

ISSN 0555-2656

ПРОБЛЕМЫ



БИОНИКИ

ВЫПУСК

28

007  
Л-78

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ имени М. К. ЯНГЕЛЯ

# ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 28

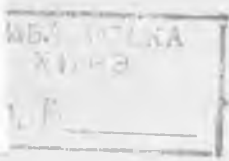
Республиканский  
межведомственный  
научно-технический  
сборник

Основан в 1968 г.

ХНУРЕ Problemy byoniky



B-2577-2



2001

ХАРЬКОВ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ „ВИЩА ШКОЛА“  
1982

**Проблемы бионики:** -Респ. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 28.— Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1982. — 123+5 с.

В сборнике рассматриваются вопросы разработки математического аппарата для описания процессов переработки информации человеком. Строятся и исследуются модели переработки текстовой информации. Моделируются различные особенности функционирования головного мозга, а также других систем человеческого организма. Обсуждаются вопросы практического использования предложенного математического аппарата и построенных на его основе модулей.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1981 г.

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

*Редакционная коллегия:* Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (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. Иванов-Муромский, В. А. Ловицкий, Е. П. Путятин, И. Б. Сироджа, В. Я. Сердюченко, В. Г. Червов

*Адрес редакционной коллегии:* 310059, Харьков-59, пр. Ленина, 14, Институт радиоэлектроники, тел. 40-94-46

Редакция естественнонаучной литературы

П  $\frac{1502000000 - 048}{M226(04) - 82}$  432—82

## О МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОВА И ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЕГО ФОРМ

Формальный и приборный аппарат теории интеллекта [1, 2], а также результаты моделирования некоторых конечных функций и отношений [3—5] дают возможность приступить к моделированию процессов обработки слов. Под термином «слово» мы понимаем любые конечные последовательности, составленные из букв произвольного конечного алфавита. Длина слов и число букв алфавита в теории интеллекта ограничиваются значениями параметров  $n_0$  и  $k_0$  универсальной алгебры конечных предикатов. Понятие «слово» охватывает любые слова, предложения и тексты естественного языка (например, русского), которыми оперирует человеческий интеллект. Процессы обработки слов лежат в основе всей интеллектуальной деятельности человека.

Рассмотрим следующий вопрос: математически описать средствами теории интеллекта отдельно взятое слово, например *мама*. Очевидно, искомое описание будет получено, если мы сформируем для данного слова соответствующее ему уравнение теории интеллекта. Сама запись слова *мама* не может служить его описанием, поскольку она не является уравнением, а другими средствами описания, кроме уравнений, в теории интеллекта мы не располагаем. Казалось бы, в качестве описания заданного слова можно использовать уравнение  $X^M Y^a Z^M t^a = 1$  (а), поскольку единственным его решением служит вектор  $(m, a, m, a)$ .

Однако такое описание оказывается неполным. Действительно, для того чтобы иметь возможность записать решение уравнения (а) в виде вектора  $(m, a, m, a)$ , нужно заранее знать, что  $x$  есть первая переменная,  $y$  — вторая,  $z$  — третья,  $t$  — четвертая. В заданном же уравнении (а) ввиду коммутативности операции конъюнкции информация о способе нумерации переменных отсутствует. Это уравнение можно записать в виде

$$t^a x^m y^a z^m = 1 \quad (б),$$

при этом порядок расположения переменных будет уже иным.

Для полноты формального описания слова необходимо, чтобы соответствующее ему уравнение содержало в себе информацию о порядке следования букв в слове. Этого можно достичь, если рассматривать слово как функцию  $x=f(s)$  зависимости буквы  $x$  от номера  $s$  ее места в слове. Условимся нумеровать буквы слова слева направо. Тогда слово *мама* может быть задано в виде функции

Соответствующее этому уравнение имеет вид

$$S^1 X^M V S^2 X^a V S^3 X^M V S^4 X^a = 1. \quad (B) \text{ Э}$$

В общем случае слово  $X_1 X_2 \dots X_n$  запишем так:

$$s^1 (x \approx x_1) V s^2 (x \approx x_2) V \dots V s^n (x \approx x_n) = 1. \quad (1) \text{ С П}$$

Формулу (1) назовем уравнением слова  $x_1 x_2 \dots x_n$ . Последовательность букв  $x_1 x_2 \dots x_n$  будем называть записью слова, рассматривая ее не как само слово, а лишь как его обозначение. Под словом же теперь будем понимать функцию  $x = f(s)$ , задаваемую уравнением (1), где  $x_1, x_2 \dots x_n$  — некоторые буквенные константы, играющие роль параметров уравнения.

Как физический объект запись слова может существовать в двух различных формах: параллельной (пространственной) и последовательной (временной). Примерами параллельного представления записи слова могут служить: запись слова в книге; двоичный код, хранящийся в регистре вычислительной машины. Примеры последовательного представления записи слова: звучащая речь; двоичный код, передаваемый по проводнику. Отправляясь от уравнения (1), построим устройства, преобразующие запись слова из параллельной формы в последовательную и обратно.

В составе этих устройств потребуются ячейки памяти для хранения буквы, которые мы построим по принципу триггера с отдельными входами при двоичном его кодировании. Отмеченная таблица переходов этого триггера представлена ниже. Здесь  $x$  — троичный входной сигнал триггера, значения которого представлены двухразрядными двоичными кодами ( $x_2, x_1$ );  $y_1, y_2$  — двоичные прямой и инверсный входные сигналы;  $u$  — двоичное состояние триггера;  $t$  — дискретное время.

Мы изложили обычную интерпретацию триггера со счетным входом. Теперь посмотрим на этот триггер с иной точки зрения с позиций теории интеллекта. Будем считать, что триггер оперирует не с двоичными кодами сигналов, а с буквами  $a_1, a_2$ , представленными своими узнаваниями. Входной сигнал по-прежнему будем обозначать буквой  $x$ , полагая, что  $x$  принимает значения  $a_1, a_2$ . Младший разряд  $x_1$  двоичного кода прежнего входного сигнала рассматриваем как узнавание  $x^{a_1}$ , старший  $x_2$  — как узнавание  $x^{a_2}$ . Коду 00 теперь соответствует отсутствие входного сигнала ( $x^{a_1} = 0, x^{a_2} = 0$ ), коду 01 — сигнал  $x = a_1$  ( $x^{a_1} = 1, x^{a_2} = 0$ ), коду 10 — сигнал  $x = a_2$  ( $x^{a_1} = 0, x^{a_2} = 1$ ). Выходной сигнал триггера обозначим буквой  $y$ , полагая  $y^{a_1} = y_1, y^{a_2} = y_2$ . Если  $y_1 = 1$  и  $y_2 = 0$ , то  $y = a_1$ , если же  $y_1 = 0$  и  $y_2 = 1$ , то  $y = a_2$ . Случаю, когда  $y$  не существует, соответствуют нулевые значения сигналов  $y_1, y_2$ . Состояние

$y_2(t-1)$	1	0
$y_1(t-1)$	0	1
$x(t)$	$u(t-1)$	
	0	1
0 0	0	1
0 1	0	0
1 0	1	1

триггера будем обозначать буквой  $a$ , полагая, что  $a$  принимает значения  $a_1, a_2$ . Принимаем  $a^1 = u, a^2 = v$ , тогда  $a = y$ . Будем считать возможным случай, когда  $a^1 = 0$  и  $a^2 = 0$ , полагая, что при этом ячейка не хранит в своей памяти никакой буквы (очищена от информации).

Связь между узнаваниями сигналов при принятой интерпретации триггера описывается диаграммами Вейча.

Согласно этим диаграммам, если сигнал  $x$  не существует, то триггер сохраняет прежнее состояние, т. е.

$a(t)^{a_1} = a(t-1)^{a_1}$  и  $a(t)^{a_2} = a(t-1)^{a_2}$ . Если  $x = a_1$ , то триггер из любого состояния переходит в состояние  $a(t) = a_1$ , если же  $x = a_2$ , то  $a(t) = a_2$ . В случае, когда  $x(t)$  или  $a(t-1)$  многозначные, т.е.  $x(t)^{a_1} = x(t)^{a_2} = 1$  или  $a(t-1)^{a_1} = a(t-1)^{a_2} = 1$ , состояние триггера  $a(t)$  оставлено неопределенным (в соответствующих ячейках диаграммы проставлены прочерки).

	$a(t-1)^{a_1}, a(t-1)^{a_2}$						$a(t-1)^{a_1}, a(t-1)^{a_2}$				
		00	01	11	10			00	01	11	10
$x(t)^{a_1}$	00	0	0	—	1	$x(t)^{a_2}$	00	0	1	—	0
	01	0	0	—	0		01	1	1	—	1
$x(t)^{a_2}$	11	—	—	—	—	$x(t)^{a_1}$	11	—	—	—	—
	10	1	1	—	1		10	0	0	—	0
	$a(t)^{a_1}$						$a(t)^{a_2}$				

	$a(t-1)^{a_1}, a(t-1)^{a_2}$						$a(t-1)^{a_1}, a(t-1)^{a_2}$				
		00	01	11	10			00	01	11	10
$x(t)^{a_2}$	00	0	0	1	1	$x(t)^{a_1}$	00	0	1	1	0
	01	0	0	0	0		01	1	1	1	1
$x(t)^{a_1}$	11	1	1	1	1	$x(t)^{a_2}$	11	1	1	1	1
	10	1	1	1	1		10	0	0	0	0
	$a(t)^{a_1}$						$a(t)^{a_2}$				

Ниже показан вариант доопределения диаграмм и склеивания их ячеек, обеспечивающий получение экономных форм для явной записи сигналов  $a(t)^{a_1}$  и  $a(t)^{a_2}$ .

Переходя от диаграммы к формулам, имеем

$$x(t)^{a_1} \vee x(t)^{a_2} \vee x(t)^{a_1} a(t-1)^{a_1} = a(t)^{a_1};$$

$x(t)^{a_2} \vee x(t)^{a_1} \vee x(t)^{a_2} a(t-1)^{a_2} = a(t)^{a_2}$  (2). Соответствующая этим формулам схема триггера представлена на рис. 1. По сравнению с обычной схемой триггера со счетным входом (рис. 2) эта схема выглядит неэкономной, однако она дает ключ к построению нужной нам ячейки памяти для хранения буквы произвольного

конечного алфавита. Схема такой ячейки и ее условное обозначение представлены на рис. 3, а, б. Она отличается от схемы рис. 1. лишь тем, что переменные  $x$ ,  $y$ ,  $u$  принимают значения  $a_1, a_2, \dots, a_k$ .

Назовем такую схему ячейкой буквенной памяти. Она функционирует следующим образом. При подаче в момент времени  $t$

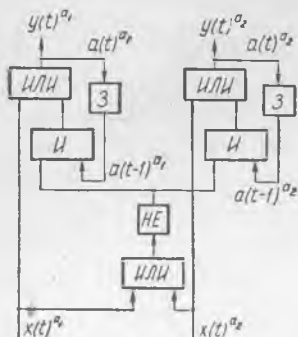


Рис. 1. Схема триггера, построенная по формулам (2)

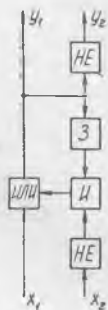


Рис. 2. Триггер со счетным входом

буквы  $a$  на вход  $x$  ячейка в тот же момент повторяет эту букву на выходе  $y$  и хранит ее в своей памяти в течение следующего такта времени, вплоть до момента  $t + 1$ . Если же на вход ячейки не поступает никакой буквы (все узнавания  $x^{a_1}, x^{a_2}, \dots, x^{a_k}$  — нулевые), то на выходе формируется буква, хранимая ячейкой в предыдущем такте времени. Эта буква продолжает сохраняться ячейкой и в следующем такте времени. Ячейка буквенной памяти может быть описана в явном виде следующей системой уравнений:

$$x(t)^{a_i} \vee x(t)^{a_1} \vee x(t)^{a_2} \vee \dots \vee x(t)^{a_k} a(t-1)^{a_i} = a(t)^{a_i}, \quad (3)$$

где индекс  $i$  пробегает значения от 1 до  $K$ . При импульсном представлении сигналов схему ячейки буквенной памяти можно существенно упростить, заменив в ней все блоки разделения в верхнем ряду схемы (рис. 3) узлами. Такая замена допустима, поскольку на входы этих блоков никогда не поступает более одного импульса одновременно; кроме того, исключено образование ложных цепей.

Ячейку буквенной памяти можно также использовать для совершенно иной цели: запоминания множества, представленного в виде булева вектора. Если вектор содержит хотя бы один единичный компонент (непустое множество), то он запоминается схемой и хранится ею в течение одного последующего такта.

Если же все компоненты вектора нули (пустое множество), то схема продолжает помнить прежний вектор.

Теперь, когда ячейка памяти для хранения буквы построена, возвратимся к задаче разработки устройства, преобразующего запись слова из параллельной формы в последовательную. Схе-

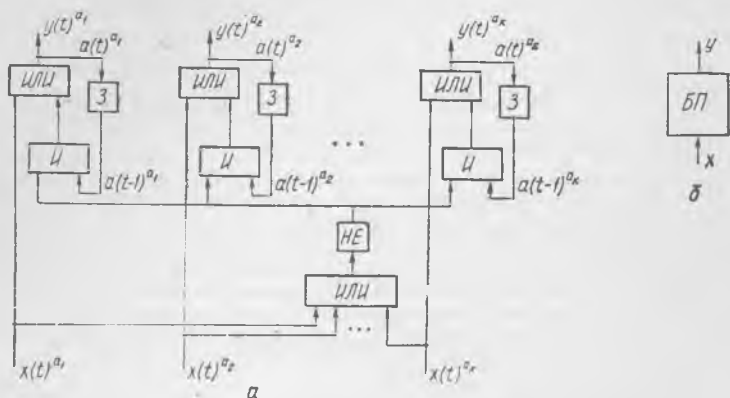


Рис. 3. Схема ячейки памяти для хранения буквы

ма устройства дана на рис. 4. В ней, кроме ячеек буквенной памяти использован селектор С и счетчик импульсов СИ. В начальный момент времени ( $t=0$ ) в ячейки памяти устройства за-



Рис. 4. Устройство, преобразующее запись слова из параллельной формы в последовательную

Рис. 5. Устройство, преобразующее запись слова из последовательной формы в параллельную

сылается запись  $x_1 x_2 \dots x_n$  слова в параллельной форме. На вход счетчика подаются сигналы от генератора тактовых импульсов. На выходе счетчик, работающий в данном случае в режиме датчика управляющих импульсов, в моменты времени  $t=1, 2, \dots, n$  формирует номера  $S=1, 2, \dots, n$  букв слова. В те же моменты времени на выходе селектора последовательно во времени появляются буквы  $x=x_1, x_2, \dots, x_n$  записи слова в последовательной форме. Уравнение селектора с точностью до обозначений совпадает с уравнением слова (1).

Нетрудно построить также устройство, осуществляющее обратное преобразование записи слова из последовательной формы в параллельную. В схеме устройства (рис. 5) используется счетчик импульсов ячейки буквенной памяти и переключатель П. На вход переключателя последовательно во времени ( $t = 1, 2, \dots, n$ ) поступают буквы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  слова. В те же моменты со счетчика в переключатель поступают номера букв  $s = 1, 2, \dots, n$ . Переключатель распределяет буквы по своим выходам: букву  $x_1$  в момент  $t = 1$  посылает на первый выход, букву  $x_2$  в момент  $t = 2$  — на второй и т. д.

**Список литературы:** 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Об универсальной алгебре конечных предикатов. — АСУ и приборы автоматки, 1980, вып. 55, с. 69—74. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О переключательных цепях теории интеллекта. — Проблемы бионики, 1980, вып. 25, с. 11—18. 3. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О моделировании алфавитных операторов средствами теории интеллекта. — Проблемы бионики, 1981, вып. 26, с. 3—10. 4. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О моделировании конечных множеств средствами теории интеллекта. — Математические методы анализа динамических систем, 1980, вып. 4, с. 76—80.

Поступила в редколлегию 01.10.80.

УДК 510.62

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, Н. М. БУРКОВА, Н. В. ШАРОНОВА

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СУФФИКСАЛЬНОГО СЛОВООБРАЗОВАНИЯ ГЛАГОЛОВ

В общей системе словообразования русского языка глагол занимает очень важное место в основном из-за продуктивного в словообразовании глаголов способа префиксации, когда создаются глаголы с иным лексическим значением, чем то, которое было в производящем слове. Однако в словообразовательную систему глаголов входят также и суффиксы, хотя их значения здесь не так богаты и разнообразны, как в именах существительных и прилагательных. Тем не менее, без них описание системы словообразования глаголов было бы неполным, односторонним. Изучение словообразовательной системы дает возможность не только понять законы ее функционирования, установить нормы современного словообразования, но и дать математическую интерпретацию тем или иным процессам в естественном языке. Формализация процессов словообразования является одной из самых актуальных проблем при решении целого ряда практических задач, связанных с переработкой информации на естественном языке с помощью современных ЭВМ.

Под словообразовательной системой понимаются те элементы, из которых состоят слова, т. е. значимые единицы сло-

ва (корни, приставки, суффиксы, окончания), их роль в словопроизводстве, сама структура слов, употребляемых в языке (слова производные и непроизводные), а также те законы, по которым одни слова (производные) мотивируются другими (производящими), способы образования слов и те словообразовательные типы (внутри способов образования), которые активно участвуют в образовании новых слов.

В словообразовательной системе глаголов особо следует различать словообразовательные и формообразующие аффиксы. Словообразовательные аффиксы (мы будем рассматривать лишь суффиксы) используются для образования слов с новым лексическим значением, например, *батрак* — *батрачить*, *асфальт* — *асфальтировать* и т. п. Формообразующие суффиксы новых слов не образуют, они не меняют лексического значения слова, а используются для образования форм того же самого слова: *говорить* — *говорящий*, *читать* — *читал*, *читала*, *читали* и т. п. Мы остановимся на рассмотрении словообразовательных суффиксов глаголов. В нашем понимании словообразовательный суффикс — это служебная морфема, находящаяся после корня (или после суффикса производящей основы) и служащая для образования новых слов.

Рассматривая естественный язык как детерминированный, дискретный и конечный объект [1] и выделяя в тексте такой его фрагмент, как суффикс, который часто сам поддается дальнейшему фрагментированию, введем отношение  $L(X, Y, Z) = 1$ , связывающее между собой мотивирующее слово  $X$ , мотивируемое слово  $Y$  (продукт деривации) и набор грамматических и семантических признаков  $Z$ , позволяющих однозначно из  $X$  получить  $Y$ . Принцип однозначности состоит в том, что фрагмент текста (суффикс или его фрагмент) однозначно зависит от его смысла (определение смысла дано в [1]). Принцип однозначности можно интерпретировать как требование полноты набора признаков (компонентов смысла), с помощью которого осуществляется выбор фрагмента текста.

Математическое описание суффиксального словообразования глаголов сводится к формированию суффикса  $s = s_1 s_2 \dots s_m$  в зависимости от набора грамматических и семантических признаков, где  $m$  — число букв в суффиксе.

Все словообразовательные суффиксы глаголов целесообразно представить в виде так называемого нами *регистра суффиксов*.

На основании фактов, изложенных в [2], можно разделить суффиксы глаголов на фрагменты подобно тому, как это делалось для суффиксов имен существительных. Полагаем при этом, что фрагмент суффикса несет в себе ту же семантику, что и суффикс, в который он входит, т. е. самостоятельным значением фрагмент суффикса обладает лишь тогда, когда он совпадает с простым суффиксом.

При решении задачи фрагментации суффиксов глаголов (как видно из регистра суффиксов) выделяются следующие четыре группы фрагментов суффиксов (основной критерий — наличие одинаковой буквы, которую мы назовем фиксированной): 1) фрагменты с фиксированной второй буквой «в»: *ов—ев, ив—ыв—\_в*;

$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
а	в	и	р	о	в	а	—
и	в	—	—	о	в	а	—
—	—	и	р	о	в	а	—
—	—	—	—	о	в	а	—
—	—	—	—	е	в	а	—
—	—	—	—	и	в	а	—
—	—	—	—	ы	в	а	—
—	—	—	—	в	в	а	—
—	—	—	—	—	в	а	—
—	—	—	—	—	—	а	—
—	—	—	—	—	—	я	—
—	—	—	—	—	—	е	—
—	—	—	—	и	—	—	—
—	—	—	н	и	ч	а	—
—	—	а	н	и	—	у	—
—	—	—	н	—	—	у	—

2) фрагменты с фиксированной второй буквой  $\_$  (пробел): *а\_—я\_ . р\_ . у\_*; 3) фрагменты с фиксированной второй буквой «н»:  $\_н, ач$ ; 4) фрагменты с фиксированной первой буквой «и»: *из, ир, ич, и\_*.

