВМ, с высокой степенью автоматизации всех процессов.

Результат спектрального анализа — спектр мощности — выдается в удобной для расшифровки форме; точность вычисления

задается исследователем, значит, может быть достаточно высокой.

Основы спектрального анализа ЭЭГ наиболее подробно описаны в [6].

В каждой ЭЭГ имеется несколько различно выраженных частотных составляющих данной кривой, спектр мощности отражает энергию каждой из частотных составляющих данной ЭЭГ. Преимущество вычисления спектра мощности в том, что математические операции производятся автоматически на ЭВМ. Но здесь, так же как и в корреляционном анализе, существен выбор времени анализа ЭЭГ, т. е. интервала наблюдения.

Цель спектрального анализа — точно выявить составляющие ЭЭГ, определить наиболее характерные черты для данного процесса. Если выбирается большой временной отрезок ЭЭГ, то при вычислении происходит сглаживание спектра. В результате получаем усредненную картину спектра.

В работе [1] отмечено, что визуальная оценка ЭЭГ и данные спектрального анализа нередко не совпадают. При вычислении спектрограммы ЭЭГ характеризуется по ряду параметров, например, по средней мощности спектра M — эта характеристика отражает усредненное значение мощности всех частотных компонентов, т. е. дает информацию о спектре в целом. Другой параметр — средне-квадратическое отклонение δ — характеризует разброс мощностей разных частотных компонентов данной ЭЭГ. Тогда каждый спектр определяется некоторым уровнем $M + \delta$. Пока трудно дать количественную характеристику спектрограмм ЭЭГ. В литературе отмечено, что встречается несколько типов спектрограмм разных областей коры в норме.

Как и автокорреляционный анализ, спектральный анализ позволяет выявить различия электрической активности в зоне очагового поражения мозга в тех случаях, когда на основе визуального анализа сделать это трудно.

В настоящее время исследований с применением спектрального анализа ЭЭГ немного. Имеющиеся работы посвящены начальному этапу-разработке метода применения анализа и выяснению его возможностей для оценки очаговой патологии мозга.

3. Сравнительная характеристика традиционных математических методов анализа биоэлектрической активности мозга. Использование математических методов для анализа электрической активности мозга требует разработки и обоснования новых понятий и специального формализованного аппарата. На пути создания новых математических методов исследователи обычно используют известные положения функционального анализа, математической статистики, в частности, теории случайных процессов. При использовании математического аппарата особое значение приобретает вопрос об адекватности применяемых методов.

В настоящее время сравнительный анализ методов обработки биомедицинской информации не сделан. В ряде обзорных работ приводятся общие соображения по вопросу классификации [7, 8].

При разработке метода анализа информации исследователь исходит из каких-то гипотез о процессе. Так, периодограммный анализ рассматривает ЭЭГ как результат алгебраического сложения нескольких регулярных колебаний на фоне случайных регулярных составляющих.

Корреляционный метод рассматривает ЭЭГ как случайный стационарный процесс, только в этом случае имеет смысл его применение. Методы корреляционного анализа в настоящее время находят самое широкое применение. Однако определение корреляционных функций хотя и может дать весьма точные (усредненные за длительные интервалы времени) характеристики изучаемого процесса, но они не всегда удовлетворяют физиологов. Результаты корреляционного анализа не отражают динамики быстрых изменений процесса, имеющей весьма важное значение в экспериментах на живых объектах. Теряется информация о фазах колебаний. Как отмечено в работе [2], многие ученые проявляют «скептицизм» и разочарование в «классических» методах корреляционного анализа. Ограничения статистических методов анализа, в том числе корреляционного, возникают из-за невыполнения условия стационарности ЭЭГ. Электроэнцефалограмма не является отражением строго стационарного процесса. Разделив ЭЭГ на небольшие участки, допускают, что они отражают свойства стационарных случайных процессов и к ним применяют корреляционный анализ. Таким образом, весьма существенным является выбор длительности интервала наблюдения.

Серьезные практические проблемы, как отмечено в работе [8], встают в тех случаях, когда изучаемый период времени удлиняют в целях получения образов большей длительности, содержащих большее количество данных. Одна из таких практических проблем связана с отсутствием метода разделения (фрагментации) непрерывной записи на независимые временные периоды.