Введем следующие обозначения:  $s_1$  — первая буква фрагмента суффикса со значениями *о, е, и, ы, \_ , а, я, у*;  $s_2$  — вторая буква фрагмента со значениями *в, \_ , н, р, з, ч*.

Рассмотрим последовательно каждую из четырех выделенных групп фрагментов. В каждой из них наблюдаются чередова-

ния гласных букв при фиксированной согласной или пробел ( $\_$ ), или чередования согласных букв (в последней группе) при фиксированной гласной. На выбор буквы фрагмента влияют грамматические признаки основы  $Z$ , семантические признаки основы  $W$  и класс чередований  $\mu$ , который выделяется при выборе буквы фрагмента, т. е.  $S = f(Z, W, \mu)$ .

Класс чередования  $\mu$  зависит от грамматических признаков слова  $Z$  и семантических признаков  $W$ :  $\mu = \varphi(Z, W)$ . Влияние слова  $Z$  на выбор буквы фрагмента суффикса может быть охарактеризовано следующим набором признаков:  $Z = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7)$ ,  $z_1$  — часть речи мотивирующего слова со значениями *с* — имя существительное; *п* — имя прилагательное; *г* — глагол; *м* — местоимение; *ч* — числительное; *з* — звукоподражательные междометия.  $z_2$  — признак последней буквы основы со значениями *а, б, б', в, в', г, г', д, д', е, ж, з, з', и, к, л, л', м, м', н, н', о, п, п', р, р', с, с', т, т', у, ф, х, ц, ч, ч, ы, ы, э, ю, я* (буква со штрихом обозначает мягкую согласную);  $z_3$  — признак происхождения основы со значениями *р* — русская основа, *и* — иностранная основа;  $z_4$  — признак наличия или отсутствия следующего фрагмента суффикса со значениями *д* — есть следующий фрагмент, *н* — нет следующего фрагмента;  $z_5$  — признак наличия или отсутствия префикса со значениями *п* — есть префикс, *б* — нет префикса;  $z_6$  — признак ударности фрагмента со значениями *у* — ударный, *б* — безударный;  $z_7$  — признак изменчивости состояния со значениями *д* — состояние изменяется, *н* — состояние не изменяется.

Семантические признаки  $W$  описываются следующим набором:  $W = (w_1, w_2, w_3)$  где  $w_1$  — совершать действие, имеющее отношение к тому, что названо мотивирующим существительным:  $a$  — действовать с помощью предмета (*плужить*),  $b$  — наделять предметом (*асфальтировать*),  $v$  — приводить в состояние (*восторгать*),  $z$  — совершать действие, свойственное лицу или животному (*бродяжничать*),  $d$  — делать кем-нибудь (*пролетаризировать*),  $e$  — совершать действие, свойственное для данного места (*иллюзовать*),  $ж$  — помещать в данное место (*госпитализировать*),  $з$  — проводить время (*зимовать*),  $и$  — проявлять признак лица или предмета (*сиротеть*);  $w_2$  — совершать действие, имеющее отношение к тому, что названо мотивирующим прилагательным:  $a$  — приобретать признак (*белеть*),  $b$  — наделять признаком (*активизировать*),  $v$  — проявлять признак (*лютовать*),  $w_3$  — совершать действие, имеющее отношение к тому, что названо мотивирующим глаголом:  $a$  — однократно совершать действие (*клянуть*),  $b$  — интенсивно совершать действие (*долбануть*).

Рассмотрим первый класс фрагментов суффиксов с фиксированной буквой «в». При выборе гласной  $s_1$  выделяются следующие классы чередований:  $\mu_1 = s_1^0 V s_1^e$ ,  $\mu_2 = s_1^v V s_1^i V s_1^{\bar{v}}$ . Для данного класса фрагментов  $\mu_1 V \mu_2 = I$ . Записываем правила проявления того или иного значения внутри каждого класса чередования.

Для  $\mu_1 = s_1^0 V s_1^e$ . Буква «о» появляется после всех согласных, кроме *ч, ц, ш, щ, ж*. Например, *плутовать, иллюзовать*. Уравнение алгебры конечных предикатов будет иметь следующий вид:  $s_1^0 = P_1 V P_3 V z_2^{\phi}$ ,  $P_1 = z_2^{\phi} V z_2^{\beta} V z_2^{\eta} V z_2^{\alpha} V z_2^{\gamma} V z_2^{\delta} V z_2^{\epsilon} V z_2^{\zeta} V z_2^{\tau}$ ,  $P_3 = = z_2^{\tau} V z_2^{\kappa} V z_2^{\chi}$ . Буква «е» появляется после букв *а, е, ж, о, у, ч, ш, щ, я, о', в', д', з', л', м', н', н', р', т'*. Например, *циклевать, горевать*.

Уравнение имеет следующий вид:  $s_1^e = P_2 V P_4 V P_5 V P_6 V P_7$ ,  $P_2 = z_2^{\alpha} V z_2^{\nu} V z_2^{\eta}$ ,  $P_4 = z_2^{\beta} V z_2^{\gamma} V z_2^{\delta} V z_2^{\zeta}$ ,  $P_5 = z_1^{\nu} V z_2^{\eta} V z_2^{\delta} V z_2^{\nu}$ ,  $P_6 = z_2^{\delta} V z_2^{\nu}$ ,  $P_7 = z_2^{\delta} V z_2^{\nu} V z_2^{\delta} V z_2^{\nu}$ .

Для  $\mu_2 = s_1^v V s_1^i V s_1^{\bar{v}}$ . Если основа оканчивается на *г, ж, к, о, х, ч, ш, щ, з, л', н', с', р'*, то первая буква фрагмента суффикса «и», например: *обменивать, проталкивать*; если же основа оканчивается на *б, в, д, з, л, м, н, п, р, с, т*, то первая буква «ы», например: *обрабатывать, завербовать*. Буква « $\bar{v}$ » появляется в том случае, если последняя буква основы *а, е, и, у, ы*, например: *утаивать, девать*.

Уравнение алгебры конечных предикатов будет иметь следующий вид:  $s_1^{\bar{v}} = P_3 V P_5 V P_4 V z_2^{\nu} V z_2^{\delta}$ ,  $s_1^i = P_1$ ;  $s_1^{\bar{v}} = P_2 V z_2^{\eta} V z_2^{\delta}$ .

В случае присоединения фрагмента суффикса «ив» в последней букве основы происходит чередование  $t \rightarrow \bar{c}$  (*засекретить — засекречивать, чертить — ычерчивать*). Если обозначить последнюю букву основы через  $t_1$ , то можно записать, что  $t_1^{\bar{v}} V t_1^{\bar{c}} = \tau_1$ , где  $\tau$  — класс чередования в последней букве основы.

Выбор класса чередования  $\mu$  в первой букве фрагмента зависит от части речи мотивирующего слова. Если глагол образован от имени существительного, тогда выбирается  $\mu_1 = z_1^c V z_1^n$ . Если глагол образован от глагола, то  $\mu_2 = z_1^f$ .

Рассмотрим второй класс фрагментов суффиксов с фиксированной буквой « $\_$ ». Это фрагменты:  $a \_ - я \_$ ,  $e \_$ ,  $y \_$ .

При присоединении фрагмента « $a \_$ » происходит чередование в последней букве основы  $г \rightarrow ж$  (*долг — должать*),  $к \rightarrow ч$  (*венок — венчать*),  $х \rightarrow ш$ ,  $щ$  (*страх — стращать*, *ветхий — ветшать*). Выделяем следующие классы чередований в последней букве основы:  $t_1^f V t_1^k = \tau_1$ ,  $t_1^k V t_1^c = \tau_2$ ,  $t_1^c V (t_1^ш V t_1^щ) = \tau_3$ ,  $\tau_1 V \tau_2 V \tau_3 = 1$ .

При выборе первой буквы  $s_1$  фрагмента выделяются следующие классы чередований:  $\mu_1 = s_1^a V s_1^n$ ,  $\mu_2 = s_1^e$ ,  $\mu_3 = s_1^y$ . Для данного класса фрагментов можно записать  $\mu_1 V \mu_2 V \mu_3 = 1$ .

Записываем правила появления того или иного значения внутри каждого класса чередований первой буквы фрагмента.

Для  $\mu_1 = s_1^a V s_1^n$ . Буква « $a$ » появляется после букв *б, в, г, д, ж, з, к, л, м, н, п, р, с, т, х, ц, ч, ш, щ*, т. е. после всех согласных, кроме *ф*, например: *пеленать, седлать*.

Уравнение имеет следующий вид:  $s_1^a = P_1 V P_3 V P_4 V z_2^n$ . Если последняя буква основы *а, е, и, у, ъ, ь, з', л', м', н', п', р', с'*, то выбирается буква « $я$ », например, *ронять, нырять*;  $s_1^e = P_2 V P_5 V P_6 V P_8 V z_2^c Z_2^n$ ,  $P_3 = z_2^b V z_2^b$ .

На выбор класса чередования влияет часть речи, от которой образован глагол, наличие или отсутствие префикса и семантика.

Если глаголы со значениями «наделять признаком», «проявлять признак» образованы от прилагательных, а также если глагол образован от глагола с префиксом и от существительных, имеет значение «действовать с помощью предмета» (*костылять*), «покрывать предметом» (*венчать*), «приводить в состояние» (*восторгать*), «совершать действие, свойственное лицу или животному» (*бродяжничать*), «проявлять свойство» (*малодушничать*), «делать кем-нибудь» (*пролетаризировать*), «совершать действия, свойственные для данного места» (*квартировать*), «помещать в данное место» (*складировать*), «проводить время» (*зимовать*), тогда выбирается  $\mu_1 = s_1^a V s_1^n$ :  $\mu_1 = z_1^f z_5^n V z_1^n (\omega_2^b V \omega_2^b) V z_1^c (\omega_1^a V \omega_1^b V \omega_1^c V \omega_1^d V \omega_1^e V \omega_1^f V \omega_1^g V \omega_1^h V \omega_1^i)$ .

$\mu_2 = s_1^e$  выбирается в том случае, если глагол образован от прилагательных со значением «приобретать признак относительно к изменчивости состояния» и со значением «приобретать признак лица или животного», образован от существительного  $\mu_2 = z_1^f \omega_2^a z_7^n V z_1^c \omega_1^n$ .

$\mu_3 = s_1^y$ , если глагол со значением «приобретать признак относительно к изменчивости состояния» образован от прилагатель-

ного и если глагол образован от глагола без префикса:  $\mu_3 = z_1^{\bar{1}} \omega_2^{\bar{2}} V z_1^{\bar{1}} z_6^{\bar{6}}$ .

Рассмотрим третий класс фрагментов с фиксированной буквой «и». В этот класс входят фрагменты *ич, ир, из, и*  $\underline{\quad}$ .

В случае присоединения фрагмента суффикса «и  $\underline{\quad}$ » происходят следующие чередования в последней букве основы:  $г \rightarrow ж$  (*утюг — утюжить*),  $к \rightarrow ч$  (*чудак — чудачить*),  $ц \rightarrow ч$  (*кузнец — кузнечить*),  $х \rightarrow ш$  (*грех — грешить*),  $ск \rightarrow щ$  (*воск — вощить*). Выделяются следующие классы чередований:  $t_1^{\bar{1}} V t_1^{\bar{1}} = \tau_1$ ,  $(t_1^{\bar{1}} V t_1^{\bar{1}}) V t_1^{\bar{1}} = \tau_2$ ,  $t_1^{\bar{1}} V t_1^{\bar{1}} = \tau_3$ ,  $t_2^{\bar{2}} t_1^{\bar{1}} V t_1^{\bar{1}} = \tau_4$ ;  $t_2$  — предпоследняя буква основы со значениями «с» и «с»,  $\tau_1 V \tau_2 V \tau_3 V \tau_4 = 1$ .

Вторая буква фрагмента выбирается в зависимости от того, от какой основы (русской или иностранной) образован глагол. Если основа русская, то «ч» или « $\underline{\quad}$ », если основа иностранная, то «р» или «з». На выбор буквы «ч» или « $\underline{\quad}$ » влияет наличие или отсутствие следующего фрагмента суффикса «а  $\underline{\quad}$ ». Если есть следующий фрагмент, то выбирается «ч», если его нет, то « $\underline{\quad}$ ».

На выбор букв «р» или «з» оказывает влияние ударность фиксированной буквы. Если фиксированная буква под ударением — «р» (*асфальтировать*), без ударения — «з» (*кристаллизировать*):  $s_2^{\bar{2}} = z_3^{\bar{3}} z_4^{\bar{4}}$ ,  $s_2^{\bar{2}} = z_3^{\bar{3}} z_4^{\bar{4}}$ ,  $s_2^{\bar{2}} = z_3^{\bar{3}} z_6^{\bar{6}}$ ,  $s_2^{\bar{2}} = z_3^{\bar{3}} z_6^{\bar{6}}$ .

Рассмотрим четвертый класс фрагментов с фиксированной буквой «н»:  $\underline{\quad} н, ан$ . При выборе первой буквы фрагмента выделяются следующие классы чередований:  $\mu_1 = s_1^{\bar{1}} V s_1^{\bar{1}}$ ,  $\mu_2 = s_1^{\bar{1}}$ ,  $\mu_1 V \mu_2 = 1$ .

Записываем правила появления того или иного значения внутри каждого класса.

Для  $\mu_1 = s_1^{\bar{1}} s_1^{\bar{1}}$ . Буква «а» выбирается тогда, когда глагол имеет значение «интенсивно однократно совершать действие» (*стегануть*). Буква « $\underline{\quad}$ » — если глагол имеет значение «однократно совершать действие» (*клонуть*):  $s_1^{\bar{1}} = \omega_3^{\bar{3}}$ ,  $s_1^{\bar{1}} = \omega_3^{\bar{3}}$ .

Выбор класса чередования  $\mu$  зависит от части речи мотивирующего слова. Если глагол образован от глагола, то выбирается  $\mu_1$ , если от прилагательного или существительного —  $\mu_2$ :  $\mu_1 = z_1^{\bar{1}}$ ,  $\mu_2 = z_1^{\bar{1}} V z_1^{\bar{1}}$ .

Список литературы: 1. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О математическом описании естественного языка. — Проблемы бионики, 1981, вып. 27, с. 9—13. 2. Бондаренко М. Ф., Шаронова Н. В. Задача фрагментации суффиксов имен существительных. — Проблемы бионики, 1981, вып. 27, с. 79—83. 3. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Об алгебре конечных предикатов. — АСУ и приборы автоматки, 1979, вып. 50, с. 14—20

Поступила в редколлегию 09.10.80.

**ОРГАНИЗАЦИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО МАШИННОГО СЛОВАРЯ  
ИМЕН С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНОЙ ФУНКЦИИ ХЕШИРОВАНИЯ**

Успешное выполнение любого запроса пользователя в информационных системах зависит от правильности передачи лексической информации в ЭВМ. Контроль правильности формирования словесной информации и (в случае необходимости) автоматическое исправление некоторых ошибок можно производить в процессе распознавания запроса.

Простейшей формой распознавания входных запросов является «сравнение с эталоном», когда цепочка символов запроса сравнивается с множеством эталонных образов. Из этих образов выбирается тот, который наиболее «согласован» или «близок» этой цепочке в соответствии с некоторым критерием.

Существует два метода в распознавании текстов: метод поиска по словарю и методы Маркова [1]. В методах Маркова используются вероятности появления символов, их сочетаний, вероятности перехода между буквами, вероятности предшествования одних символов относительно других и т. д. Эти методы, достаточно эффективно работающие в информационно-поисковых системах, имеют среднюю возможность коррекции ошибок.

Существующие методы поиска по фиксированному словарю ограничивают лексические возможности языка, а также требуют больших объемов памяти и затрат машинного времени.

Указанные два метода являются основными в существующих системах распознавания текстов, причем методы поиска по фиксированному словарю используются в основном при распознавании языков программирования, входных языков СУБД, а методы Маркова — в информационно-поисковых системах, в которых возможна выдача ответа с содержанием, релевантным запросу. При этом существующие методы организации словарей не имеют средств автоматической коррекции ошибок. К наиболее эффективным методам коррекции ошибок следует отнести метод Моргана [2]. Морган предлагает двухэтапный алгоритм обнаружения некоторых ошибок орфографии в программах написанных на специализированном алгоритмическом языке *CUPL*. Суть метода Моргана заключается в том, что то или иное неправильно написанное слово проверяется относительно ключевых слов, которые были бы законными в текущем контексте.

Однако недостатком данного метода является неэффективность его применения в словарях значительно большего объема чем словарь алгоритмического языка *CUPL*, например, в словарях входного языка СУБД, приближающегося к естествен-

ному как по своему составу, так и по объему. Эта неэффективность объясняется большим ростом размера задачи перебора словаря для выделения подмножества слов, для которых входное слово может быть написано неправильно, в зависимости от объема словаря.

В настоящее время уменьшение размерности задачи поиска производится при помощи методов прямой адресации или метода вычисления адреса. Такой метод основывается на предварительном определении требуемого множества имен  $S$  заданного словаря в полном фиксированном объеме с некоторой неопределенной информацией о содержимом таблицы [3]. На основании такой информации выбирается размер памяти  $M$  и строится хеш-функция, которая отображает  $S$  в множество адресов. Окончательным критерием выбора  $M$  и функции хеширования является оценка их эффективности на практике.

Очевидно, что в случае необходимости загрузить словарь в динамическом режиме, когда неизвестен предельный окончательный объем словаря, применить обычный метод хеширования невозможно в связи с ограничением памяти и ростом явления коллизии. Для устранения этого недостатка в данной статье предлагается использовать в качестве функции хеширования аддитивную функцию адресации. Уменьшение явления коллизии в этом случае достигается за счет использования метода упорядоченных цепочек с двойными связями [3]. Использование такой функции позволяет создать корректирующий словарь, который мог бы способствовать поиску и исправлению некоторых орфографических ошибок.

Пусть любой символ некоторого алфавита  $T$  представляет значение случайной величины с вероятностью появления в тексте, равной относительной частоте  $P \gamma_i$ , т. е. совокупность появлений различных символов с их вероятностями может рассматриваться как множество значений случайной величины  $X_A$  с дискретным распределением вероятностей  $P(\gamma_i)$ .

В результате исследования словаря фиксированного объема получены значения относительных частот или частостей символов, характеризующих информационное содержание текстов, из которых выбраны словарные единицы. Это означает, что если вероятность появления символа увеличивается, то его энтропия уменьшается, и такой символ несет минимальное количество информации. Примером могут служить почти все слова разговорного русского языка или специальные термины любой профессиональной области деятельности человека. Если из них выбросить наиболее частые гласные буквы, то большинство читателей поймет это слово, например, который — ктрй, хорошо — хрш. Аналогичными свойствами обладают даже целые предложения и тексты, если из них исключить наиболее часто встречающиеся слова, т. е., обладающие наибольшей статистической вероятностью.

В данном случае энтропия может служить мерой неопределенности появления символов [4]. При этом количество информации есть мера уменьшения неопределенности ситуации. Если бы все символы алфавита появлялись в тексте с равной вероятностью, то можно было бы говорить о состоянии наибольшей неопределенности, когда энтропия максимальна, т. е. всякое изменение ситуации в сторону выравнивания вероятностей случайных событий увеличивает энтропию. И наоборот, наибольший разброс вероятностей появления символов уменьшает энтропию, а значит, уменьшает неопределенность.

История развития русского языка такова, что люди, пользующиеся этим языком, постоянно трансформируют его с целью уменьшить неопределенность в его элементах [5]. Отсюда статистические вероятности появления символов, полученные в результате исследования современного русского языка, можно считать наиболее рационально распределенными в смысле эффективности использования их в качестве области определения аддитивной функции адресации.

В соответствии с этим зададим функцию  $f(A_i)$ , которая переводит имя  $A_i \in S$  в число  $\tilde{F}_{A_i}$  следующим образом:

$$f(A_i) : \sum_{\gamma \in T} P_{\gamma i} \rightarrow \tilde{F}_{A_i}$$

где  $P_{\gamma i}$  — частоты символов  $\gamma \in T$ ;  $T$  — некоторый алфавит;  $l_{A_i}$  — длина имени  $A_i$  в символах;  $i$  — номер позиции символа в имени  $A_i$ .

Для любых  $A_k, A_e \in S$  справедливо условие  $f(A_k + A_e) = f(A_k) + f(A_e)$ . Функцию адресации, удовлетворяющую этому условию, назовем аддитивной функцией адресации. Вычисление адреса имени в соответствии с приведенной функцией заключается в умножении значения аддитивной функции на число  $k$ , кратное десяти, до получения целочисленного значения адреса

$$\text{Адр}(A_i) = k \cdot F_{A_i}$$

Использование аддитивной функции адресации позволяет разработать структуру словаря, представляющую некоторую хеш-таблицу. Свойство хеш-таблицы состоит в том, что она делит всю выделенную память для словаря на два сегмента [3]. Один сегмент представляет собой файл рассеивания, в который помещаются все имена наименьшей длины с различными значениями адресов. Такой файл назовем файлом головных записей хеш-таблицы для корректирующего словаря. Второй сегмент представляет собой файл переполнения, в который помещаются все остальные имена, имеющие дубль-адреса с записями из файла головных записей. В построенном таким образом корректирующем словаре адрес рассеивания, вычисленный в со-

ответствии с аддитивной функцией хеширования, всегда будет указывать на самый первый элемент списка, т. е. на головную запись, или на некоторую свободную ячейку первого сегмента.

Применение такой структуры корректирующего словаря дает возможность динамически распределять память ЭВМ в зависимости от увеличения объема словаря. Однако при этом необходимо предварительное распределение памяти для головных записей хеш-таблицы, объем которой всегда можно вычислить, зная минимальное и максимальное значения частостей символов  $P_{\gamma_i}$  алфавита  $T$  и длины имени  $l_{A_j}$ .

Связи между записями первого и второго сегментов и внутри второго сегмента производятся с помощью указателей двух типов: 1 — указатели, связывающие записи с именами, имеющими один и тот же адрес, но разные длины —  $US$  и  $UP$ ; 2 — указатели, связывающие записи с именами, имеющими один и тот же адрес и одинаковую длину —  $USL$  и  $UPL$ .

Все записи файла рассеивания и файла переполнения, связанные указателями  $US$  и  $UP$ , назовем цепочками, а записи, связанные указателями  $USL$  и  $UPL$ , назовем подцепочками. Для каждой из подцепочек будет иметься головная запись из числа записей цепочки слов такого же адреса и длины. Все цепочки и подцепочки представляют замкнутые циклы, которые позволяют в процессе поиска продвигаться не только «вперед» (по указателям  $US$  и  $USL$ ), но и «назад» (по указателям  $UP$  и  $UPL$ ).

Все указатели в цепочках и подцепочках являются номерами областей, в которые записываются имена словаря, и предназначены для разрешения коллизий, т. е. действуют только для записей с одинаковыми адресами, полученными в результате применения к имени аддитивной функции адресации. На рисунке показана структурная схема корректирующего словаря. Для увеличения скорости поиска в словаре проводится предварительный этап упорядочивания записей в цепочках, т. е. на именах с одинаковыми адресами устанавливается линейный порядок «>» на значениях длин имен. Поэтому головными записями являются записи, в которые записаны имена с наименьшей длиной. Признаком конца каждой цепочки является значение указателя  $US$ , равное адресу головной записи цепочки. В головной записи указатель  $UP$  равен значению адреса последней записи в цепочке.

Физическое расположение имен в памяти ЭВМ соответствует порядку их поступления в хеш-таблицу. Во всех записях подцепочек имен одинакового адреса и длины значения указателей  $US$  и  $UP$  равны нулю, кроме головных записей подцепочек, и их нельзя использовать для поиска в словаре.

Если корректирующий машинный словарь содержит  $|S^0|$  имен, то сложность поиска в этом словаре примерно в  $c|S^0|$  раз меньше, чем при последовательном поиске. Здесь  $c \geq 1$  —

коэффициент, учитывающий длину связанной цепочки и упорядоченность по длине имени внутри каждого из них.

Результаты экспериментальной проверки характеристики корректирующего словаря с использованием аддитивной функции адресации и метода упорядоченных цепочек с двойными

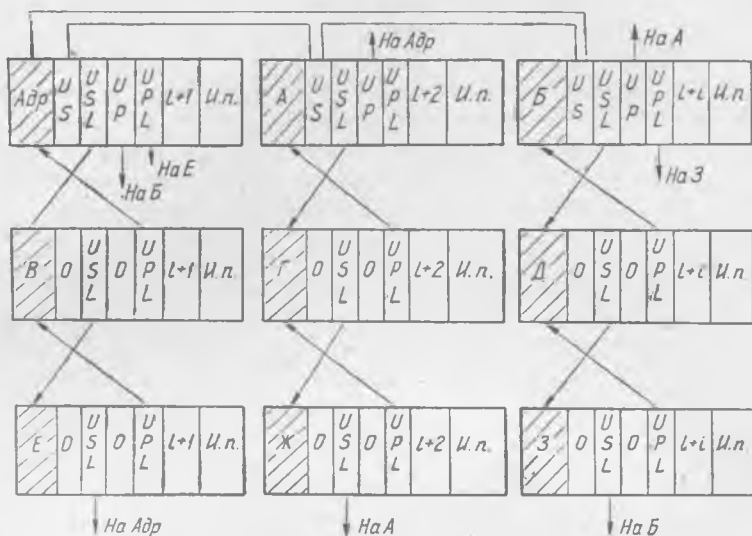


Схема организации связей в корректирующем словаре:

Адр — значение хеш-адреса; А, Б, В, ... — номера областей памяти файла переполнения, в которые записаны имена с хеш-адресом, равным Адр; и. п. — информационное поле. Записи с адресами Адр. А, Б образуют цепочки, а записи с адресами В—Е, Г—Ж, Д—З — соответственно подцепочки

связями для разрешения коллизий представлены в табл. 1. Отсюда видно, что выбранная функция адресации имен удовлетворяет основным двум требованиям к хорошей хеш-функции [3]: вычисление хеш-функции должно быть очень быстрым; она должна минимизировать число коллизий.

Таблица 1

Область определения аддитивной функции адресации	Объем словаря	Всего занятых головных записей	Кэф-фициент заполнения головных записей, %	Размер коллизии в словах* средний	Адреса с явлением коллизии, %
Значения статистико-вероятностного распределения символов	765	483	34,2	1,75	36,9
	1200	672	56,0	1,78	39,1

\* min = 1,0; max = 0,5.

Очевидно, что вычисление значения аддитивной хеш-функции адресации  $f(A_j)$  не представляет труда, так как в любом случае все значения частот символов  $P\gamma_i$  можно сразу поместить в оперативную память ЭВМ. Из таблицы видно также, что средняя длина связанной цепочки имен, т. е. число коллизий, не превышает двух для словаря объемом 1200 имен. Это означает, что среднее число проб для поиска в такой таблице не превышает известного значения, которое дает применение алгоритма поиска с вставкой по рассеянной таблице с цепочками [3].

Таким образом, среднее число проб  $C_N$  для разработанного метода организации корректирующего словаря составит:

$C_N^1 \approx e^{-\lambda} + \lambda$  — при неудачном поиске;  $C_N \approx 1 + \frac{1}{2}\lambda$  — при удачном поиске, где  $\lambda$  — коэффициент загрузки файла головных записей хеш-таблицы.

Для экспериментального словаря объемом 1200 имен эти значения соответственно равны:  $C_N^1 \approx e^{-0.56} + 0,56 \approx 1,167$ ,  $C_N \approx 1 + \frac{1}{2}0,56 \approx 1,28$ .

В заключение можно сказать, что практические эксперименты построения и эксплуатации корректирующего словаря с использованием аддитивной функции адресации дали результаты, не уступающие известным [6] (табл. 2).

Таблица 2

Вычисление хеш-функции и метод поиска	$\lambda$	Среднее число проб при удачном поиске
Метод деления	0,5	1,39
То же, с использованием метода цепочек для разрешения коллизий	0,5	1,25
Метод линейного опробования для разрешения коллизий	0,5	1,5
Метод раздельных упорядоченных цепочек с двойными связями	0,56	1,28

Список литературы: 1. *Shinghal R.* A bottom-up and topdown approach using context in text recognition.— *Int. Man-Machine Studies*, 1979, 11, p. 201—212. 2. *Morgan R. L.* Spelling Correction in Systems Programs.— *Comm. of the ACM*, 1970, 13, № 2, p. 90—94. 3. *Кнут Д.* Искусство программирования для ЭВМ. Т. 3. Сортировка и поиск.— М.: Мир, 1978.— 844 с. 4. *Тарасенко Ф. П.* Введение курс теории информации.— Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963.— 240 с. 5. *Пиотровский Р. Г., Бектаев К. Б., Пиотровская А. А.* Математическая лингвистика.— М.: Высшая школа, 1977.— 383 с. 6. *Бертуисс А. Т.* Структуры данных.— М.: Статистика, 1974.— 408 с.

Поступила в редколлегию 10.12.80.

## ПРЕДИКАТ БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ

В этом разделе мы получим результаты, обобщающие доказанные ранее теоремы о представлении предикатов на множествах через предикаты равенства и предикаты упорядочения с помощью функций  $f_1$  и  $f_2$ .

Пусть  $E$  — произвольное множество. Каждое бинарное отношение  $\rho$  на  $E$  определяется некоторым подмножеством  $F$  декартова квадрата  $E \times E$ . Говорят, что элемент  $x \in E$  находится в отношении  $\rho$  к элементу  $y$ , если  $(x, y) \in F$ . Запись:  $x\rho y$ . Запись  $x\not\rho y$  будет означать, что  $x$  и  $y$  не находятся в отношении  $\rho$ . Бинарное отношение  $\rho$  называется рефлексивным, если  $x\rho x$ , симметричным, если из  $x\rho y$  следует  $y\rho x$ , транзитивным, если из  $x\rho y$  следует  $x\rho z$ .

Если  $E$  — упорядоченное множество, то бинарное отношение  $\rho: x \leq y$  рефлексивно, транзитивно и антисимметрично (т. е. если  $x\rho y$  ( $x \neq y$ ), то  $y\not\rho x$ ).

Каждое бинарное рефлексивное отношение  $\rho$  на множестве  $E$  определяет трехзначную функцию  $D_\rho(x, y)$  на  $E \times E$ :

$$D_\rho(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } x = y; \\ 1, & \text{если } x\rho y, x \neq y; \\ -1, & \text{если } x\not\rho y, x \neq y. \end{cases} \quad (1)$$

Если  $L$  — произвольное множество и  $f_1: L \rightarrow E$ ,  $f_2: L \rightarrow E$  — два отображения множества  $L$  на  $E$ , то функция  $D_\rho(x, y)$  (1) определяет функцию  $T(x, y) = D_\rho(f_1(x), f_2(y))$  (2) на  $L \times L$ , принимающую значения 0, 1, -1. Мы будем решать задачу о представимости функции  $T(x, y)$  в виде (2) при различных предположениях относительно бинарного отношения  $\rho$ . Функция  $T(x, y)$  определяет два отношения эквивалентности на множестве  $L$ :

$$(I) \quad x_1 \sim x_2, \text{ если } T(x_1, y) = T(x_2, y) \quad (\forall y \in L),$$

$$(II) \quad y_1 \sim y_2, \text{ если } T(x, y_1) = T(x, y_2) \quad (\forall x \in L).$$

(Эти эквивалентности уже неоднократно использовались в предыдущих разделах).

В соответствии с определениями (I) и (II) множество распадается на классы эквивалентных между собой элементов:  $L = \cup X_i$ ,  $X_i \cap X_j = \emptyset$  ( $i \neq j$ ) (3),  $L = \cup Y_i$ ,  $Y_i \cap Y_j = \emptyset$  ( $i \neq j$ ) (4). Разбиение (3) осуществляется по отношению к эквивалентности (I), а разбиение (4) — по отношению к эквивалентности (II). Далее, если  $\rho$  — произвольное рефлексивное бинарное отношение, то трехзначная функция  $T(x, y)$  (2) обладает следующими двумя важными свойствами (эти свойства уже возникали ранее при исследовании предикатов, связанных с упорядоченными множествами).

1) Для любого  $x \in L$  ( $y \in L$ ) существует такой элемент  $y \in L$  ( $x \in L$ ), что  $T(x, y) = 0$  (соответственно  $T(x, y) = 0$ ). Доказательство проводится так же, как и в ранее рассмотренных частных случаях.

Так как  $f_1$  и  $f_2$  — отображения  $L$  на  $E$ , то существует такой элемент  $y \in L$ , что  $f_1(x) = f_2(y)$ , и тогда  $T(x, y) = D_p(f_1(x), f_2(y)) = 0$ . Аналогично доказывается симметричное утверждение (с перестановкой элементов  $x$  и  $y$ ).

2) Если  $T(x_1, y_1) = T(x_2, y_2) = 0$  для некоторого элемента  $y_1 \in L$ , то для всех  $y \in L$ ,  $T(x_1, y) = T(x_2, y)$ .

Если  $T(x_1, y_1) = T(x_1, y_2) = 0$  для некоторого  $x_1 \in L$ , то для всех  $x \in L$   $T(x, y_1) = T(x, y_2)$ . Докажем первое утверждение 2 (второе доказывается точно так же). Если  $T(x_1, y_1) = T(x_2, y_1) = 0$ , то  $D_p(f_1(x_1), f_2(y_1)) = D_p(f_1(x_2), f_2(y_1)) = 0$ , откуда  $f_1(x_1) = f_2(y_1) = f_1(x_2)$ . Тогда для любого  $y \in L$ ,  $T(x_1, y) = D_p(f_1(x_1), f_2(y)) = D_p(f_1(x_2), f_2(y)) = T(x_2, y)$ .

Из свойств 1 и 2 функции  $T(x, y)$  вытекает следующая важная теорема.

**Теорема 1.** *Существует взаимно однозначное соответствие между множествами  $X = \{X_i\}$  и  $Y = \{Y_i\}$  в разложениях (3) и (4). Это соответствие задается так: каждому подмножеству  $X_i$  ставится в соответствие такое подмножество  $Y_j$ , что для некоторых  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$ ,  $T(x, y) = 0$ .*

Доказательство. Из свойств 1, 2 функции  $T(x, y)$  следует, что  $x_1 \sim x_2$  ( $y_1 \sim y_2$ ) тогда и только тогда, когда для некоторого  $y \in L$  ( $x \in L$ )  $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 0$  (соответственно  $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 0$ ).

В самом деле, если хотя бы для одного  $y$  выполняется равенство  $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 0$ , то в силу свойства 2 функции  $T(x, y)$  для всех  $y \in L$  имеем  $T(x_1, y) = T(x_2, y)$ , т. е.  $x_1 \sim x_2$  (аналогично доказывается симметричное утверждение).

Возьмем теперь произвольное множество  $X_i$  и пусть  $x \in X_i$ . Согласно свойству 1 существует элемент  $y \in L$  такой, что  $T(x, y) = 0$ . Пусть  $y \in Y_j$ . Если  $z \in Y_s$ ,  $s \neq j$ , то из равенств  $T(x, y) = 0$ ,  $T(x, z) = 0$  по доказанному следовало бы, что  $y \sim z$ , т. е.  $Y_s = Y_j$ , что невозможно. Следовательно, для всех  $y \in Y_j$  имеет  $T(x, y) \neq 0$ .

Таким образом, каждому подмножеству  $X_i$  соответствует однозначно определенное подмножество  $Y_j$ , такое, что для всех  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$  выполняется равенство  $T(x, y) = 0$ .

Если  $X_i \neq X_j$ , то соответствующие этим классам подмножества  $Y_i$  и  $Y_j$  не совпадают, ибо в противном случае для элементов  $x_i \in X_i$ ,  $x_j \in X_j$ ,  $y \in Y_i$  выполнялись бы равенства  $T(x_i, y) = T(x_j, y) = 0$ , откуда по предыдущему следовало бы равенство  $X_i = X_j$ .

Если  $X_i$  пробегает множество  $X$ , то  $Y_j$  пробегает множество  $Y$ , так как на основании свойства 1 для каждого  $y \in L$  существует  $x \in L$ , такой, что  $T(x, y) = 0$ . Теорема доказана.

В силу теоремы 1 классы эквивалентности  $X_i$  и классы  $Y_j$  можно занумеровать так, чтобы соответствующие друг другу классы  $X_i$  и  $Y_i$  имели одинаковые номера. В дальнейшем мы будем предполагать, что эта нумерация уже осуществлена.

Теорема 1 позволяет ввести для классов  $X_i$  следующее бинарное отношение  $\rho^*$ :  $X_i \rho^* X_j$ , если для  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_i$ ,  $T(x, y) = 1$  или  $T(x, y) = 0$ .

Напомним, что ввиду нашего соглашения классы  $X_i$  и  $Y_j$  соответствуют друг другу в силу теоремы 1. Поэтому условие  $X_i \rho^* Y_j$ , если  $T(x, y) = 0$  ( $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$ ), означает, что  $i = j$ , т. е. что бинарное отношение  $\rho^*$  на множестве  $X = \{X_i\}$  рефлексивно. По предыдущему бинарное отношение  $\rho^*$  на множестве  $X$  позволяет ввести трехзначную функцию  $D_{\rho^*}(X_i, X_j)$  на множества  $X \times X$ :

$$D_{\rho^*}(X_i \times X_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i = X_j, \\ 1, & \text{если } X_i \rho^* X_j, \\ -1, & \text{если } X_i \bar{\rho}^* X_j. \end{cases} \quad (5)$$

Определим далее два отображения  $f_1$  и  $f_2$  множества  $L$  на множество  $X$ .

Если  $x \in X_i$ , то положим  $f_1(x) = X_i$ ; если  $y \in Y_i$ , то положим  $f_2(y) = X_i$  (6).

**Теорема 2.** Если  $T(x, y)$  — трехзначная функция, удовлетворяющая условиям 1 и 2, то имеет место формула  $T(x, y) = D_{\rho^*}(f_1(x), f_2(y))$  (7) (см. (2), (5), (6)).

**Доказательство.** Пусть  $T(x, y) = 0$ . Тогда  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_i$  и  $f_1(x) = X_i$ ,  $f_2(y) = X_i$ . Следовательно,  $D_{\rho^*}(f_1(x), f_2(y)) = D_{\rho^*}(X_i, X_i) = 0$ . Пусть далее  $T(x, y) = 1$  и  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_i$ . Тогда в силу определения бинарного отношения  $\rho^*$  имеем  $X_i \rho^* X_i$ , откуда по (5)  $D_{\rho^*}(X_i, X_i) = 1$  или  $D_{\rho^*}(f_1(x), f_2(y)) = 1$ . Наконец, если  $T(x, y) = -1$ ,  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$ , то имеем  $X_i \bar{\rho}^* X_j$ , что по (5) дает  $D_{\rho^*}(X_i, X_j) = -1$  или  $D_{\rho^*}(f_1(x), f_2(y)) = -1$ . Теорема доказана.

Теорема 2 допускает также следующую формулировку:

**Теорема 2'.** Для того, чтобы трехзначная функция  $T(x, y)$  на произвольном множестве  $L \times L$  допускала представление в виде (2) через предикат  $D_{\rho}$  рефлексивного бинарного отношения  $\rho$  на некотором множестве  $E$ , необходимо и достаточно, чтобы она удовлетворяла свойствам 1 и 2.

Исследуем теперь представимость трехзначной функции  $T(x, y)$  в виде (2) при различных более жестких ограничениях на бинарное отношение  $\rho$  в этой формуле.

**Теорема 3.** Трехзначная функция  $T(x, y)$  тогда и только тогда представима в виде (2), где  $\rho$  — рефлексивное и симметричное бинарное отношение на некотором множестве  $E$ , когда  $T(x, y)$  удовлетворяет условиям 1, 2 и следующему дополнительному условию: 3) если  $T(x_1, y_2) = 1$ ,  $T(x_1, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y_2) = 0$ , то  $T(x_2, y_1) = 1$ .

Доказательство. Пусть в формуле (2)  $\rho$  — рефлексивное и симметричное бинарное отношение. Имеем  $T(x_1, y_1) = D_\rho(f_1(x_1), f_2(y_1)) = 0$ ,  $T(x_2, y_2) = D_\rho(f_1(x_2), f_2(y_2)) = 0$ . Следовательно,  $f_1(x_1) = f_2(y_1)$ ;  $f_1(x_2) = f_2(y_2)$ . Тогда  $T(x_2, y_1) = D_\rho(f_1(x_2), f_2(y_1)) = D_\rho(f_2(y_2), f_1(x_1)) = D_\rho(f_1(x_1), f_2(y_2)) = T(x_1, y_2) = 1$ .