И частотный, и корреляционный анализ зависят от формы волн ЭЭГ, но эта зависимость однозначна для гауссовских процессов, для которых несущественны фазово-частотные соотношения. Если попытаться непосредственно описать форму волны ЭЭГ, то можно не связываться никакими гипотезами о характере исследуемой кривой. Заменяв отрезок ЭЭГ n -й чисел, можно вместо последовательности волн ЭЭГ рассматривать числовые последовательности. В этом случае длину отрезка ЭЭГ можно варьировать от самых больших значений до порядка длины одной волны. Обработку ЭЭГ можно вести параллельно

с экспериментом, что существенно расширит возможности исследований.

В связи с этим актуальной является задача отыскания способа описания формы волны ЭЭГ, формального развития этого способа настолько, чтобы суметь реализовать его с помощью ЭВМ. Ни один из существующих традиционных методов анализа ЭЭГ не может полностью вскрыть всех сторон того многогранного процесса, который отражается на электроэнцефалограмме. Каждый из методов выявляет и позволяет исследовать лишь одну какую-либо сторону этого процесса. Поиски информативных параметров ЭЭГ, новых методов анализа и подходов к расшифровке скрытой в ЭЭГ информации ведутся интенсивно.

4. В последнее время мы проводили исследования в направлении применения методов последовательного анализа [9] к обработке биоинформации. Такая работа выполнялась в Институте Кибернетики АН УССР, в Институте Проблем Управления (г. Москва). Была предпринята попытка применения алгоритмов задачи о «разладке» к анализу ЭЭГ в условиях хирургического наркоза. Ставилась задача определения на ЭЭГ моментов перехода из одной стадии наркоза в другую (фон—стадия возбуждения — стадия хирургического наркоза). Математическая постановка задачи предполагает обнаружение моментов изменения вероятностных характеристик наблюдаемого случайного процесса.

«Разладка» заключается в том, что среднее x в случайный момент времени t_0 изменится в сторону увеличения (или уменьшения). При решении используется модифицированный алгоритм Пейджа, который для n -мерного процесса x_t с совместной плотностью распределения вероятностей $f(x_1, \dots, x_{t_0-1}/\theta_1)$ до случайного момента t_0 и после момента t_0 ($f(x_{t_0}, \dots, x_t/\theta_2)$) позволяет обнаружить с минимальным запаздыванием $M(\tau/\theta = \theta_2)$ при фиксированном времени между ложными тревогами $M(\tau/\theta = \theta_1) = \text{const}$ [10]. Предполагается, что параметры θ_1 и θ_2 известны. На каждом t -м шаге решающая функция $g(t)$ сравнивается с порогом h . Если $g_t \geq h$, то подается сигнал «разладки». Величина h выбирается заранее из возможного среднего запаздывания и частоты «ложных» тревог. Решающая функция

$$g_t = \begin{cases} g_{t-1} + \Delta g_t, & \text{если } g_{t-1} + \Delta g_t > 0; \\ 0, & \text{если } g_{t-1} + \Delta g_t \leq 0, \quad g_0 = 0, \end{cases}$$

где Δg_t — приращение отношения правдоподобия $\Delta g_t = L_2(t) - L_1(t)$; $\sum_{k=1}^t L_1(k) = \ln f(x_1, \dots, x_t/\theta_1)$, $i = 1, 2$.

Список литературы: 1. Клиническая электроэнцефалография /Под ред. В. С. Русинова.— М.: Медицина, 1973.—339 с. 2. Кожеевников В. А., Мещерский Р. М. Современные методы анализа электроэнцефалограммы.—М.: Медгиз, 1963.—327 с. 3. Егорови И. С. Электроэнцефалография.—М.: Медицина,

1973.—296 с. 4. *Войтинский Е. Я.* О применении автоматического анализа электроэнцефалограмм в клинике.—Неврология и психиатрия, 1963, вып. 5, с. 779—783. 5. *Брезье М.* Электрoсфизiologicalическое изучение таламуса и гиппокампа у человека. Глубокие структуры головного мозга человека в норме и патологии.—М.; Л.: Наука, 1966, с. 34—35. 6. *Walter.* Spectral analysis of electroencephalograms: mathematical determination of neurophysiological relationships from records of limited duration.—*Exper. neur.*, 8, 2, 1963, p. 155—181. 7. *Slipton Harold W.* E E G analysis: a history and a prospectus.—*Annt. Rev. Biophys. and Bioeng.*, 4, Calif 1975, p. 1—13. 8. *Cox I., Nolle F., Arthur R.* Digital Analysis of the Electroencephalogram, the Blood Pressure Wave, and the Electrocardiogram.—*Proceedings of the IEEE*, 1972, N 10, 60. 9. *Ширяев А. Н.* Статистический последовательный анализ.—М.: Наука, 1969—272 с. 10. *Шукафоров И. В.* Применение коммутативных сумм для обнаружения изменения характеристик случайного процесса.—*Автоматика и телемеханика*, 1979, № 2, с. 48—58.