Мы установили необходимость условия 3. Докажем, что условия 1—3 достаточны для справедливости теоремы 3.

Предположим, что эти условия имеют место. Тогда из свойств 1 и 2 вытекает формула (7), где бинарное отношение  $\rho^*$  определяется согласно (5). Покажем, что  $\rho^*$  — симметричное отношение. Действительно, пусть  $X_i \rho^* X_j$  ( $i \neq j$ ). Тогда для  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$  выполняется равенство  $T(x, y) = 1$  (8). Пусть  $y_1 \in Y_i$ ,  $x_2 \in X_j$ . Тогда  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y) = 0$  (9).

Из равенства (8), (9) на основании свойства 3 заключаем, что  $T(x_2, y_1) = 1$ , откуда  $X_j \rho^* X_i$ , т. е. отношение симметрично. Теорема доказана.

**Теорема 4.** Трехзначная функция  $T(x, y)$  тогда и только тогда представима в виде (2), где  $\rho$  — рефлексивное и антисимметричное бинарное отношение, когда  $T(x, y)$  удовлетворяет условиям 1 и 2 и следующему дополнительному условию: 4) если  $T(x, y) = 1$  и  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y) = 0$ , то  $T(x_2, y_1) = -1$ .

Доказательство. Пусть имеет место формула (2),  $T(x, y) = D_\rho(f_1(x), f_2(y))$  (2), где  $\rho$  — рефлексивное и антисимметричное бинарное отношение. Если  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y) = 0$ , то в силу (2) имеем  $f_1(x) = f_2(y_1)$ ;  $f_1(x_2) = f_2(y)$  (10).

Тогда в силу (10) и антисимметричности отношения  $\rho$ ,  $T(x, y) = D_\rho(f_1(x), f_2(y)) = D_\rho(f_2(y_1), f_1(x_2)) = -D_\rho(f_1(x_2), f_2(y_1)) = -T(x_2, y_1)$ , т. е.  $T(x_2, y_1) = -1$ .

Докажем теперь достаточность условий теоремы.

Пусть выполняются условия 1, 2, 4. Тогда на основании теоремы 2 имеет место формула  $T(x, y) = D_\rho(f_1(x), f_2(y))$  (7).

Покажем, что в этой формуле  $\rho^*$  — антисимметричное бинарное отношение. Действительно, пусть  $X_i \rho^* X_j$  ( $i \neq j$ ). Тогда элементов  $x \in X_i$ ,  $y \in Y_j$  согласно определению отношения  $\rho^*$  (см. доказательство формулы (7)) имеем  $T(x, y) = 1$ . Пусть  $y_1 \in Y_i$ ,  $x_2 \in X_j$ . Тогда  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y) = 0$ . Из трех равенств  $T(x, y) = 1$ ,  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_2, y) = 0$  на основании свойства 4 получаем  $T(x_2, y_1) = -1$ , что означает  $X_j \rho^* X_i$ .

Итак, из  $X_i \rho^* X_j$  вытекает  $X_j \rho^* X_i$ , т. е. отношение  $\rho^*$  антисимметрично. Теорема доказана.

**Теорема 5.** Трехзначная функция  $T(x, y)$  тогда и только тогда представима в виде (2), где  $\rho$  — рефлексивное и транзитивное бинарное отношение, если  $T(x, y)$  удовлетворяет условиям 1 и 2 и следующему свойству: 5) если  $T(x, y) = 1$ ,  $T(x_1, y) = 0$ ,  $T(x_1, y_1) = 1$ , то  $T(x, y_1) = 1$ .

Доказательство. Пусть имеет место формула  $T(x, y) = D_\rho(f_1(x), f_2(y))$  (2), где отношение  $\rho$  рефлексивно и транзитивно.

Если  $T(x, y) = 1$ ,  $T(x_1, y) = 0$ ,  $T(x_1, y_1) = 1$ , то  $D_p(f_1(x), f_2(y)) = 1$ ,  $f_1(x_1) = f_2(y)$ ,  $D_p(f_1(x_1), f_2(y_1)) = 1$ , откуда  $D_p(f_2(y), f_2(y_1)) = 1$ , что в силу транзитивности отношения  $\rho$  дает  $D_p(f_1(x), f_2(y_1)) = 1$  или  $T(x, y_1) = 1$ . Это доказывает необходимость условия 5.

Проведем доказательство достаточности условий теоремы 5. Пусть  $T(x, y)$  удовлетворяет свойствам 1, 2, 5. На основании 1 и 2 имеет место формула (7). Покажем, что в этой формуле  $\rho^*$  — рефлексивное и транзитивное отношение. В самом деле, пусть  $X_{i\rho^*}X_j$  и  $X_{j\rho^*}X_k$  (11). Пусть  $x_1 \in X$ ,  $x_2 \in X_j$ ,  $y_2 \in Y_j$ ,  $y_3 \in Y_k$ . Тогда на основании (11)  $T(x_1, y_2) = 1$ ,  $T(x_2, y_2) = 0$ ,  $T(x_2, y_3) = 1$ .

Отсюда в силу свойства 5 имеем  $T(x_1, y_3) = 1$ , что означает  $X_{i\rho^*}X_k$  (12).

Формулы (11) и (12) доказывают транзитивность отношения. Теорема доказана.

Пусть  $E$  — частично упорядоченное множество, а  $\rho$  — бинарное отношение, определяющее частичную упорядоченность:  $x\rho y$ , если  $x \leq y$ .

Отношение  $\rho$  рефлексивно, антисимметрично и транзитивно. Наоборот, всякое рефлексивное, антисимметричное и транзитивное бинарное отношение  $\rho$  на произвольном множестве  $E$  определяет частичное упорядочение на  $E$ , если положить  $x \leq y$  при  $x\rho y$ . Отсюда и из теорем 2, 4, 5 вытекает следующее утверждение.

**Теорема 6.** *Трехзначная функция  $T(x, y)$  на множестве  $L \times L$  тогда и только тогда представима в виде (2), где  $\rho$  — бинарное отношение частичной упорядоченности, когда  $T(x, y)$  одновременно удовлетворяет условиям 1, 2, 4, 5.*

Частично упорядоченное множество  $E$  является упорядоченным, если для любых двух элементов  $x, y \in E$  либо  $x \leq y$ , либо  $y \leq x$ .

Пусть  $E$  — упорядоченное множество, а  $\rho$  — соответствующее  $E$  бинарное отношение:  $x\rho y$ , если  $x \leq y$ . Тогда функция  $T(x, y)$  вида (2) в силу теоремы 6 удовлетворяет условиям 1, 2, 4, 5, и, кроме того, следующему дополнительному свойству: 6) пусть  $x, y \in L$ ,  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_1, y) = 0$ . Если  $T(x, y) \neq 0$ , то либо  $T(x_1, y_1) = 1$ , либо  $T(x_1, y_1) = -1$ .

Доказательство. Из равенств  $T(x, y_1) = 0$ ,  $T(x_1, y) = 0$  и из (2) следует, что  $f_1(x) = f_2(y_1)$ ;  $f_1(x_1) = f_2(y)$ . Пусть  $T(x, y) = -1$ . Имеем  $T(x, y) = D_p(f_1(x), f_2(y)) = -1$ . Тогда в силу свойства отношения  $\rho$   $D_p(f_2(y), f_1(x)) = -D_p(f_1(x), f_2(y)) = 1$  или  $D_p(f_1(x_1), f_2(y_1)) = T(x_1, y_1) = 1$ .

**Теорема 7.** *Трехзначная функция  $T(x, y)$  на множестве  $L \times L$  тогда и только тогда представима в виде (2), где  $\rho$  — бинарное отношение упорядоченности, когда  $T(x, y)$  одновременно удовлетворяет условиям 1, 2, 4—6.*

Доказательство. Необходимость условий теоремы вытекает из теоремы 6 и доказанного для отношения упорядоченности  $\rho$  свойства 6.

Пусть для  $T(x, y)$  выполняются условия 1—6. Тогда имеет место формула (7). Покажем, что отношение  $\rho^*$  в этой формуле превращает множество  $\{X_i\}$  в упорядоченное множество.

Действительно, в силу теоремы 6 отношение  $\rho^*$  рефлексивно, антисимметрично и транзитивно.

Пусть  $X_i \rho^* X_j$  (мы употребляем предыдущие обозначения). Пусть  $x_1 \in X_i, y_1 \in Y_i, x_2 \in X_j, y_2 \in Y_j$ . Тогда  $T(x_1, y_2) = -1$ ;  $T(x_2, y_2) = 0, T(x_1, y_1) = 0$ .

В силу свойства (6) получаем  $T(x_2, y_1) = 1$ , т. е.  $X_j \rho^* X_i$  (см. определение отношения  $\rho^*$ ).

Теорема доказана.

Поступила в редколлегию 14.03.80.

УДК 621.391

Ф. А. ДОМНИН, канд. техн. наук, А. И. ПОВОРОЗНИК

### ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ СТЕПЕННЫХ ПОЛИНОМОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОДГОТОВКИ ГРУППЫ ОПЕРАТОРОВ

Задаче подготовки операторов уделяется большое внимание. В статье ставится вопрос разработки алгоритмов и критериев, позволяющих оценить результаты совместной подготовки группы операторов, проводимой по однотипной программе. Как правило, при выполнении такого процесса обучения деятельность операторов фиксируется различными количественными показателями относительно принятых норм — реакция организма, время выполнения задания, параметры изучаемого процесса (механическое перемещение и т. д.), которые могут быть представлены в виде таблиц или графиков. Будем предполагать, что в качестве исходной информации задан массив графиков  $y_{ij}$ , отражающий результаты тренировки:

$$y_{ij} = f(t); 1 \leq t \leq t_k \quad (1),$$

где  $i$  — число операторов;  $j$  — число экспериментов программы;  $t_k$  — продолжительность периода обучения операторов (число часов, дней и т. д.).

Предполагаемый способ оценки основан на аппроксимации указанных кривых степенными полиномами и анализе аппроксимирующих полиномов. Обычно некоторые графики имеют горизонтальные участки, что резко увеличивает степень аппроксимирующего полинома. Такой полином не отражает реального процесса, поэтому удобно разбивать графики на участки и проводить аппроксимацию по участкам. Оценка каждого графика проводится по критерию, который удобно представить в векторной форме в  $n$ -мерном пространстве с компонентами

$$K_i = \frac{\sigma}{\sum_{l=1}^{m_i} M_l} \quad (2)$$

Здесь  $M_i$  — эффективная степень аппроксимирующего полинома  $i$ -го участка графика;  $\sigma$  — среднее значение ординат графика;  $m_1$  — число участков графика, каждый из которых аппроксимируется отдельным полиномом;  $K_2 = \sum_{i=1}^{m_1} \sigma_i L_i$  (3) — величина горизонтальных участков ( $\sigma_i, L_i$  — уровень и длина  $i$ -го горизонтального участка;  $m_2$  — число горизонтальных участков;  $K_3$  — направленность процесса обучения).

Величина размерности критерия определяется необходимо-стью более всестороннего описания поведения оператора.

Алгоритм состоит из следующих блоков. 1. Блок определения оптимальной точности  $\epsilon_0$  аппроксимации. 2. Блок выявления горизонтальных участков и разбивки исходного графика на участки. 3. Блок аппроксимации. 4. Блок определения критерия.

Рассмотрим работу каждого блока.

1. Погрешность аппроксимации увеличивается с постоянным шагом и для каждой погрешности определяются степени  $n_{ij}$  аппроксимирующих полиномов семейства графиков  $y_{ji}$ . При увеличении погрешности аппроксимации степень аппроксимирующего полинома уменьшается и достигает  $n_{ij}=0$ , т. е. кривая аппроксимируется при некоторой  $\epsilon$  своим средним значением. В зависимости от вида исходной функции процесс уменьшения степени происходит по различным законам, поэтому характерным для данного графика надо считать тот полином, который аппроксимирует исходный график в наиболее широком диапазоне изменения погрешности. В качестве оптимальной погрешности всего семейства графиков выбирается та, которая попадает в максимальное число диапазонов характерных полиномов. Так как в данном блоке в процессе увеличения погрешности степень аппроксимирующего полинома падает до 0, то при  $n_{ij}=1$  определяется направленность процесса обучения  $K_3 = a_1 t_k$  (4), где  $a_1$  — старший коэффициент аппроксимирующего полинома 1 степени.

2. Работа блока определения горизонтальных участков происходит следующим образом: горизонтальными участками считаются участки длительностью  $L_{mn} > L_{min}$ , для которых выполнено условие

$|y_i - \sigma_{mn}| < \epsilon_0/2; i = \overline{m, n}$  (5). Здесь  $\sigma_{mn} = \frac{\sum_{i=m}^n y_i}{n-m+1}$  — среднее значение;  $y_i$  — ордината  $i$ -й точки графика;  $L_{min}$  — минимально допустимая длина горизонтального участка.

Таким образом, данный блок, увеличивая поочередно число точек графика, проверяет выполнение условия (5). В случае выполнения этого условия запоминаются граничные точки  $n, m$  и  $\sigma_{mn}$ . При невыполнении условия (5) проверка продолжается, на-

ачиная со следующей точки до тех пор, пока проверке не будут подвергнуты все точки графика. Участки графика между горизонтальными участками подвергаются аппроксимации. Если график не содержит горизонтальных участков, то аппроксимации подвергается весь график.

3. Аппроксимация графика (или его участка) выполняется по следующему алгоритму: пусть известны точки  $A_i(t_i, y_i)_{i=\overline{1, n_1}}$ , через которые проходит аппроксимирующий полином  $L(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$  (6) неизвестной степени  $n$ , причем  $n_1 > n + 1$ . Используя известные значения координат точек  $A_i$ , выполним процедуру понижения степени исходного полинома путем переноса на каждом  $i$ -м шаге системы координат с точки  $A_{i-1}$  в точку  $A_i$  с последующим делением  $y_i$  на значение  $t_j (j = \overline{1, n_1})$ . При этом ординаты точек  $A_j$  изменяются, теперь они являются точками нового полинома степени не выше  $n-i$ . Для пояснения изложенного выполним несколько промежуточных преобразований с исходным полиномом  $L(t)$ . Перенесем начало координат в точку  $A_1(t_1, y_1)$  и обозначим ее координаты  $\alpha_1 = t_1, \beta_1 = y_1$ . Точка  $A_1$  принадлежит полиному  $L(t)$ , поэтому  $L(T_1) = b_1 T_1 + b_2 T_1^2 + \dots + b_n T_1^n$  (7), где  $L(T_1) = L(t) - \beta_1; T_1 = t - \alpha_1$ .

Выражение (7) не содержит свободного члена  $b_0$  и делится без остатка на аргумент  $T_1$ . Выполнив деление ординат точек  $A_j$  на значение их абсцисс в новой системе координат, получим  $L_1(T_1) = b_1 + b_2 T_1 + \dots + b_n T_1^{n-1}$  (8).

Этот полином имеет степень на единицу меньше исходного  $L(t)$ .

В точке  $A_1$  значение частного является неопределенностью вида  $\frac{0}{0}$ , поэтому данная и аналогичные ей точки исключаются из дальнейших расчетов. Далее процедура вычисления повторяется, т. е. переносится начало координат в точку  $A_2(t_2, y_2)$  — значение ординат  $y_j$  точек  $A_j$  после каждого шага меняется, определяется  $\alpha_2 = t_2, \beta_2 = y_2$ , находится значение  $L_1(T_2) = L_1(t) - \beta_2; T_2 = t - \alpha_2$  и выполняется деление, в результате которого получается  $L_2(T_2) = C_1 + C_2 T_2 + \dots + C_{n-1} T_2^{n-2}$  (9).

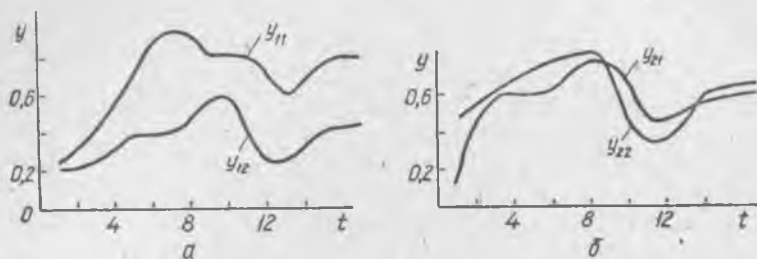
Процесс вычисления представляется следующим образом:

$$\frac{\frac{L(t) - \beta_1}{t - \alpha_1} - \beta_2}{\frac{\quad}{t - \alpha_{n-1}} - \beta_n} = L_n(t) = \beta_{n+1} = \text{const.} \quad (10)$$

Процедура получения полинома  $L(t)$  продолжается до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность аппроксимации  $|y_i - L(t)| \leq \epsilon_0$  (11). Преобразовав выражение (10) при достижении условия (11), получим  $L(t) = \beta_1 + (t - \alpha_1)(\beta_2 + (t - \alpha_2)(\dots)(\beta_n + (t - \alpha_n)\beta_{n+1})\dots)$  (12). Раскрыв скобки и приведя подобные члены,

можно найти коэффициенты полинома в виде (6).

Если изложенную выше процедуру проводить над всеми точками графика, то погрешность аппроксимации на  $i$ -м шаге можно определить без построения полинома по выражениям (12) или (6). Считая  $\varepsilon = f(t)$  и используя выражение (10), (11), записываем:  $\varepsilon(t) = \varepsilon_i(t)(t - \alpha_1)(t - \alpha_2) \dots (t - \alpha_i)$  (13), где  $\varepsilon_i(t)$  характеризует от-



Графики изменения количественного показателя деятельности двух операторов, участвующих в двух экспериментах во время периода обучения

клонение точек исходной функции после преобразования ее на  $i$ -м шаге от своего среднего значения. Тогда условие (11) запишем так:  $|\varepsilon(t_j)|_{j=1, N} \leq \varepsilon_0$  (14). Здесь  $N$  — число точек исходного графика.

Определение точек  $A_i$ , через которые проходит полином, наилучшим образом аппроксимирующий исходную функцию, возможно на основании теоремы о чебышевском альтернансе, но как показано в [1], данным методом решение может быть получено лишь в некоторых частных случаях. Предложен и опробован метод определения очередной точки  $A_i$  на каждом  $i$ -м шаге, заключающийся в том, что в качестве очередной точки берется та, для которой определенная по выражению (13) погрешность  $\varepsilon_i$  является максимальной, причем координата точки  $A_i$  вычисляется как  $y_i = y_j + \Delta_i$  (15), где  $y_i$  — ордината точки  $A_i$ ;  $y_j$  — ордината  $j$ -й точки исходного графика, имеющая максимальную  $\varepsilon(t_j)$ ;

$$\Delta_i = \begin{cases} +\varepsilon_0 & \text{при } \varepsilon(t_j) < 0; \\ -\varepsilon_0 & \text{при } \varepsilon(t_j) > 0. \end{cases} \quad (16)$$

При этом на первом шаге наилучшей аппроксимацией считается среднее значение  $\sigma$  (полином в нулевой степени).

4. В блоке определения критерия для каждого графика устанавливаются частные критерии по формулам (2) — (4), интегральный критерий находим так:  $K_{ij} = K_1(1 + K_2)(1 + K_3)$  (17). Суммируя для каждого оператора  $K_{ij}$  по всем экспериментам программы, определяется показатель подготовки оператора. По данному алгоритму составлена программа на языке FORTRAN-IV ЕС ЭВМ, которая содержит 138 операторов. С помощью этой программы для семейства графиков, представленных на рисунке, получены интегральные критерии:  $K_{11} = 0,142$ ;  $K_{12} = 0,115$ ;  $K_{21} = 0,044$ ;  $K_{22} = 0,064$ . Показатель пер-

вого оператора  $K_1=0,186$ , второго —  $K_2=0,179$ . Процесс обучения проходит лучше у того оператора, у которого выше интегральный показатель. Кроме этих данных могут быть получены все промежуточные показатели (коэффициенты аппроксимирующего полинома, разбивка графика на участки и т. д.).

**Список литературы:** 1. Благовещенский Ю. В., Теслер Г. С. Вычисление элементарных функций на ЭВМ. — Киев: Техніка, 1977. — 207 с. 2. Пухов Г. Е., Хатишвили Ц. С. Критерии и методы идентификации объектов. — Киев: Наук. думка, 1979. — 189 с.