Поступила в редколлегию 04.04.81

УДК 62.506

Е. Н. ВИНАРСКАЯ, д-р мед. наук

СТРУКТУРНЫЙ ИНВАРИАНТ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

В техническом моделировании устройств речевого ввода и вывода, а также и устройств, обладающих искусственным интеллектом, все чаще возникает необходимость в дополнении дискретной логики представления психических явлений логикой континуальной. Эта инженерная потребность сдерживается, однако, малой изученностью непрерывных бессознательных единиц психического состояния. В статье делается попытка структурно представить непрерывные эмоциональные состояния как базовый уровень в иерархической системе знаний ЭВМ, обладающей искусственным интеллектом.

По мнению нейрофизиолога П. К. Анохина [1], эмоция представляет собой интегративную оценку организмом своей собственной активности, что и делает ее адаптационно целесообразной, а сам организм саморегулирующейся системой. Возникновение всякой эмоции, имевшей место в жизни не однажды, постепенно начинает опережать на какую-то долю секунды рабочий эффект активности организма, и в итоге развиваются истинные эмоциональные состояния. Эмоциональные состояния, предвзято (по П. К. Анохину) характер будущего безусловного подкрепления данной совокупности раздражителей, вызывают адекватные комплексы поведенческих реакций, в частности повышение или понижение уровня своей собственной активности. Таким образом, было бы точнее называть эмоциональные состояния эмоционально-волевыми. Эмоционально-волевые состояния, по данным психологии [2], предшествуют соответствующей деятельности, побуждают к ней и отвечают за общую ее направленность, они составляют те врожденные категории эмоциональной сферы человека, которые, подвергаясь предметным опосредствованиям, превращаются в чувства и волеизъявления личности.

Согласно материалистической диалектике, психическое есть системное свойство нейрофизиологического. Эмоционально-волевые состояния, будучи формой бессознательного психического, являются системным свойством тех физиологических, прежде

всего нейрофизиологических процессов, которые, принадлежа к числу биоритмов (суточного, годового и некоторых других), связаны с интегративной деятельностью целостного организма. Как и биоритмы, они характеризуются качествами непрерывности и периодичности.

Познание других структурных особенностей эмоционально-волевых процессов предполагает интегративное представление большого числа, нередко подробнейшим образом изученных физиологических параметров биоритмов (в первую очередь суточного и годового). В этом отношении заслуживает внимания учение А. А. Ухтомского [3] о доминанте, как общем принципе работы нервной системы.

Доминанта, или господствующий очаг возбуждения, создается (по А. А. Ухтомскому) односторонним накапливанием возбуждения в определенной группе (конstellляции) центров как бы за счет работы других центров. Это как бы принципиальное нарушение равновесия между центрами. В доминантный очаг возбуждения могут быть вовлечены кортикальные, субкортикальные, стволово-сегментарные и вегетативно-гуморальные отделы мозга. Доминантный очаг возбуждения обладает повышенной возбудимостью и стойкостью возбуждения; он суммирует возбуждение от последовательных раздражений, в том числе и посторонних, как писал А. А. Ухтомский, диффузно-безразличных, действующих в руку подкрепления доминантного очага. Тем самым доминанта становится все более мощной и стойкой (инертной). Однако подкрепление доминанты посторонними импульсами подготавливает и ее конец, ибо для каждого очага возбуждения существуют слишком частые или слишком сильные раздражения, при которых он не только не способен к положительному суммированию, но и начинает затормаживаться и угасать. Чем выше возбудимость центра, тем более слабые факторы могут действовать на него как сильные раздражители. На высоко возбудимый и очень возбужденный прибор вновь приходящий импульс легко действует угнетающе. По мере затухания доминанты все более сужается сфера тех раздражений, которые могут ее подкреплять, и вместе с тем все менее тормозятся прочие реакции, постепенно выходя из сферы влияния доминанты. Возникновение в центральной нервной системе нового доминантного очага возбуждения способствует угасанию первой, что не значит, однако, что при соответствующих условиях эта первая доминанта не способна восстановиться.

Важна мысль А. А. Ухтомского о том, что регуляция состояния целостного организма тоже может осуществляться по механизму доминантных очагов возбуждения, находящихся в реципрокных отношениях.