Поступила в редколлегию 24.03.80.

УДК 681.31

А. К. БАРИНОВ, Н. Я. КАКУРИН, канд. техн. наук

### МНОГОЗНАЧНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ АВТОМАТЫ С ГИБКОЙ ЛОГИКОЙ

В ряде работ [1, 2] было показано, что в настоящее время достаточно проработана только задача синтеза многозначных комбинационных схем. Необходимо разрабатывать методы проектирования многозначных управляющих автоматов и оценивать их основные параметры с учетом особенностей представления информации многозначными кодами, свойства элементной базы.

Цель настоящей статьи — провести сравнительный анализ различных способов организации многозначных микропрограммных автоматов (ММПА) с гибкой логикой и определить их аппаратные затраты.

Известны [3] различные стратегии кодирования микроопераций и соответствующие этим стратегиям модификации структурной организации микропрограммных автоматов с хранимой в памяти микропрограммой. Хранение кодов микроопераций в устройствах управления с гибкой логикой осуществляется в постоянных запоминающих устройствах (ПЗУ).

Для произвольной значности логики  $k$  возможна структурная организация многозначного ПЗУ (МПЗУ) (рис. 1). В данной структуре применен способ запоминания фазо-импульсного многозначного кода путем запайки диода между адресной шиной и шиной соответствующей константы (пространственное кодирование). Функционирование МПЗУ этого типа происходит следующим образом. Дешифратор в соответствии с кодом адреса выбирает необходимую адресную шину и формирует на ней сигнал длительностью в один большой такт  $T = k\tau$ , где  $\tau$  — длительность малого такта.

Элемент совпадения в момент прихода сигнала соответствующей фазы от генератора констант ГК пропускает этот сигнал на вход многозначного элемента ФИМЭ и устанавливает его

в состояние, соответствующее константе шины, на которую за паян диод в данном разряде слова.

Оценим аппаратные затраты рассматриваемой структуры МПЗУ, обозначив предварительно:  $N$  — число выходных шин МПЗУ (разрядность регистра микрокоманды);  $r$  — число кодовых

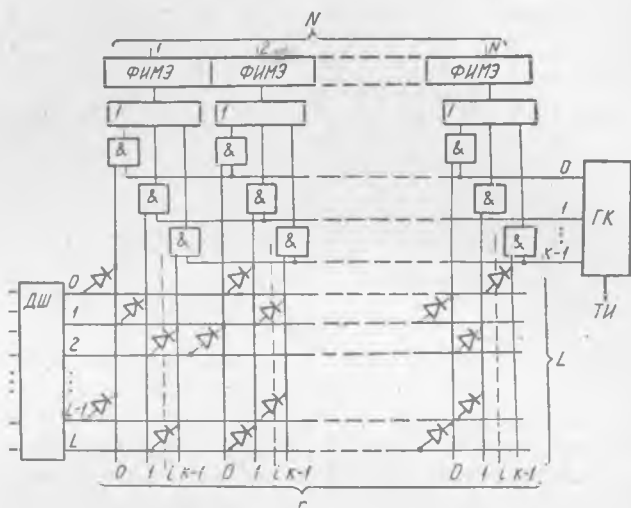


Рис. 1. Структура многозначного постоянного запоминающего устройства

(вертикальных) шин в матрице МПЗУ;  $L$  — число адресных (горизонтальных) шин МПЗУ;  $M$  — объем информации (общее число микроопераций) МПЗУ.

Легко видеть из рис. 1, что  $r_k = kN$ ;  $D_k = LN$ ;  $M = k^N$  (1).

Пусть  $L = \text{const}$ ;  $M = \text{const}$ ;  $k = \text{varia}$ . Тогда для оценки количества диодов, числа выходных и кодовых шин удобно пользоваться соотношениями  $N_k = \text{int} \log_k M$ ;  $r_k = k \text{int} \log_k M$ ;  $D_k = L \text{int} \log_k M$  (2), где  $\text{int } Z$  — целое число, не меньшее, чем число  $Z$ .

При  $k = 2$  число шин констант в каждом многозначном разряде равно двум, но сигналы можно различать запайкой диода только на единичную шину. Диод ставится, если необходимо записать «1», и не ставится при записи «0».

Поэтому при оценке аппаратных затрат для  $k = 2$  учитываем коэффициент насыщения кода нулями  $Q = 0,5$ . Тогда  $r_2 = N_2 = \text{int} \log_2 M$ ;  $D = 0,5L \text{int} \log_2 M$  (3).

Ряд значений  $N_k = f(k)$ ;  $r_k = f(k)$  и  $D_k = f(k, L)$  для общего числа микроопераций  $M = 500$ ,  $L = 5M$  и  $k = 2, 4, 8, 16, 32$  приведен в таблице. Ее анализ показывает, что с ростом значности логики  $k$  аппаратные затраты многозначных ПЗУ уменьшаются. Для оценки качества многозначных ПЗУ можно ввести критерий качества  $K = N_k r_k D_k$  (4).

И в этом случае преимущества больших значений  $k$  перед  $k=2$  очевидны.

Анализ зависимости (2), (3) и таблицы показывает, что увеличение значности логики  $k$  приводит к уменьшению числа внешних выходных шин  $N_k$  МПЗУ и к сокращению общего числа диодов  $D_k$ .

$N$	$k$	2	4	8	16	32
1-й тип ПЗУ	$N$	9	5	3	3	2
	$r$	9	20	24	48	64
	$D (L = 5M)$	11250	12500	7500	7500	5000
	$K \times 10^3$	910	1250	540	1080	640
2-й тип	$N$	9	5	3	3	2
	$r$	9	9	9	9	9
	$D (L = 5M)$	11250	11250	11250	11250	11250
	$K \times 10^3$	910	505	302	302	202

В то же время рост  $k$  вызывает увеличение числа кодовых шин  $r_k$ , что может привести к увеличению площади матрицы ПЗУ. Вторым недостатком многозначных ПЗУ при использовании фазоимпульсного кодирования является снижение быстродействия с ростом значности логики, что ограничивает область применения МПЗУ цифровыми устройствами с малым и средним быстродействием.

В ряде работ [4—6] указывается, что в качестве основного критерия для анализа многофункционального логического модуля в интегральном исполнении целесообразно использовать минимум внешних выводов, минимум соединений или минимум площади. Разумеется, что могут использоваться различные комплексные критерии качества, представляющие комбинацию указанных выше трех частных критериев.

Вторым возможным способом организации многозначных ПЗУ является преобразование в МПЗУ обычных двоичных выходных сигналов с некоторого числа двоичных разрядов в многозначный выходной сигнал.

Такое преобразование можно выполнить, например, методом досчета или методом дешифрации. Значения основных параметров многозначного ПЗУ, организованного по второму способу, также приведены в таблице. Сравнение аппаратурных затрат МПЗУ 1-го и 2-го типов показывает, что общее число диодов в МПЗУ 2-го типа не зависит от значности логики  $k$ , но значение комплексного критерия  $K$  существенно меньше.

Для оценки общих аппаратурных затрат ММПА с гибкой логикой можно использовать стратегию кодирования полей совместимых микроопераций [3], формула стоимости  $S$  которой имеет вид  $S = Q_{с.ф.} \cdot C_{вх} + Q_{мпзу} \cdot C_k$  (5), где  $Q_{мпзу}$  — объем МПЗУ в  $k$ -ричных разрядах;  $C_k$  — стоимость хранения одного  $k$ -ричного разряда;  $Q_{с.ф.}$  — объем аппаратурных затрат (количество входов)

схемы формирования управляющих сигналов;  $C_{вх}$  — стоимость логического элемента, приведенная ко входу.

Для стратегии полей совместимых микроопераций  $Q_{с.ф.}$  определяется в основном аппаратными затратами на реализацию  $k$ -значных дешифраторов.

В наилучшем случае затраты на дешифрацию  $m_i$  микроопераций одного поля  $Q_{\max} = m_i \text{intlog}_k(m_i + 1)$  (6).

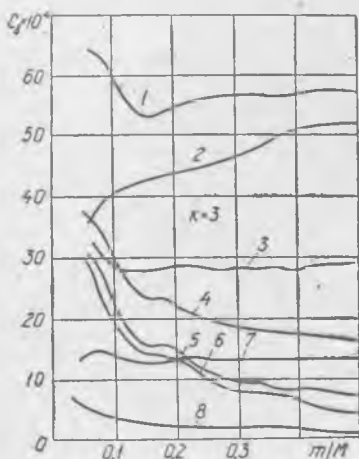


Рис. 2. Зависимость приведенной стоимости от:

1 —  $\epsilon = 200$ ;  $C = 10$ ; 2 —  $\epsilon = 200$ ;  $C = 2$ ; 3 —  $\epsilon = 100$ ;  $C = 5$ ; 4 —  $\epsilon = 50$ ;  $C = 10$ ; 5 —  $\epsilon = 10$ ;  $C = 10$ ; 6 —  $\epsilon = 1$ ;  $C = 10$ ; 7 —  $\epsilon = 10$ ;  $C = 2$ ; 8 —  $\epsilon = 1$ ;  $C = 2$ .

Для неполного дешифратора (при  $k^{\text{intlog}_k(m_i+1)} > m_i + 1$ ) каждая из  $(k-1)$  неиспользуемых комбинаций склеивается с одной из используемых комбинаций, что позволяет минимизировать аппаратные затраты до уровня

$$Q_{\min} = \left\{ m_i \text{intlog}_k(m_i + 1) - \text{int} \left[ \frac{k^{\text{intlog}_k(m_i+1)} - (m_i + 1)}{k-1} \right] \right\}. \quad (7)$$

С учетом того, что число полей в общем случае равно  $l$ , получим

$$Q_{с.ф.} = \sum_{i=1}^l \left\{ m_i \text{intlog}_k(m_i + 1) - \text{int} \left[ \frac{k^{\text{intlog}_k(m_i+1)} - (m_i + 1)}{k-1} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$Q_{МЗПУ} = L \sum_{i=1}^l \text{intlog}_k(m_i + 1), \quad (9)$$

где  $L$  — суммарное число микрокоманд (ячеек) в МПЗУ.

Если подмножества совместимых микроопераций равны по мощности  $m_1 = m_2 = \dots = m_l = \dots = m$ , то  $l = M/m$  и формула стоимости (5) упрощается:

$$S = \frac{ML}{m} C_k \text{intlog}_k(m + 1) + \frac{M}{m} \left\{ m \text{intlog}_k(m + 1) - \text{int} \left[ \frac{k^{\text{intlog}_k(m+1)} - (m + 1)}{k-1} \right] \right\} C_{вх}. \quad (10)$$

Чтобы удобнее выполнить расчеты, формулу (10) преобразуем к виду

$$S = C_k \left\{ CM \text{intlog}_k(m + 1) + \frac{M}{m} \left[ m \text{intlog}_k(m + 1) - \text{int} \left( \frac{k^{\text{intlog}_k(m+1)} - (m + 1)}{k-1} \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\xi = C_{\text{вх}}/C_k; C = L/M.$$

Зависимость стоимости  $S$  в некоторых относительных единицах  $C_0 \cdot 10^4$  от числа полей для  $k=3$  и  $M=512$  при различных сочетаниях значений  $\xi$  и  $C$  приведены на рис. 2.

Пользуясь значениями  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_k$ ,  $L$ ,  $M$  по графикам на рис. 2, можно выбрать число полей, минимизирующее стоимость многозначного микропрограммного автомата. Формула (11) позволяет построить соответствующие графики для любой значности логики.

Список литературы: 1. *Время-импульсные элементы дискретной техники.* Под ред. В. П. Сикорского. — Киев: Техника. — 224 с. 2. *Иваськив Ю. Л.* Элементарные автоматы с памятью с  $k$ -значным структурным алфавитом. — Кибернетика, 1977, № 1, с. 36—46. 3. *Кравцов Л. Я., Черницкий Г. И.* Проектирование микропрограммных устройств управления. — Л.: Энергия, 1976. — 147 с. 4. *Якубайтис Э. А.* Многофункциональные логические модули. — АВТ, 1976, № 2, с. 1—15. 5. *Баранов С. И., Синев В. Н.* Программируемые логические матрицы в цифровых системах. — Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 1, с. 65—82. 6. *Какурин Н. Я., Баранов А. К.* Многозначные микропрограммные автоматы. — АСУ и приборы автоматики, 1978, вып. 47, с. 90—95.

Поступила в редколлегию 12.02.80.

УДК 62.506.2

Н. И. БОГДАНОВ, канд. техн. наук

#### ПРОБЛЕМНАЯ КОММУНИКАЦИЯ (ГОМЕОСТАТИЧЕСКОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ)

Согласно разрабатываемой автором теории проблемной коммуникации накопление знаний приемника является результатом семантической итерации текста сообщения [1]. Процесс итерации прекращается, если он сходится или достигнуто одно из ограничений, наложенных на приемник. Вопросы сходимости рассмотрены в [1]. В данной статье исследуется прерывание семантической итерации, возникающее у приемников, условием существования которых является стабильность внутренней среды (гомеостазис).

При этом гомеостазис рассматривается в качестве основного ограничивающего условия, оказывающего глобальное структурирующее влияние на возникновение и все проявления интеллекта. Тем самым подготавливаются теоретические предпосылки для систематизации и выявления фундаментальных закономерностей эволюционного развития и функционирования разума. Эти закономерности имеют большое практическое значение для работ в области искусственного интеллекта, исследования процессов коммуникации, обучения и принятия решений.

В дальнейшем для удобства ссылок постулируемые допущения обозначаются буквой Д, концептуальные умозаключения

из них — буквой У, определения — буквами Оп, а примечания — буквами Пр. После этих букв ставятся порядковые номера. Вместо слов «Если ГС удовлетворяет ..., то», записывается «ГС (...):».

**Он1.** Гомеостатической системой (ГС) будем называть систему, способную к регенерации и поддержанию своих основных переменных в требуемых пределах посредством самоорганизации потребления вещества и энергии из внешней нестационарной среды.

**Пр1.** Моделирование отдельных функций ГС в работотехнике не отражает системных свойств биологических ГС. Ниже выделяются те из них, которые наиболее существенны для прогноза отдаленных последствий роста сложности автономных систем искусственного интеллекта.

**Д1.** ГС обменивается веществом и энергией с внешней средой и способна определять потребность в них.

**Д2.** Время, в течение которого ГС не нуждается в потреблении вещества и энергии (время автономного функционирования), есть случайная величина с функцией распределения  $F_A(t)$ .

**Д3.** При невозможности пополнить запасы вещества и энергии в течение определенного времени (предельного времени восстановления  $t_{\Pi}$ ) ГС прекращает функционирование (гибнет).

**Д4.** Время от возникновения у ГС потребности в веществе и энергии до их потребления его из внешней среды (время восстановления  $t_B$ ) есть случайная величина с функцией распределения  $F_B(t)$ .

**Д5.** После пополнения ГС запасов вещества и энергии функция распределения  $F_A(t)$  и время  $t_{\Pi}$  существенно не изменяются.

**Он2.** ГС активно адаптирована к среде, если ее среднее время существования  $T \gg (t_{\Pi} + t_{AC})$ , где  $t_{AC}$  — среднее время автономного функционирования.

**У1.** ГС (Д1—Д5): среднее время ее существования при активной адаптации к среде удовлетворяет неравенству  $T < (t_A + t_{\Pi})(1 - F_B(t_{\Pi}))^{-1}$ .

**Пр2.** Из У1 следует, что активная адаптация ГС заключается в стремлении к наибольшей вероятности выполнения неравенства  $t_B < t_{\Pi}$ .

**Д6.** ГС способна сканировать внешнюю среду, выделяя в ней объекты.

**Д7.** Не все объекты, выделенные ГС, пригодны для пополнения вещества и энергии (не все объекты полезны).

**Д8.** ГС способна обрабатывать информацию (находить полезные объекты во внешней среде).

**Д9.** Способность ГС обрабатывать информацию ограничена.

**Пр3.** Уточнения Д6—Д9 дают одну из возможных функций  $F_B(t)$ . Для начальных стадий эволюции могут быть приняты уточнения, приведенные в Д10 и Д11.

**Д10.** ГС обрабатывает информацию как система массового обслуживания с отказами в установившемся режиме.

**Д11.** Выделение объектов является последовательностью независимых опытов, каждый из которых с одинаковой вероятностью может закончиться обнаружением полезного объекта.

**У2.** ГС (У1, Д6—Д11): функция распределения времени восстановления ГС имеет вид  $F_B(t) = \sum_{i=1}^n P (1 - P)^{i-1}$ , где  $n = [t(t_{об} + (VB)^{-1}) - 1]$ ;  $P$  —

вероятность обнаружения полезного объекта;  $t_{об}$  — время обработки информации;  $V$  — скорость сканирования;  $B$  — среднее число объектов на единицу сканируемого пространства;  $\{ \}$  — операция нахождения целой части.

**У3.** ГС (У1, У2): среднее время ее существования может увеличиваться как посредством совершенствования переработки вещества и энергии, так и путем совершенствования переработки информации. Эти два направления

эволюции реализуются следующими стратегиями адаптации: 1. Увеличением времени автономного функционирования и предельного времени восстановления. 2. Переходом к потреблению более распространенных объектов и (или) включением новых объектов в число полезных. 3. Перемещением в области внешней среды, обеспечивающим наибольшее количество полезных объектов. 4. Повышением скорости сканирования внешней среды. 5. Уменьшением времени обработки информации.

У4. ГС (У1, У2, У3): стратегии, аналогичные перечисленным в У3, обеспечивают ей выживание и в среде с внешними объектами, нарушающими ее гомеостазис (опасными объектами).

Пр4. Это утверждение можно назвать принципом симметрии адаптации. Д12. Существует мера  $S_B$  предельной неупорядоченности вещества и энергии, перерабатываемых ГС.

Д13. Существует мера  $S_{II}$  предельной неупорядоченности сообщения, из которого ГС способна извлечь информацию.

Д14. Существует мера  $S_C$  неупорядоченности внешней среды.

У5. ГС (У3, У4, Д12—Д14): ее эволюционное развитие подчиняется принципу соответствия  $f_1(S_B, S_{II}) = f_2(S_C)$ , где неотрицательные функции  $f_1, f_2$  монотонно возрастают при возрастании каждого из аргументов.

Пр5. Зависимость, приведенная в У5, аналогична разложению вектора на компоненты. Вращение базиса такого разложения описывает участие данной ГС в обеспечении устойчивости биосферы. Вращение базиса, увеличивающее  $S_B$ , соответствует адаптации растений (стратегии 1 и 2 позволяют адаптироваться к низкоорганизованной среде, потребляя распространенные в ней виды вещества и энергии).

Вращение базиса, увеличивающего  $S_{II}$ , соответствует адаптации животных с развитой нервной системой. Стратегии 3, 4, 5 из У3 обеспечивают адаптацию к локальному росту организованности биологической внешней среды. Именно это направление эволюции привело к возникновению интеллекта. Соответствующие ему ГС и рассматриваются далее.

У6. ГС (У1, У2, У3, У4): при  $S_{II} > S_B$  ГС всегда обрабатывает информацию при дефиците времени.

Пр. 7. Дефицит времени определяется статистическими (неисчерпаемость разнообразия внешней среды) и динамическими (изменчивость внешней среды, подвижность объектов) факторами.

Д15. ГС способна оценивать дефицит времени.

Пр8. В робототехнике такие оценки формируются качественными аналогами эмоциональных систем. Зависимости У1—У6 дают количественную основу проектирования.

У7. ГС (У6, Д15): оценка дефицита времени неспецифично определяет виды активности ГС.

Д16. Обработка информации производится всеми элементами ГС.

Д17. Обмен веществом и энергией с внешней средой вызывает изменение состояния и (или) структуры ГС.

Оп4. Вещественноэнергетический обмен — обмен веществом и энергией с внешней средой, непосредственно вызывающий изменения состояния и (или) структуры ГС.

Оп5. Информационный обмен — обмен веществом и энергией с внешней средой, вызывающий изменение состояния и (или) структуры ГС за счет запасов вещества и энергии, накопленных ею ранее.

У8. ГС (У6, Д15 ÷ Д17): в процессе эволюции выделяются элементы для формационного обмена, которые при индивидуальном развитии ГС способны образовывать устойчивые совокупности взаимосвязей (информационные структуры).

У9. ГС (У8): ГС выполняет таксономию множества выделенных объектов так, что таксоны  $A_i (i = 1, 2, \dots, N)$  удовлетворяют условиям  $A_i \cap A_j =$

$\emptyset (i \neq j); W = \bigcup_{i=1}^N A_i.$

*Пр9.* При дефиците времени ГС должна выполнять таксономию немедленно. Этим достигается сжатие информации, содержащейся в бесконечном разнообразии индивидуальных характеристик внешних объектов.

*Об6.* Совокупность критериев и признаков объектов, по которым производится таксономия, назовем основанием таксономии.

*У10.* ГС (У9): каждому основанию таксономии соответствует своя атомарная информационная структура (АИС) с числом состояний, равным числу таксонов

Энтропия этой информационной структуры равна  $H = \sum_{i=1}^N p_i \log p_i$ , где  $N$  — число таксонов;  $p_i$  — вероятность пребывания информационной структуры в состоянии  $i$ .

*Пр10.* АИС отображают сенсорную информацию. Они возникают в результате самоорганизации при решении гомеостатических задач в условиях дефицита времени. Число их состояний определяется оценкой количества информации, получаемой ГС в единицу времени при таксономии объектов (оперативность таксономии)

*У11.* ГС (У9): в числе критериев естественного отбора ГС имеются критерии оперативности таксономии и критерий осторожности.

*У12.* ГС (У11): ГС способна оценивать оперативность таксономии.

*У13.* ГС (У9, У10, У12): оценка оперативности таксономии  $R(N, p, \tau, s)$ , где  $p = (p_1, p_2, \dots, p_N)$  — вектор вероятностей состояний информационной структуры;  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$  — вектор времен принятия решений;  $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$  — вектор стратегий таксономии, удовлетворяет неравенству

$$R(N, p, \tau, s) \geq \min R(N, p, \tau, s) \geq \left( -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i \right) \left( \sum_{i=1}^{N-1} p_i \sum_{j=1}^i \tau_j \right)^{-1}$$

*У14.* ГС (У11, У12, У13): число формируемых таксонов близко к значению, определяемому принципом гарантированной оперативности таксономии  $\max_N \max_{p, \tau, s} \min R(N, p, \tau, s) = \max_N 2 \log N (\tau_m (N+1))^{-1}$ , где  $\tau_m$  — максимальное время принятия решения.

*Пр11.* Число состояний АИС, определяемых У14, существенно меньше, чем у сенсорных систем, и энтропия АИС, определяемая согласно У10, совпадает с энтропией сенсорных систем, т. е. энтальпией, определяемой порогами различимости.

*Об7.* Мету неопределенности состояний атомарных информационных структур назовем гамма-энтропией.

*Об8.* Формирование атомарных информационных структур на основе оценки оперативности таксономии, соответствующей принципу гарантированного результата, назовем законом максиминной оперативности.

*Пр12.* Закон максиминной оперативности, по-видимому, является фундаментальным законом активной адаптации ГС. Он определяет две из четырех возможностей повышения оперативности таксономии: сокращение числа таксонов и сокращение оснований таксономии. Два других (сокращение времени принятия решений и оптимизация стратегии таксономии) реализуются при обучении часто используемым таксономиям

*У15.* ГС (У14): при решении гомеостатических задач формируются АИС структурные свойства которых описываются нечетким подмножеством множества натуральных чисел  $\Gamma = 0/1 + 0,83/2 + 0,98/3 + 1/4 + 0,9/6 + 0,87/7 + 0,83/8 + \dots$

*Пр13.* Элементы множества  $\Gamma$  со степенью принадлежности, близкой к единице, характеризуют границу перехода от неproblemной коммуникации к problemной. Древние придавали им магический смысл (Омар Хайям «Управляется мир четырьмя и семью...»). В последние годы элементы множества  $\Gamma$  фигурируют в эмпирических гипотезах Миллера [2] и других авторов.

*Пр14.* У15 дает основания для количественной проверки закона максиминной оперативности. В хорошем соответствии с множеством  $\Gamma$  находят

число сенсорных каналов и конечностей высших животных, ряд лингвистических и психологических явлений (например, предпочитаемое число классов, свойств, выводов, альтернатив, критериев, градаций и т. п.).

*Пр15.* Обоснование конечных границ для алфавита и длины слов является центральным в теории интеллекта [4]. Это относится к теории конечных предикатов [4] и к теориям М-сетей, ситуационного управления, фреймов, концептуальной обработки информации [5]. Теоретическое представление об истоках структурирования знаний необходимо также при исследовании общения, обучения, экспертных оценок и принятия решений.

*Он9.* Назовем информационно-семантической устойчивостью (ИС-устойчивостью) способность ГС после информационного обмена с внешней средой восстанавливать прежние АИС при малых изменениях их характеристик, вызванных информационным обменом; формировать новые АИС, сходные с прежними.

*У16.ГС (У14):* первичные АИС, возникающие в начале автономного существования ГС, формируются в соответствии с законом максимальной оперативности.

*У17.ГС (У14):* АИС, соответствующие закону максимальной оперативности, ИС-устойчивы.

*У18.ГС (У14, У16, У17):* все АИС, не удовлетворяющие закону максимальной оперативности, ИС-неустойчивы.

*Пр16.* АИС, соответствующие закону максимальной оперативности, имеют особую устойчивость благодаря соответствию самой ГС устойчивым состояниям породившего ее мира. Более сложные (ИС-неустойчивые) структуры преобразуются в композицию ИС-устойчивых фрагментов. Поэтому можно предположить наличие типовых структур формирования АИС (метафреймов).

*Пр17.* Из У18 следует необходимость психологических барьеров при приеме и обработке информации: сообщения, требующие формирования ИС-неустойчивых АИС, либо не принимаются, либо модифицируются в ИС-устойчивые АИС (такое структурирование является основой понимания сообщения). У18 позволяет предположить, что закон максимальной оперативности вызывает функциональное обособление из общей памяти ее оперативной части, которая препятствует произвольному использованию всей (весьма значительной) емкости памяти (защита от внутренней модели мира).

*У19.ГС (У1 ÷ У18):* ГС способна прогнозировать возрастание дефицита времени и предпринимать действия для его уменьшения в будущем.

*Он10.* Сохранение и расширение возможностей вещественноэнергетического и информационного обмена ГС, а также информации об этих возможностях назовем функциональным резервированием.

*Д17.ГС* способна оценивать результаты функционального резервирования.

*У20.ГС (У19, Д17):* ГС осуществляет действия, обеспечивающие функциональное резервирование до тех пор, пока положительная оценка их результатов доминирует над оценкой дефицита времени.

*У21.ГС (У20):* возникновение внутренних и внешних ограничений или информации, снижающих возможности функционального резервирования, эквивалентно возрастанию дефицита времени.

*Пр19.* Согласно У19 и У20 положительное эмоциональное подкрепление должно опережать процесс восстановления гомеостаза. Оно возникает, если: а) согласно опережающей оценке дефицита времени своевременно совершаются действия, предотвращающие возможное нарушение гомеостаза («насыщение»); б) подтверждается, возникают или расширяются возможности сохранения гомеостаза в будущем.

*У22.ГС (У1 ÷ У21)* обработка информации об объекте прерывается ГС по истечении времени, близкого к среднему времени определения состояния АИС, соответствующей закону максимальной оперативности (гомеостатической АИС).

*Пр22.* Отсюда следует необходимость процесса торможения как средства, предотвращающего длительное отключение ГС от внешнего мира.

*У23.ГС (У22):* длительная обработка информации ГС об одном и том же объекте может быть только прерывистой.

Пр23. Здесь иным путем подтверждается необходимость дискретного (квантового) характера проблемной коммуникации [1].

У24.ГС (У22, У23): число повторных обращений ГС к объекту при формировании гомеостатической АИС близко к числу ее состояний.

Оп11. Гомеостатическим назовем процесс проблемной коммуникации, при котором формируется или уточняется гомеостатическая АИС.

Оп12. Метагомеостатической информацией назовем информацию, которая применима только для коллективной адаптации кооперировавшихся ГС.

Оп13. Интеллектом ГС назовем ее информационные структуры, обеспечивающие многошаговые процессы обработки информации, необходимые для создания накопления передачи и использования метагомеостатической информации.

Оп14. Интеллектуальной назовем проблемную коммуникацию, при которой формируются и уточняются АИС, соответствующие метагомеостатической информации.

Д18. Граница между гомеостатической и метагомеостатической информацией является нечеткой.

Пр24. Д18 относится и к содержанию и к форме: возможно представление метагомеостатической информации в форме гомеостатических АИС и наоборот.

У25.ГС (У1—У21): получение метагомеостатической информации, как правило, требует существенно большего числа шагов семантической итерации, чем получение гомеостатической информации.

У26.ГС (У25): для обеспечения устойчивой интеллектуальной проблемной коммуникации необходимо снижение оценки дефицита времени; наличие средств усвоения фиксации и передачи метагомеостатической информации; способность копирования интеллектуально-коммуникационного поведения; поддержание стереотипов этого поведения посредством обмена полученной метагомеостатической информацией на средства индивидуальной адаптации.

У27. ГС (У21—У26): оценка дефицита времени при интеллектуальной проблемной коммуникации возрастает с увеличением числа шагов итерации и степени метагомеостатичности информации и убывает с увеличением субъективной ценности информации.

У28. ГС (У27): интеллектуальная проблемная коммуникация может перемежаться с гомеостатической и неproblemной коммуникациями, необходимыми для восстановления гомеостазиса данной ГС.

Пр25. В Оп12—Оп14 и У25—У27 сжато показана невозможность вне социального генезиса интеллекта.

У29. ГС (У1—У28): интеллектуальная проблемная коммуникация протекает под структурирующим воздействием: а) стереотипов обработки гомеостатической информации; б) эволюции информационных структур к гомеостатическим АИС; в) роста оценки дефицита времени; г) прерываний семантической итерации; д) вариаций условий устойчивости.

У30. ГС (У1—У28). Гомеостатическая проблемная коммуникация протекает под структурирующим воздействием условий устойчивости интеллектуальной проблемной коммуникации; уточнения оснований таксономии; возникновения задач использования метагомеостатической информации.

У31. ГС (У1—У30): несоответствие структур гомеостатического и интеллектуального уровней обработки информации вызывает их динамическое развитие, приводящее к последовательным уточняющим и размывающим преобразованиям информации, при которых возникает новое знание, понимание и взаимопонимание.

Пр26. В У29—У30 приведены итоговые теоретические представления о фундаментальной взаимосвязи интеллектуального и гомеостатического уровней обработки информации, вытекающие из данной работы.

В практическом плане достаточно очевидны связи полученных результатов с вопросами: структурирования знаний и самоорганизации в искусственном интеллекте; повышения эффективности коммуникации (приема задач теоретических, нормативных и эстетических знаний); прогноза эволюции семантических и нормативно-организационных структур; обоснования критериев принятия решений и обработки качественных данных (в частности

критериев ограниченной рациональности, границ анализа, простоты); использования размывающих и уточняющих преобразований в семантических системах; обоснования лингвистических гипотез (глубины памяти, языка языков, априорной языковой компетенции); связи вероятностных, алгоритмических и семантических мер информации с ее возникновением, развитием и селективной ценностью.

Разнообразие и важность этих приложений свидетельствует об актуальности развития этого направления исследований.

**Список литературы:** 1. *Богданов Н. И.* Проблемная коммуникация (информационно-семантический анализ сообщения).— Проблемы бионики, 1981, вып. 26, с. 26—34. 2. *Миллер Дж.* Магическое число семь, плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию. — Инженерная психология.— М.: Прогресс, 1964.— 212 с. 3. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* О теории интеллекта.— Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 3—11. 4. *Минский М.* Фреймы для представления знаний.— М.: Эцгергия, 1979.— 151 с.

Поступила в редколлегию 25.06.80.

УДК 62.506.2

*В. М. ЛИСКИН, В. С. ТОНИЦА*

#### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОБУЧЕНИЯ**

При автоматическом формировании последовательности испытательных тестов в обучающих телевизионных системах важным является построение контурного изображения геометрического объекта по исходному изображению и зануление фона на экране ТВ-монитора. Решение данной задачи на дискретном уровне представления информации влечет за собой сложный содержательный анализ сцены, связанный со значительным количеством вычислений и многократным перебором дискретного множества точек, представляющих функцию распределения яркости.

Предлагаемая методика решения рассматриваемых вопросов предусматривает автоматическое преобразование дискретной информации о контурном изображении объекта в аналитическую, представляющую собой отображения  $P: R^2 \rightarrow \{0, 1, 2\}$  и  $f: R^2 \rightarrow R$ , которые обладают различными качествами в точках контурного изображения, его границы и фона. Отображения  $P$  и  $f$  называются соответственно предикатным и аналитическим описаниями контурного изображения и строятся алгебрологическими методами теории  $R_3$ -функций [1—3], органически сочетающей методы классического непрерывного анализа с методами дискретного анализа.

Предикатные и аналитические описания контурных изображений инвариантны относительно проективной группы преобразования пространства и их использование в качестве разреша-

ющих функций алгоритмов указанного анализа и формирования сцены позволяет достичь универсальности и практически приемлемого быстродействия. Методика решения поставленной задачи включает в себя алгоритмы следующих функциональных назначений:

обнаружение последовательности точек границы контурного изображения объекта [4], содержащегося в заданном прямоугольном фрагменте сцены; кусочно-линейная аппроксимация границы контурного изображения; обрамление контурного изображения эквидистантой [5] с заданным параметром  $\delta$ ; построение предикатного и аналитического описаний контурного изображения и области, ограниченной эквидистантой; анализ сцены и зануление фона с учетом заданного преобразования пространства.

*Алгоритм обнаружения границы контурного изображения объекта.* Поиск последовательности точек границы будем осуществлять в заданном прямоугольном фрагменте сцены, содержащем исследуемое контурное изображение.

Для ускорения поиска граничных точек отбирается одна точка в каждом квадрате  $n \times n$  (например,  $n=8$ ) точек заданного фрагмента сцены в соответствии с [4]. Эта сжатая информация о фрагменте изображения просматривается алгоритмом до тех пор, пока не обнаруживается некоторая граничная точка. Обнаружение граничной точки основано на предположении, что между фоном и объектом всегда существует достаточный контраст. Найденная граничная точка фиксируется в качестве начальной точки, с которой начинается прослеживание. Поиск следующей точки границы выполняется по системе правил, предполагающей, что искомая точка расположена в окрестности уже найденной граничной точки. Из двух граничных точек, лежащих в окрестности найденной точки, выбирается та, которая соответствует положительному обходу изображения объекта. Таким образом, обнаруживается связная последовательность граничных точек, составляющих контур. При этом формируется упорядоченный согласно указанному обходу изображения массив координат точек контура. Затем просматривается остальная часть информации об изображении в заданном фрагменте сцены до обнаружения новой граничной точки. Данная процедура повторяется до тех пор, пока не будет просмотрена вся заданная часть сцены и не будут найдены все связные последовательности граничных точек. Далее алгоритм возвращается к исходному изображению и осуществляет уточнение найденных последовательностей точек по исходной системе правил, но с учетом того обстоятельства, что истинные граничные точки находятся в окрестностях, найденных на «сжатом» изображении точек. Построенное таким образом контурное изображение геометрического объекта по исходному изображению представляет собой многосвязную ограни-

ченную область, граница которой состоит из ряда связанных замкнутых контуров.

*Алгоритм кусочно-линейной аппроксимации границы контурного изображения.* Алгоритм осуществляет последовательно кусочно-линейную аппроксимацию каждого связанного контура, входящего в состав границы контурного изображения. При этом аппроксимация контура выполняется в два этапа. На

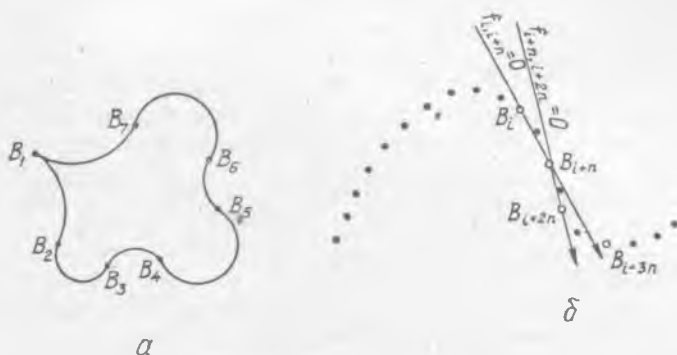


Рис. 1. Выделение характерных точек

первом этапе выделяются характерные точки контура, определяющие его форму. Такими точками являются точки перегиба (излома), например, точки  $B_i$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ ) (рис. 1, а).

Характерные точки контура находятся по следующей системе правил. Рассмотрим участок некоторого контура, заданный упорядоченным множеством точек  $\{B_i\}$  (рис. 1, б). Пусть  $f_{i, i+n}(x)$ ,  $x \in R^2$  — левая часть уравнения прямой, проведенной через точки  $B_i, B_{i+n}$ . Тогда, если имеет место равенство

$$\text{sign } f_{i, i+n}(x_{i+2n}) = \text{sign } f_{i+n, i+2n}(x_{i+3n}), \quad (1)$$

точки  $B_i, B_{i+n}, B_{i+2n}$  принадлежат выпуклому (вогнутому) участку контура, в противном случае в объединении окрестностей точек  $B_{i+2n}, B_{i+3n}$  радиуса  $n$  содержится точка перегиба. Эта окрестность сужается, далее, к точке перегиба путем более детального ее анализа по той же системе правил при некотором  $n_1 < n$  в (1). Значения  $n, n_1$  выбираются экспериментально. Последовательно обходя контур, алгоритм определяет точки перегиба, разбивая тем самым контур на выпуклые (вогнутые) его участки, характеризующиеся постоянным знаком кривизны.

На втором этапе работы алгоритма каждый из выделенных характерными точками участков контура аппроксимируется ломаной с заданной точностью  $\epsilon$  по методу наименьших квадратов [5].

Описанный алгоритм аппроксимации контура допускает конструктивное расширение его предметной области на случай аппроксимации выделенных участков с кривизной постоянного знака дугами кривых второго порядка с использованием спрямляющего пространства [6]. Кроме того, данный алгоритм аппроксимации обладает хорошей внутренней структурой для распараллеливания, что дает возможность строить эффектив-

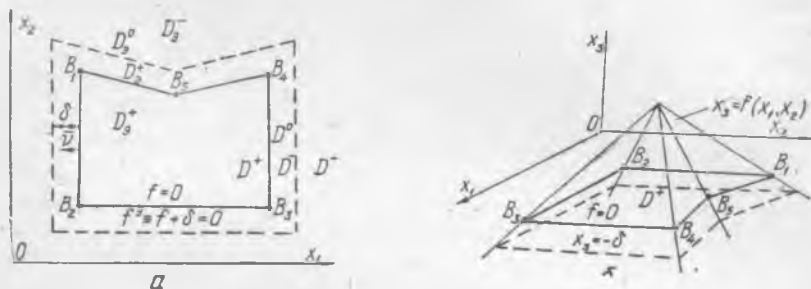


Рис. 2. Пример построения эквидистанты

ные его программные реализации для специализированных вычислительных устройств параллельного действия.

Контурное изображение объекта рассматривается как многосвязная ограниченная область, составленная по логическим правилам из простых областей, границей которых есть прямые линии, а их участки образуют ломаные, аппроксимирующие связные контуры изображения.

Будем обозначать множество внутренних точек аппроксимированного контурного изображения через  $D^+$ , его границу — через  $D^0$ , а остальную часть сцены (фон) — через  $D^-$ . Предикатным описанием контурного изображения объекта является

логическая функция (предикат)  $P(\bar{x})$ ,  $\bar{x} \in R^2$ , принимающая значения 2 в точках области  $D^+$ , 1 в  $D^0$  и 0 в  $D^-$ , а аналитическим описанием — функция  $f(\bar{x})$ ,  $\bar{x} \in R^2$ , заданная в виде единого аналитического выражения и обладающая свойствами  $f(\bar{x}) > 0$  в  $D^+$ ,  $f(\bar{x}) = 0$  в  $D^0$ ,  $f(\bar{x}) < 0$  в  $D^-$ . Задача построения функции  $f(\bar{x})$  решается путем формальной процедуры [1], если осуществлено построение предиката  $P(\bar{x})$  контурного изображения.