Разработке мысли о наличии двух одновременных доминант, регулирующих интегративную деятельность мозга, как целого (бидоминантность) уделил внимание Б. Ф. Поршнев [4].

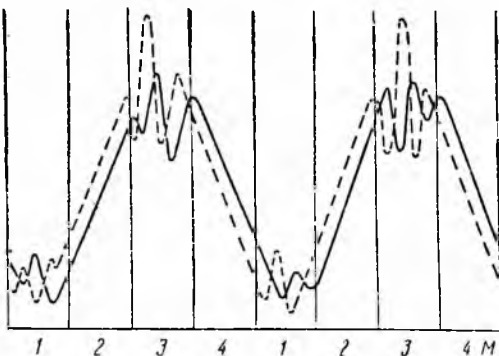
Рассмотрим под таким же углом зрения представления А. М. Зимкиной, Д. Н. Меницкого, Ю. Г. Антомонова, А. М. Зингермана, Т. Д. Лоскутовой, Б. М. Шишкина [5] о двух формах биологической регуляции целостного организма: адаптивной и гомеостатической. Адаптивная регуляция, пишут авторы, отличается быстродействием и тем, что при ней снимаются ограничения, связанные с сохранением устойчивости физиологических параметров в пределах некоторого адаптационного уровня, на котором они поддерживаются посредством механизма гомеостатической регуляции. Адаптивная регуляция изменяет характер активности или функциональной структуры целостного организма, следит за изменениями внешней и внутренней сред организма и соответственно перестраивает функциональный уровень звеньев центральной нервной системы до заданного значения (установки). А гомеостатические механизмы стремятся стабилизировать этот уровень, т. е. удерживать сформировавшуюся функциональную систему и не допускать отклонения существенных параметров от необходимых значений установки.

А. М. Зимкина и соавторы, говоря об адаптационно-гомеостатических саморегуляторных перестройках, используют теорию экстремального управления, согласно которой самонастройка производится по экстремуму (максимуму или минимуму) функции результата, которому соответствует некоторое оптимальное значение регулируемого параметра (А. Г. Ивахненко, 1964; Л. А. Растрин, 1973 и др.). Перегиб биологических функций в экстремальных точках со сменой их производными знака на обратный проявляется в том, что величина любой реакции по мере увеличения интенсивности стимула возрастает до определенного предела, а затем начинает убывать, при этом максимальному (т. е. экстремальному) значению величины реакции соответствует оптимальное значение интенсивности стимула.

Имея в виду суточный и годовой природные ритмы, можно предположить, что адаптивные регуляции имеют ведущее значение у большинства животных в светлую часть суток и в теплое время года. Напротив, гомеостатические регуляции доминируют у них в темную часть суток и в холодное время года. Смена ведущей формы биологического регулирования должна происходить в борьбе противоположных афферентных потоков — борьбе особенно острой на сравнительно высоком уровне бодрствования (активности) организма. Эмоционально-волевые состояния, находясь в причинной связи с активным поведением организма, должны развиваться в параллель с доминантой адаптивных регуляций. При этом они должны быть наиболее устойчивы в своих качественных особенностях в момент расцвета этой доминанты, т. е. днем (летом), а неустойчивы в начальный и конечный моменты ее развития: утром (весной) и вечером (осенью). Таким образом, если рассматривать адаптивную и гомеостатическую регуляции под углом зрения двух

одновременно существующих, но находящихся в реципрокных отношениях доминант, то оптимальное значение интенсивности стимула соответствует не максимальному, а среднему значению величины реакции. Именно поэтому такие значения величины реакции отличаются наибольшей устойчивостью своих параметров и как следствие этого — наибольшей качественной определенностью.

Эксплицируем сказанное графически (рисунок). По оси M отложены периоды и части периодов суточного и годового природных ритмов: I, II — периоды (сутки, год); $1, 2, 3, 4$ — части периодов: утро, день, вечер, ночь (весна, лето, осень, зима). Ось N символизирует уровень бодрствования организма. Сплошная линия изображает динамику гомеостатической доминанты, штриховая — адаптивной).

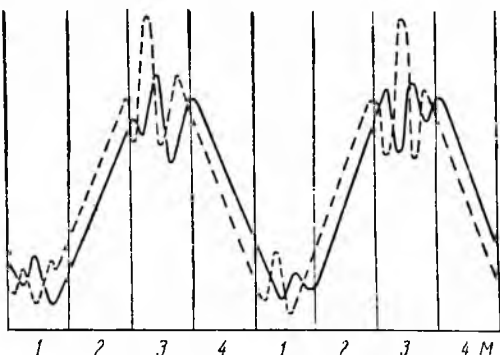


Поведение человека тоже можно рассматривать под углом зрения двух одновременно существующих управляющих доминант, находящихся в реципрокных отношениях друг к другу; условно обозначим их социальной и биологической доминантами. Социальные факторы имеют ведущее значение для адаптивного поведения человека (Н. П. Дубинин [6]). В большинстве случаев именно социальные цели имеют для личности наибольшую субъективную ценность, и потому достижение этих целей связано со сравнительно высоким уровнем бодрствования (активности) и наиболее отчетливо выраженными эмоционально-волевыми состояниями. Так как высокий уровень бодрствования приходится обычно на дневное время суток, то устойчивая эмоционально-волевая активность, связанная с социальным поведением человека, оказывается обычно приуроченной к этому же отрезку суточного ритма. Связь устойчивых эмоционально-волевых состояний, обусловленных социальной доминантой, с теплым временем года является непосредственно менее очевидной.

Однако статистика подтверждает, что физиологические ритмы и системно скоррелированные с ними эмоционально-волевые процессы отличаются наибольшей устойчивостью именно в дневные часы (летние месяцы) и ночные часы (зимние месяцы). Переломные же моменты природных ритмов (утренние и вечерние часы в суточном ритме или весенние и осенние месяцы в годовом ритме) вызывают неустойчивые психофизиологические состояния человека с выраженной дисперсией их количеств.

одновременно существующих, но находящихся в реципрокных отношениях доминант, то оптимальное значение интенсивности стимула соответствует не максимальному, а среднему значению величины реакции. Именно поэтому такие значения величины реакции отличаются наибольшей устойчивостью своих параметров и как следствие этого — наибольшей качественной определенностью.

Эксплицируем сказанное графически (рисунок. По оси M отложены периоды и части периодов суточного и годового природных ритмов: I, II — периоды



сутки, год); $1, 2, 3, 4$ — части периодов: утро, день, вечер, ночь (весна, лето, осень, зима). Ось N символизирует уровень бодрствования организма. Сплошная линия изображает динамику гомеостатической доминанты, штриховая — адаптивной).

Поведение человека тоже можно рассматривать под углом зрения двух одновременно существующих управляющих доминант, находящихся в реципрокных отношениях друг к другу; условно обозначим их социальной и биологической доминантами. Социальные факторы имеют ведущее значение для адаптивного поведения человека (Н. П. Дубинин [6]). В большинстве случаев именно социальные цели имеют для личности наибольшую субъективную ценность, и потому достижение этих целей связано со сравнительно высоким уровнем бодрствования (активности) и наиболее отчетливо выраженными эмоционально-волевыми состояниями. Так как высокий уровень бодрствования приходится обычно на дневное время суток, то устойчивая эмоционально-волевая активность, связанная с социальным поведением человека, оказывается обычно приуроченной к этому же отрезку суточного ритма. Связь устойчивых эмоционально-волевых состояний, обусловленных социальной доминантой, с теплым временем года является непосредственно менее очевидной.

Однако статистика подтверждает, что физиологические ритмы и системно скоррелированные с ними эмоционально-волевые процессы отличаются наибольшей устойчивостью именно в дневные часы (летние месяцы) и ночные часы (зимние месяцы). Переломные же моменты природных ритмов (утренние и вечерние часы в суточном ритме или весенние и осенние месяцы в годовом ритме) вызывают неустойчивые психофизиологические состояния человека с выраженной дисперсией их количест-

венных параметров. Как известно, весна и осень трудно переносятся большими как сосудистой, так и психиатрической клиник; именно в эти времена года увеличивается процент смертей, в том числе самоубийств. В утренние и вечерние часы наблюдается наиболее высокий процент рождений и смертей; в ранние утренние часы люди, склонные к бессоннице, просыпаются; на ранние утренние и вечерние часы приходится экстремумы температуры тела и т. п. Таким образом, вероятность того, что приведенный график будет соответствовать объективной реальности, остается достаточно высокой и для того случая, когда сплошная линия на нем будет изображать динамику биологической доминанты, а пунктирная — социальной.

Следовательно, эмоционально-волевые состояния вне зависимости от того, целям какой — биологической или социальной — адаптации они служат, характеризуются следующими инвариантными чертами.

1. Эмоционально-волевые состояния непрерывны, поскольку они являются системным свойством непрерывных биоритмов.