Назначение предикатных и аналитических описаний контурного изображения объекта и специфика их использования в качестве разрешающих функций алгоритмов преобразования сцены в случае, когда геометрический объект движется, обуславливает необходимость построения предикатных и аналитических описаний как контурного изображения, например, области  $D^+$  с гра-

нищей  $D^0$  (рис. 2, а), так и области, содержащей контурное изображение и имеющей границу, которая отстоит от границы  $D^0$  изображения на расстояние  $\delta$  ( $\delta > 0 - \text{const}$ ) по направленной в  $D^-$  нормали  $\bar{\nu}$  к  $D^0$ . Границу такой области будем изображать пунктирной линией (рис. 2, а), называть эквидистантой границы  $D^0$  и обозначать  $D_3^0$  (соответственно область, содержащую контурное изображение, ее внешность, предикатное и аналитическое описания будем обозначать через  $D_3^+$ ,  $D_3^-$ ,  $P^3(x)$ ,  $f^3(x)$ ).

*Алгоритм построения предикатного и аналитического описаний контурного изображения объекта и эквидистантного обрамления.* Произведем симметричное разбиение числовой оси  $x$ , воспользовавшись трехзначным предикатом

$$S_3(x) = \begin{cases} 2, & \text{если } x > 0, \\ 1, & \text{если } x = 0, \\ 0, & \text{если } x < 0. \end{cases}$$

Рассмотрим множество функций  $f_i(x)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), являющихся левыми частями уравнений прямых, участки которых входят в состав ломаных, аппроксимирующих границу контурного изображения. Введем предикаты  $P_i = S_3(f_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Каждый такой предикат разбивает пространство  $R^2$  на три области:  $D_i^+$ , где  $P_i = 2$ ;  $D_i^0$ , где  $P_i = 1$ ;  $D_i^-$ , где  $P_i = 0$ . Рассмотрим функцию  $F(X_1, X_2, \dots, X_n) \in P_3^1$ ; здесь  $F, X_i \in \{0, 1, 2\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $P_3^1$  — множество простых замыкающих функций трехзначной логики, порождаемое системой функций [1—3]:

$$\begin{aligned} \varphi_0(X) (\sigma = 0, 1, 2), \quad X_1 \wedge X_2 &= \min(X_1, X_2), \\ X_1 \vee X_2 &= \max(X_1, X_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\varphi_0(X) = \bar{X}, \quad \varphi_1(X) \equiv 2, \quad \varphi_2(X) = X,$$

и отображающее логическую природу организации сложных областей  $D^+$ ,  $D^0$ ,  $D^-$  из простых (исходных) областей  $D_i^+$ ,  $D_i^0$ ,  $D_i^-$ . Используя предикаты  $P_i = S_3(f_i)$ , составим предикат  $P = F(P_1, P_2, \dots, P_n)$  (3).

Предикат (3) также разбивает пространство  $R^2$  на три области:  $D^+$ , где  $P = 2$ ;  $D^0$ , где  $P = 1$ ;  $D^-$ , где  $P = 0$ . Задача построения предиката (3) для заданного контурного изображения объекта состоит в нахождении соответствующей функции трехзначной логики  $F(X_1, X_2, \dots, X_n) \in P_3^1$  в (3) путем анализа геометрической информации о границе  $D^0$  и использования функций системы (2). Построение предиката (3) для заданного контурного изображения, представляющего собой многоугольную многосвязную область, выполняется следующим образом.

Пусть граница  $D^0$  контурного изображения включает в себя  $m$  связанных контуров. Вначале строятся предикаты  $P_1^*, P_2^*, \dots, P_m^*$  вида (3) для областей, каждая из которых ограничена связным контуром, методом выпуклых оболочек [1]. Каждый из предикатов  $P_1^*, P_2^*, \dots, P_m^*$  сохраняет свое значение во всех внутренних точках контурного изображения. Поэтому в соответствии с [2, 3] искомым предикатом для контурного изображения с помощью системы (2) запишется в виде

$$P = \varphi_{\sigma_1}(P_1^*) \wedge \varphi_{\sigma_2}(P_2^*) \wedge \dots \wedge \varphi_{\sigma_m}(P_m^*),$$

где  $\sigma_i$  — значение предиката  $P_i^*$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$  во внутренних точках контурного изображения (значение  $\sigma_i$  предопределяется направлением обхода при формировании геометрической информации об  $i$ -м связанном контуре).

Аналитическое описание  $f$  контурного изображения получаем путем формальной замены в предикате  $P$  символов  $P_i$  исходных предикатов символами функций  $f_i$ , символов функций трехзначной логики системы (2) символами соответствующих им  $R_3$ -функций  $x$ ,  $x_1 \wedge x_2$ ,  $x_1 \vee x_2$ , определенных в [1].

Опишем алгоритмы построения предикатного  $P^3(x)$  и аналитического  $f^3(x)$  описаний области  $D_3^+$ , содержащей контурное изображение и имеющей эквидистантную относительно границы изображения  $D^0$  границу  $D_3^0$ .

Рассмотрим область, изображенную на рис. 2, а. Построенные в соответствии с указанными выше процедурами ее предикатное  $P$  и аналитическое  $f$  описания имеют вид

$$P = P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge (P_4 \vee P_5), \quad f = f_1 \wedge_{\alpha} f_2 \wedge_{\alpha} f_3 \wedge_{\alpha} (f_4 \vee_{\alpha} f_5). \quad (4)$$

Пусть в аналитическом описании (4) функции  $f_i$  нормализованы [1]. Тогда нормализованным является и аналитическое описание (4). При этом функция  $f$  вдоль нормали к  $D^0$ , направленной в  $D^- (D^+)$ , в малой окрестности  $\pm \delta$  точки, принадлежащей границе  $D^0$ , ведет себя как расстояние точек нормали от границы  $D^0$  [1]. Продолжение этого свойства функции  $f$  вовнутрь области  $D^- (D^+)$  в силу того, что нормализованное уравнение прямой  $f_i = 0$  совпадает с нормальным (следовательно, поверхность функции  $f_i$  расположена к плоскости  $x_1 O x_2$  под углом  $\pi/4$ ), выполняется при условии, что  $\alpha = 1$  в (4). В геометрической интерпретации поверхность функции  $f$  для данной области при  $\alpha = 1$  имеет вид (рис. 2, б).

Рассмотрим след пересечения поверхности  $x_3 = f(x_1, x_2)$  с плоскостью  $x_3 = -\delta$ , где  $\delta > 0 - \text{const}$ . Его вид изображен на рис. 2, б пунктирной линией, а описывается он уравнением  $f(x_1, x_2) = -\delta$ . Осуществив ортогональную проекцию плоскости  $x_3 = -\delta$  на плоскость  $x_1 O x_2$ , получаем

$$f(x_1, x_2) + \delta = -\delta + \delta, \quad f(x_1, x_2) + \delta = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) является уравнением искомой эквидистантной линии  $\bar{D}_3^0$  на плоскости  $x_1 O x_2$  с параметром смещения  $\delta$  по нормали  $\bar{\nu}$  к  $D^0$ , направленной в  $D^-$ , а левая его часть есть функция, положительная в многоугольной области  $D_3^+$  с границей  $D_3^0$  и отрицательная в остальной части плоскости  $x_1 O x_2$  — области  $\bar{D}_3^-$ . Таким образом,  $f^3 = f + \delta$ . Предикат  $P^3$  имеет вид  $P^3 = S_3(f + \delta)$ .

Правила построения предикатного  $P^3$  и аналитического  $f^3$  описаний области, содержащей указанным выше образом контурное изображение, справедливы и в общем случае, когда контурное изображение представляет собой многосвязную многоугольную область.

*Алгоритм анализа сцены и зануления фона с учетом заданного преобразования контурного изображения объекта.* В начале работы алгоритма выполняются преобразования (согласно заданной подгруппе проективной группы) контурного изображения объекта и его предикатных  $P, P^3$  и аналитических  $f, f^3$  описаний. При этом заданные преобразования выполняются только для точек контурного изображения, которые есть вершины его многоугольной границы  $D^0$ . Далее вычисляются коэффициенты функций  $f_i$ , входящих в предикатные и аналитические описания и описывающих прямые, участки которых составляют границу  $D^0$ .

Предикатные и аналитические описания лежат в основе алгоритма зануления фона и используются для распознавания принадлежности точек сцены контурному изображению объекта и фону. При этом для увеличения быстродействия работы алгоритма процесс зануления фона осуществляется в два этапа. На первом этапе строится прямоугольник минимальной площади с вершинами

$$(x_{1.l}, x_{2.n}), (x_{1.p}, x_{2.n}), (x_{1.p}, x_{2.v}), (x_{1.l}, x_{2.v}), \quad (6)$$

содержащий обрaмленное эквидистантой контурное изображение. Абсциссы и ординаты вершин (6) определяются по формулам

$$x_{1.l} = \min(x_{1.1}, \dots, x_{1.m}) - \delta, \quad x_{1.p} = \max(x_{1.1}, \dots, x_{1.m}) + \delta,$$

$$x_{2.n} = \min(x_{2.1}, \dots, x_{2.m}) - \delta, \quad x_{2.v} = \max(x_{2.1}, \dots, x_{2.m}) + \delta,$$

где  $\delta$  — параметр эквидистантного обрамления,  $x_{1.l}, x_{2.l}, (l = 1, 2, \dots, m)$  — абсциссы и ординаты соответственно всех вершин внешнего связанного контура границы  $D^0$  контурного изображения. Все значения функции  $B(x_1, x_2)$  распределения яркости, координаты которых лежат вне построенного прямоугольника, заменяются заданным постоянным значением  $\gamma$  (например,  $\gamma = 0$ ). На втором этапе работы алгоритма значение  $\gamma$  сообщается остальным точкам фона, т. е. значением  $\gamma$  заменяются значения функции  $B(x_1, x_2)$ , координаты которых лежат на границе или внутри указанного прямоугольника и вне эквидистантного обрам-

ления контурного изображения геометрического объекта. Последнее условие проверяется с помощью предикатного  $P^3$  или аналитического  $f^3$  описания (в точках фона  $f^3 < 0$ ,  $P^3 = 0$ ).

Список литературы: 1. Рвачев В. Л. Методы алгебры логики в математической физике.— Киев: Наук. думка, 1974.— 259 с. 2. Тоница В. С. Нормальные представления и геометрическая интерпретация функций одного замкнутого множества трехзначной логики.— Автоматизация проектирования в машиностроении, 1977, вып. 2, с. 8—17. 3. Рвачев В. Л., Тоница В. С., Шкляров Л. И. Множество простых замыкающих функций трехзначной логики.— Докл. АН УССР, Сер. А, 1979, № 2, с. 90—94. 4. Психология машинного зрения / Б. Хорн, М. Минский, И. Сиран, Д. Уолц, П. Уинстон.— М.: Мир, 1978.— 343 с. 5. Стоян Ю. Г., Гиль Н. И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов.— Киев: Наук. думка, 1976.— 246 с. 6. Гимельфарб Г. Л., Крот В. М. Использование спрямляющего пространства при подборе кривой линии или поверхности, аппроксимирующей заданную совокупность точек.— В кн.: Вопросы теории роботов и искусственного интеллекта.— Киев, 1976, с. 52—65.

Поступила в редколлегию 16.12.80.

УДК 62.506.2

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОВОИЗМЕНЕНИЯ ИМЕН ЧИСЛИТЕЛЬНЫХ

Цель данной статьи — описание процессов грамматической обработки русских числительных в терминах алгебры конечных предикатов [1]. Среди наиболее важных задач, составляющих понятие грамматической обработки числительных, можно указать следующие: синтез словоформ, их анализ, нормализацию (представление словоформ числительных в числовом виде). Использование алгебры конечных предикатов позволяет построить уравнения, описывающие какую-нибудь одну процедуру, и применять эти уравнения для выполнения других видов грамматической обработки. В этой статье в качестве первоначальной задачи выбран синтез словоформ числительных.

Входными данными в задаче синтеза является число в десятичном виде, т. е. в виде слова  $S = c_1 c_2 \dots c_n$  в алфавите из десятичных цифр 0, 1, ..., 9 (в записи слова меньшие индексы соответствуют старшим разрядам); другую часть входных данных составляет набор грамматических признаков  $z_1, z_2, \dots, z_6$ . В результате синтеза выдается числительное, записанное в слове  $Y = y_1 y_2 \dots y_m$  в русском алфавите.

На числительные, изучаемые в данной статье, накладываются некоторые ограничения: 1) не рассматриваются порядковые числительные, поскольку их проще рассматривать вместе с прилагательными; 2) не рассматриваются числительные, описывающие числа больше 1000, поскольку это привело бы лишь к увеличению формул, не добавляя ничего в идейном

плане; 3) не рассматриваются составные числительные, т. е. состоящие из нескольких слов, поскольку это — самостоятельная следующая задача, которую нужно решать, опираясь на результаты данной работы.

Эти ограничения оставляют количественные числительные до тысячи включительно, простые (с одной основой) и сложные (с двумя основами), но зато их морфология изучается во всех подробностях. Поэтому в наших рассмотрениях  $n=4$ , а  $m$  с запасом принято равным 20; запас нужен, поскольку в ходе синтеза слова  $Y = y_1 y_2 \dots y_m$  понадобятся «рабочие ячейки». Если число не занимает всего слова  $C$  или числительное не занимает всего слова  $Y$ , то свободные места справа заняты пробелами (обозначаются «—»). Точнее, перед началом обработки все слова очищаются пробелами, а занесения производятся слева.

На первом шаге синтеза по числу  $C$  определяются цифровые значения основы  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  или  $\sigma$ . В  $\tau_i$  записываются цифровые значения простых или препозиционных основ, а в  $\sigma$  — значения постпозиционных основ. Символы  $\tau_i$  повторяют  $c_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ . Например, число 1000 в терминах  $\tau$  запишется так:  $\tau_1=1, \tau_2=0, \tau_3=0, \tau_4=0$ . В  $\sigma$  записывается число нолей в постпозиционной основе. Например, -десят в «пятьдесят» даст  $\sigma=1$ , а -сот в «пятьсот» даст  $\sigma=2$ .

На языке конечных предикатов нужные соотношения записываются следующим образом:

$$(c_1^5 \vee c_1^6 \vee c_1^7 \vee c_1^8) c_2^0 c_3^0 \sim (\tau_1 = c_1)(\tau_2 = -)(\sigma = 1); \quad (1)$$

$$A c_2^0 c_3^0 c_4^0 \sim (\tau_1 = c_1)(\tau_2 = -)(\sigma = 2)(z_4 = \text{н})(z_2 = \text{ж}); \quad (2)$$

$$A c_2^0 \vee c_1^1 \vee (c_2^2 \vee c_1^3 \vee c_1^4 \vee c_1^5) c_2^0 c_4^0 \sim (\tau_i = c_i)(\sigma = -). \quad (3)$$

Здесь

$$A = c_1^2 \vee c_1^3 \vee c_1^4 \vee c_1^5 \vee c_1^6 \vee c_1^7 \vee c_1^8 \vee c_1^9,$$

в выражении (2) два последних члена справа характеризуют склонение препозиционной основы (см. выражения (6) и (8) ниже).

Будем обозначать через  $x_1, x_2, \dots, x_k$  буквенные выражения основ простых числительных или препозиционных основ сложных числительных, а через  $u_1, u_2, \dots, u_k$  — буквенные значения постпозиционных основ. Эти соотношения записываются следующей формулой:

$$\begin{aligned} & x_1^0 x_2^0 (x_3^0 x_4^0 \vee x_3^0 x_4^0) x_5^0 \tau_1 \tau_2 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 \tau_1 \tau_2 \vee \\ & \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 \tau_1 \tau_2^3 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 x_5^0 x_6^0 \tau_1 \tau_2^4 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 \tau_1 \tau_2^5 \vee \\ & \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 \tau_1 \tau_2^6 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 \tau_1 \tau_2^7 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 (x_4^0 \vee x_4^0) x_5^0 x_6^0 \tau_1 \tau_2^8 \vee \\ & \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 x_5^0 x_6^0 \tau_1 \tau_2^9 \vee x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^0 x_5^0 x_6^0 \tau_1 \tau_2 \tau_3^0 \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \vee ((x_1^p x_2^b x_3^e \tau_2^2 \vee x_1^t x_2^p x_3^d \tau_2^1 \vee x_1^p x_2^p x_3^t \tau_2^5 \vee \\
& \quad \vee x_1^e x_2^e x_3^m \tau_2^7) x_4^h x_5^d x_6^h x_7^h x_8^h x_9^h x_{10}^h \vee \\
& \vee (x_1^0 x_2^d x_3^h x_4^h \tau_2^1 \vee x_1^h x_2^e x_3^c x_4^t \tau_2^6) x_5^h x_6^d x_7^d x_8^d x_9^h x_{10}^h x_{11}^h \vee \\
& \quad \vee (x_1^4 x_2^e x_3^t x_4^p x_5^d \tau_2^4 \vee x_1^b x_2^0 x_3^c x_4^e x_5^t \tau_2^8 \vee \\
& \quad \vee x_1^d x_2^e x_3^h x_4^h x_5^t \tau_2^9) x_6^h x_7^h x_8^h x_9^h x_{10}^h x_{11}^h x_{12}^h x_{13}^h \vee \\
& \quad \vee ((x_1^d x_2^b x_3^a \tau_1^2 \vee x_1^t x_2^p x_3^t \tau_1^3) x_4^d x_5^p x_6^a x_7^h \tau_1^1 \vee \\
& \quad \vee x_1^c x_2^0 x_3^0 x_4^k x_5^h \tau_1^4 \vee x_1^h x_2^e x_3^h x_4^h x_5^h x_6^h x_7^h x_8^h x_9^h \tau_1^9) \wedge \\
& \quad \wedge \tau_2^0 \tau_3^1 \vee x_1^c x_2^t x_3^1 \tau_2^0 \tau_3^0 \tau_4^1 \vee \tau_1^0 \tau_2^0 \tau_3^0 \tau_4^0 \tau_5^1 x_1^h x_2^h x_3^h \wedge \\
& \quad \wedge x_4^h x_5^h x_6^h \vee u_1^h u_2^h u_3^h u_4^h u_5^h u_6^h \sigma^1 \vee (u_1^0 u_2^h u_3^h u_4^h \vee u_1^h u_2^h u_3^h) \sigma^2. \quad (4)
\end{aligned}$$

Приведем соотношения, которые характеризуют связь основ и окончаний количественных числительных в зависимости от грамматических признаков  $z_1 \dots z_6$ . При этом следует иметь в виду, что словоформы различных числительных характеризуются различными наборами грамматических признаков. Например, числительное «пять» изменяется только по падежам, а числительное «один» — по падежам, родам, числам и имеет противопоставление словоформ по признаку одушевленности или неодушевленности. Приводимые ниже уравнения учитывают всю эту пестроту морфологии числительных. Условно считается, что окончание любой словоформы числительного, т. е. окончание простого числительного или основы в препозиции в сложном числительном, состоит из трех символов  $s_1, s_2$  и  $s_3$ . Например, для словоформы «двумя» —  $s_1 = y, s_2 = m, s_3 = я$ , а для словоформы  $s_1 = y, s_2 = x, s_3 = \_$  — «двухсот».

Символы, образующие окончание постпозиционных основ в сложных числительных, обозначим  $T_1, T_2, T_3$ . Например, для словоформы «двумястами»  $T_1 = a, T_2 = m, T_3 = и$ , а для «двухсот» —  $T_1 = \_, T_2 = \_, T_3 = \_$ .

При формализации словоизменения числительных можно описывать условия выбора сразу трех символов окончания  $s_1, s_2, s_3$  и/или  $T_1, T_2, T_3$  в зависимости от лексического (числового) значения основы и грамматических признаков словоформы. Но оказалось, что, как и в других частях речи [2], описание будет более экономным, если описывать условия употребления той или иной буквы в отдельных позициях окончаний  $s_l$  и  $T_l$  ( $l = 1, 2, 3$ ). Приводимые ниже уравнения построены именно по этому принципу. Они связывают буквенные значения отдельных позиций в окончаниях числительных с выражаемыми ими грамматическими категориями и особенностями примыкающих основ.

Уравнения, описывающие области определения переменных для обозначения грамматических категорий числительных:

$$z_1^h \vee z_1^p \vee z_1^t \vee z_1^e \vee z_1^d \vee z_1^m \quad (5); \quad z_2^h \vee z_2^x \vee z_2^c \quad (6);$$

$$z_3^E \vee z_3^M \text{ (7); } z_4^0 \vee z_4^N \text{ (8); } z_5^c \vee z_5^H \text{ (9).}$$

Здесь  $z_1$  — переменная для обозначения падежа словоформ;  $z_2$  — переменная для обозначения рода;  $z_3$  — переменная для обозначения числа;  $z_4$  — для обозначения признака одушевленности (неодушевленности);  $z_5$  — для обозначения признака старой или новой формы слова.