2. Эмоционально-волевые состояния периодичны, поскольку периодичны биоритмы; эта их особенность предположительно детерминирована борьбой двух констелляций доминантного возбуждения в саморегуляторном механизме биоритмов.

3. Эмоциональный и волевой компоненты в структуре эмоционально-волевых состояний синкретичны и не отделены друг от друга. Чем выше положительная интегративная оценка индивидуумом уже достигнутого результата целостного поведения, тем сильнее становится подкрепляющий этот результат волевой импульс.

4. В динамике эмоционально-волевых состояний реализуется диалектика переходов количества в качество и качества в количество. Как писал А. В. Луначарский [7], «Ничто не может доставлять наслаждение беспредельно. Всякое наслаждение через известный промежуток времени теряет свою остроту и превращается в свою противоположность, боль. Это относится и к так называемым низшим, и к высшим формам наслаждений. Не только Демьянова уха, но и какая-нибудь симфония Бетховена, если ею «потчевать» человека без перерыва несколько суток, опостылеет ему до мучения». При доминировании социальных регуляций положительная эмоциональная оценка становится рано или поздно отрицательной в силу пренебрежения человеком своими биологическими потребностями и истощения структурных и энергетических ресурсов организма. При доминировании противоположных биологических регуляций интегративная положительная оценка целостного поведения тоже становится рано или поздно отрицательной в силу пренебрежения человеком своими социальными потребностями, что ослабляет его связи с обществом.

5. Эмоционально-волевые состояния отличаются устойчивостью при их умеренной выраженности, чему соответствует

установление стабильных отношений между реципрокными доминантами (расцветом одной из них и затуханием другой).

6. Неустойчивость эмоционально-волевых состояний с колебаниями степени их выраженности соответствует периодам дестабилизации отношений между противоборствующими доминантами в центральной нервной системе. Эта неустойчивость особенно велика в случае активного подавления личностно более ценной доминанты (социальной) посредством личностно менее ценной (биологической).

Имеющиеся у нас экспериментальные подтверждения высказанных положений будут представлены в последующих публикациях.

В заключение подчеркнем, что без эмоционально-волевых категорий невозможно никакое психическое поведение, каким бы логически абстрактным оно ни казалось. Любой речевой или интеллектуальный акт имеет эмоциональную мотивацию и осуществляется в результате волевого усилия [8]. Больше того, какими бы дискретными ни казались проявления речевого и интеллектуального поведения, они корнями своими имеют непрерывные циклические эмоционально-волевые процессы. Дискретность осознаваемых психических образов, представлений, языковых понятий и логических суждений только потому и возможна, что она составляет диалектическое единство с континуальностью бессознательных эмоционально-волевых процессов.

Применительно к задаче разработки базового уровня системы знаний ЭВМ, обладающей искусственным интеллектом, кажется возможным усматривать следующие системные аналогии с описанными выше саморегуляторными закономерностями. Выполнение техническим устройством определенного числа дискретных логических операций или решение им того или иного объема дискретных производственных заданий возможно при условии экономически приемлемого соотношения между денежной стоимостью этих продуктов и денежной стоимостью затрат на их получение. Непрерывно осуществляемая интегративная оценка этого соотношения и выступает как аналог адаптационно целесообразной эмоции биологической или биолого-социальной системы.

Список литературы: 1. Анохин П. К. Очерки физиологии функциональных систем.— М.: Медицина, 1975.— 446 с. 2. Вилюнас В. К. Психология эмоциональных явлений.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976.— 143 с. 3. Ухтомский А. А. Принцип доминанты.— Физиология нервной системы, 1952, вып. 3, с. 262—266. 4. Поршнев Б. Ф. О начале человеческой истории.— М.: Мысль, 1974.— 486 с. 5. Механизмы саморегуляции функций и функциональных состояний / А. М. Зимкина, Д. Н. Меницкий, Ю. Г. Антомонов и др.— В кн.: Адаптивная регуляция функций. М.: Медицина, 1977, с. 149—193. 6. Дубинин Н. П. Современная биология и проблемы социальной сущности человека.— Психол. журн. 1980, т. 1, № 1, с. 78—92. 7. Луначарский А. В. К вопросу об оценке.— Этюды, 1922, с. 53—71. 8. Ценностный аспект проблемы эмоциональной напряженности / Е. Н. Винарская, К. А. Мичурина, А. С. Никифоров, С. М. Носиков. Психол. журн. 1980, т. 1, № 5, с. 117—130.

Поступила в редколлегию 04.04.81.