Уравнения, описывающие третью букву  $s_3$  или  $T_3$  в окончаниях числительных  $s_1, s_2, s_3$  или  $T_1, T_2, T_3$ :

$$\overline{s_3} \vee s_3^0 \vee s_3^y \vee s_3^N \vee s_3^M \text{ (10); } T_3^N \vee T_3^- \text{ (11);}$$

$$s_3^0 = (z_1^p z_2^m \vee z_1^N z_2^0 z_2^m \vee z_1^p z_2^c) z_3^E z_3^H \tau_1^- \tau_2^-; \text{ (12)}$$

$$s_3^y = z_1^p z_2^N z_3^E z_3^H \tau_1^- \tau_2^- \text{ (13); } s_3^N = z_1^T (\tau_1^2 \vee \tau_1^3) \tau_2^- \text{ (14);}$$

$$s_3^M \tau_1^- \vee T_3^M \sigma^2 = z_1^T (\sigma^2 \vee z_3^M \tau_4^0). \text{ (15)}$$

Не обязательно выписывать в явном виде уравнения, описывающие условия употребления пробела (—) в качестве значения  $s_3$  или  $T_3$ , так как это условие может быть определено из равенств (10) и (11) в совокупности с (12) — (15).

Уравнения, описывающие вторую букву  $s_2$  или  $T_2$  в окончаниях числительных  $s_1, s_2, s_3$  и  $T_1, T_2, T_3$ :

$$\overline{s_2} \vee s_2^T \vee s_2^M \vee s_2^N \vee s_2^H \vee s_2^0 \vee s_2^y \text{ (16); } T_2^M \vee T_2^N \vee T_2^H \vee T_2^- \text{ (17);}$$

$$s_2^T = z_3^E \tau_1^- \tau_2^- (z_2^- (z_2^M (z_1^p \vee z_1^N z_4^0) \vee z_1^p z_2^c); \text{ (18)}$$

$$s_2^M = (z_3^E (z_2^c \vee z_2^M) (z_1^T \vee z_1^T \vee z_1^N) \vee z_2^H z_3^H (z_1^T \vee z_1^T) \tau_1^- \tau_2^- \vee (z_1^N \vee z_1^T) (\tau_1^2 \vee \tau_1^3 \vee \tau_1^4) \tau_2^- \vee (z_1^T \vee z_1^T) z_3^M \tau_4^0; \text{ (19)}$$

$$s_2^N = (z_1^p \vee z_1^T) z_3^M \tau_1^- \tau_2^- \vee (z_1^p \vee z_1^N z_4^0 \vee z_1^T) (\tau_1^2 \vee \tau_1^3 \vee \tau_1^4) \tau_2^- \vee z_1^T \tau_4^0 z_3^M; \text{ (20)}$$

$$s_2^H = (z_1^p \vee z_1^T \vee z_1^T z_5^H \vee z_1^T) z_2^N z_3^E \tau_1^- \tau_2^-; \text{ (21)}$$

$$s_2^0 = z_1^T (z_2^N z_3^E z_5^c \tau_1^- \tau_2^-) \vee (\tau_1^5 \vee \tau_1^6 \vee \tau_1^7 \vee \tau_1^8 \vee \tau_1^9) \tau_2^- \vee \tau_1^- \tau_3^- (\tau_2^0 \vee \tau_2^1 \vee \tau_2^2 \vee \tau_2^3 \vee \tau_2^4 \vee \tau_2^5 \vee \tau_2^6 \vee \tau_2^7 \vee \tau_2^8 \vee \tau_2^9) (\tau_1^2 \vee \tau_1^3) \tau_2^- \tau_3^-; \text{ (22)}$$

$$s_2^y = z_1^p z_3^M \tau_5^0. \text{ (23)}$$

Нет необходимости записывать специальное уравнение, которое фиксирует условия, когда вторая буква окончания  $s_2$  равна пробелу (—). Это условие вполне однозначно определяется как дополнение к уравнениям (18) — (23) по отношению к полному перечню возможных значений, указанному в формуле (16):

$$T_2^M = (z_1^T \vee z_1^T) \sigma^2 x_2^T \text{ (24); } T_2^N = z_1^T \sigma^2 x_2^1 \text{ (25); } T_2^H = z_1^T \sigma^1 \text{ (26).}$$

Вторая буква постпозиционного окончания  $T_2$  равна пробелу, когда она не равна «м», «х» или «ю».

Уравнения, описывающие первую букву  $s_1$  или  $T_1$  в окончаниях числительных  $s_1s_2s_3$  или  $T_1T_2T_3$ :

$$\bar{s}_1 \vee s_1^0 \vee s_1^H \vee s_1^A \vee s_1^Y \vee s_1^E \vee s_1^b \vee s_1^M; \quad (27)$$

$$T_1^H \vee T_1^b \vee T_1^A \vee T_1^- (z_1^H \bar{\sigma} \vee z_1^B z_2^H \bar{\sigma} \vee z_1^P \sigma^2) \vee \bar{\sigma}^-; \quad (28)$$

$$s_1^0 = (z_1^P \vee z_1^H \vee z_1^T \vee z_1^B z_2^C z_2^M \vee z_1^T z_2^K \vee z_1^B z_2^C) z_3^E \tau_1^1 \tau_2^- \vee \\ \vee (z_1^H \vee z_1^B) (\tau_1^1 \tau_3^0 \tau_4^- \vee \tau_1^9 \tau_3^-) \tau_2^0 \vee (z_1^T z_3^E \vee z_1^P z_3^M) \tau_3^0; \quad (29)$$

$$s_1^H = (z_3^M \vee z_1^T (z_2^E \vee z_2^C) z_2^E) \tau_1^1 \tau_2^- \vee (z_1^H \vee z_1^B z_2^H) \tau_1^3 \tau_3^- \vee \\ \vee (z_1^P \vee z_1^H \vee z_1^T) \beta \vee (z_1^P z_3^E \vee z_1^H z_3^M \vee z_1^B z_3^M) \tau_4^0 \tau_5^-; \quad (30)$$

Здесь

$$\beta = (\tau_1^5 \vee \tau_1^6 \vee \tau_1^7 \vee \tau_1^8 \vee \tau_1^9) \tau_2^- \vee (\tau_2^0 \vee \tau_2^1 \vee \\ \vee \tau_2^2 \vee \tau_2^3 \vee \tau_2^4 \vee \tau_2^5 \vee \tau_2^6 \vee \tau_2^7 \vee \tau_2^8 \vee \tau_2^9) \tau_1^1 \tau_3^- \vee (\tau_1^2 \vee \\ \vee \tau_1^3) \tau_4^0 \tau_5^-; s_1^A = z_1^H z_2^K z_3^E \tau_1^1 \tau_2^- \vee (z_1^H \vee z_1^B z_2^H) z_2^M \tau_2^2 \tau_2^- \vee \\ \vee z_1^H z_2^H \vee (z_1^P \vee z_1^H \vee z_1^T \vee z_1^B) \sigma \vee ((z_1^P \vee z_1^T \vee z_1^B) z_3^M \vee \\ \vee (z_1^M z_2^K \tau_5^- \vee z_1^P z_2^M \tau_5^0) z_3^E) \tau_4^0,$$

где

$$\sigma = ((\tau_1^4 \vee \tau_1^9) \tau_3^- \vee \tau_1^1 \tau_3^0 \tau_4^-) \tau_2^0; \quad (31)$$

$$s_1^Y = (z_1^P \vee z_1^H \vee z_1^T \vee z_1^B) \tau_1^2 \tau_2^- \vee z_1^B (z_2^K z_3^E (\tau_1^1 \tau_2^- \vee \\ \vee \tau_4^0 \tau_5^-) \vee z_2^M z_4^2 \tau_1^2 \tau_2^-) \vee z_1^P z_2^M z_3^E \tau_5^0; \quad (32)$$

$$s_1^E = ((z_1^H \vee z_1^B) z_2^K \tau_1^2 \vee z_1^H (z_1^B z_2^H) \tau_1^3 \vee z_1^T \tau_1^4) \tau_2^- \vee \\ \vee (z_1^H \vee z_1^T \vee z_1^B) z_2^K z_3^E \tau_4^0 \tau_5^- \vee z_1^P z_2^M z_3^E \tau_5^0; \quad (33)$$

$$s_1^b = z_1^T \tau_1^4 \tau_2^- \vee (z_1^H \vee z_1^B \vee z_1^T) \beta; \quad (34)$$

$$s_1^M = (z_1^H \vee z_1^B) z_2^M z_3^E \tau_5^0. \quad (35)$$

Условие, когда первая буква окончания  $s_1$  равна пробелу (—), не записывается тогда, когда равны нулю правые части уравнений (29) — (35):

$$T_1^H = (z_1^P \vee z_1^H \vee z_1^T) \tau_0^1 \vee (z_1^H \vee z_1^B) \sigma^2 \tau_2^T \tau_2^-; \quad (36)$$

$$T_1^A = (z_1^H \vee z_1^T \vee z_1^B) D \vee (z_1^H \vee z_1^B) \sigma^2 \tau_2^T \tau_2^- (\tau_1^3 \vee \tau_1^1); \quad (37)$$

$$D = \sigma^2 \tau_2^T \tau_2^- (\tau_1^2 \vee \tau_1^3 \vee \tau_1^4 \vee \tau_1^5 \vee \tau_1^6 \vee \tau_1^7 \vee \tau_1^8 \vee \tau_1^9) \\ T_1^b = z_1^T \sigma^1 (\tau_1^5 \vee \tau_1^6 \vee \tau_1^1 \vee \tau_1^8) \tau_2^-; \quad (38)$$

Условие, когда  $T_1 = —$ , не записывается. Это условие выполняется, когда правые части уравнений (36) — (38) равны нулю.

Подставляя известные значения переменных в уравнения (1) — (38) и решая их, мы сможем получить значения переменных

$x_1, \dots, x_k, s_1, s_2, s_3, u_1, \dots, u_k, T_1, T_2, T_3$ . Некоторые значения переменных будут равны пробелу ( $\_$ ), а некоторые отличны от пробела. Теперь необходимо объединить отличные от пробела символы и словоформу  $y_1, \dots, y_m$ , что и является конечной задачей синтеза словоформы.

Для удобства записи уравнений это объединение проведем поэтапно. Вначале объединим препозиционную основу  $x_1, \dots, x_k$  с окончанием  $s_1s_2s_3$ , в результате чего будет получена промежуточная последовательность символов  $h_1, \dots, h_p$ . Затем объединим постпозиционную основу  $u_1, \dots, u_k$  со своим окончанием  $T_1T_2T_3$ , в результате чего будет получена последовательность символов  $l_1, \dots, l_p$ . Словоформа  $y_1, \dots, y_m$  будет получена в результате присоединения справа к отличным от пробела символам из последовательности  $h_1, \dots, h_p$  символов последовательности  $l_1, \dots, l_p$ . Таким образом, схема синтеза словоформы  $y_1, \dots, y_m$  на последнем этапе выглядит так:

$$\begin{aligned} x_1, \dots, x_k + s_1s_2s_3 &\rightarrow h_1, \dots, h_p; \\ u_1, \dots, u_k + T_1T_2T_3 &\rightarrow l_1, \dots, l_p; \\ h_1, \dots, h_p + l_1, \dots, l_p &\rightarrow y_1, \dots, y_m (m = 2p). \end{aligned}$$

Запишем уравнения, которые объединяют  $x_1, \dots, x_k$  с  $s_1s_2s_3$  в последовательности  $h_1, \dots, h_p$ :

$$\overline{x_i} \supset (h_i = x_i); (i = 1, k) \quad (39), \quad \overline{x_i} \supset \overline{h_i} \quad (40),$$

$$\overline{x_2} \overline{x_{2+1}} \supset (h_{i+1} = s_1) (h_{i+2} = s_2) (h_{i+3} = s_3). \quad (41)$$

Уравнения, объединяющие  $u_1, \dots, u_k$  с окончанием  $T_1T_2T_3$ :

$$\overline{u_i} \supset (l_i = u_i) \quad (42), \quad \overline{u_i} \supset \overline{l_i} \quad (43),$$

$$\overline{u_i} \overline{u_{i+1}} \supset (l_{i+1} = T_1) (l_{i+2} = T_2) (l_{i+3} = T_3). \quad (44)$$

Уравнения, объединяющие  $h_1, \dots, h_p, l_1, \dots, l_p$ :

$$\overline{h_i} \supset (y_i = h_i), \quad (45)$$

$$\overline{h_i} \overline{h_{i+1}} \supset (y_{i+1} = l_1) (y_{i+2} = l_2) \dots (y_{i+p} = l_p). \quad (46)$$

Рассмотрим на примерах, как действует предложенная система уравнений при синтезе словоформ числительных.

Пусть необходимо получить словоформу числительного с числовым значением «1» и такими значениями грамматических признаков: мужской род, единственное число, винительный падеж, одушевленный. Закодируем эти данные в соответствии с введенными обозначениями:

$$e_1 = 1, e_2 = \_ , \dots, e_n = \_ ; z_1 = B, z_2 = M; z_3 = E; z_4 = 0.$$

Необходимо получить  $y_1, \dots, y_m$ .

Исходные данные следует подставить во все 46 уравнений, формализующих морфологию численных. Но не во всех уравне-

ниях имеются эти переменные. Кроме того, объем вычислений в значительной мере зависит от того, в какой последовательности будут поставлены заданные значения переменных в уравнения. Поэтому, рассматривая пример, будем подставлять заданные значения в систему уравнений в последовательности, которая позволяет получить  $y_1, y_2, \dots, y_m$  наиболее коротким путем.

Прежде всего подставим  $c_1 = 1, c_2 = \text{—}, \dots, c_n = \text{—}$  в формулы (1)—(3) для получения числового значения  $\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n$  основы (или двух основ), входящих в состав искомой словоформы.  $c_1 = 1$  удовлетворяет левой части только уравнения (3), из которого мы находим  $\tau_1 = c_1 = 1, \tau_2 = c_2 = \text{—}, \dots, \tau_n = c_n = \text{—}$  ( $\sigma$  по-прежнему равно пробелу).

Подставим полученные значения  $\tau_1, \dots, \tau_n$  в равенство (4) для получения буквенного состава основы синтезируемой словоформы.  $\tau_1 = 1, \tau_2 = \text{—}$  обращают в единицу единственное слагаемое уравнения (4):

$$x_1^0 x_2^1 x_3^1 x_4^1 x_5^{\text{—}} \vee x_1^0 x_2^1 x_3^1 x_4^{\text{—}} x_5^{\text{—}}.$$

На следующем шаге определим  $s_3$  и  $T_3$  с помощью уравнений (10)—(15). Для этого подставим исходные и полученные значения переменных в правые части (12)—(15).  $\tau_1 = 1, \tau_2 = \text{—}$  удовлетворяют только уравнениям (12) и (13), но значения  $z_1 = \text{в}, z_2 = \text{м}, z_3 = \text{Е}, z_4 = 0$  удовлетворяют только (12). Из этого уравнения находим, что  $s_3 = 0$ , и одновременно устанавливаем, что  $x_3 = \text{н}$ . Переменная  $T_3$  входит в (11) и (15). При подстановке известных и полученных значений переменных правая часть равенства (15) обращается в ноль, следовательно,  $T_3 \neq \text{п}$ . При этом условии из (11) определяется, что  $T_3 = \text{—}$ .

Определим  $s_2$  и  $T_2$  с помощью формул (16)—(26). Значения  $\tau_1 = 1$  и  $\tau_2 = \text{—}$  входят в уравнения (18)—(22). Назначения  $z_1 = \text{в}, z_2 = \text{М}, z_3 = \text{Б}, z_4 = 0$  удовлетворяют только правой части уравнения (18), из которого определяем, что  $s_2 = \text{г}$ . Значения  $T_2$  присутствуют в (17)—(26). При подстановке известных значений правые части (25)—(26) обращаются в ноль, следовательно,  $T_2 \neq \text{м}, T_2 \neq \text{ю}$  и  $T_2 \neq \text{х}$ . Из равенства (17) при этом условии следует, что  $T_2 = \text{—}$ .

Определим  $s_1$  и  $T_1$  с помощью уравнений (27)—(38):  $\tau_1 = 1$  и  $\tau_2 = \text{—}$  входит в формулы (29)—(32). Но значения грамматических признаков удовлетворяют только уравнению (29). Из него мы находим, что  $s_1 = 0$ . При подстановке известных данных в (36)—(38) их правые части обращаются в ноль. Это означает, что  $T_1 \neq \text{п}, T_1 \neq \text{а}$  и  $T_1 \neq \text{ь}$ . При этом условии из (28) следует, что  $T_1 = \text{—}$ .

Таким образом, мы установили, что элементы словоформы имеют следующие значения:  $x_1 = 0, x_2 = \text{д}, x_3 = \text{н}, x_4 = \text{—}, x_5 = \text{—}, s_1 = 0, s_2 = \text{г}, s_3 = 0, u_1 = \text{—}, T_1 T_2 T_3$ . Значения  $u$  равны пробелу, так как они не изменились в процессе решения урав-

нений. Теперь необходимо объединить эти элементы в одну словоформу.

С помощью равенств (39)—(41) объединим значения  $x_1, x_2, \dots, x_{11} \subset s_1 s_2 s_3$ . Согласно (39)  $h_1 = x_1 = 0, h_2 = x_2 = д, h_3 = x_3 = н$ . Из уравнения (40) следует, что остальные  $h$  принимают значения, равные пробелу (—). Но при решении (41) переменные  $h_4, h_5$  и  $h_6$  изменяют свои значения:  $h_4 = s_1 = 0, h_5 = s_2 = г, h_6 = s_3 = 0$ .

С помощью формул (42)—(44) объединим  $x_1, \dots, x_{11}$  с  $T_1 T_2 T_3$ . При подстановке известных значений только в (43) левая часть не равна нулю. Из этого уравнения определяем, что  $l_1, \dots, l_k$  равны пробелу (—), остальные  $l_{k+1}, \dots, l_p$  равны пробелу в результате первоначальной очистки.

С помощью равенств (45), (46) определим значение  $y_1, \dots, y_m$ . Из уравнения (45) следует, что  $y_1 = 0, y_2 = д, y_3 = н, y_4 = 0, y_5 = г, y_6 = 0$ . Согласно (46)  $y_7 = —, y_8 = —, \dots, y_{20} = —$ . В результате мы получили искомую словоформу: **ОДНОГО**.

Аналогичным образом можно решать задачи анализа, синтеза словсформ сложных числительных и др. Предложен и реализован на ЕС-1022 алгоритм решения уравнений алгебры конечных предикатов [3].

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О теории интеллекта.— Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 3—10. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Бондаренко М. Ф. Математическая модель склонения полных непряжательных имен прилагательных.— НТИ, сер. 2, 1979, № 6, с. 10—13. 3. Бондаренко М. Ф., Бондарев В. М. Программа решения системы уравнений алгебры конечных предикатов с ярусной структурой.— РФАП АН УССР, Справка № 111, 1980.

Поступила в редколлегию 05.03.81.

УДК 510.62

З. В. ДИМА, А. Ф. ОСЫКА, канд. техн. наук

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПРЯЖЕНИЯ НЕВОЗВРАТНЫХ ГЛАГОЛОВ РУССКОГО ЯЗЫКА

Математическое описание способности человека владеть языком — сложная и обширная задача. Ее полное решение требует усилий многих специалистов, работающих в области искусственного интеллекта.

В настоящей статье описывается моделирование русского языка лишь на морфологическом уровне, т. е. на уровне обработки отдельных слов. А это в свою очередь также является сложной задачей, поэтому ограничим ее следующим образом. Будем строить математическую модель словоизменения русского языка. Такие явления, как чередования в основе слова, беглости, постановка ударения и некоторые другие, модель не охватывают. Нас будет интересовать, как в процессе словоизменения меняется окончание той или иной словоформы, т. е. по-

пытаемся описать фрагментное отношение  $L(X, Y)$ , отражающее связь между смыслом  $X$  и переменным фрагментом текста  $Y$ . В качестве переменного фрагмента текста из всех морфем слова выберем окончание. В данной статье ограничимся рассмотрением окончаний глагольных словоформ. Под смыслом текста  $X$  понимаем некоторый набор признаков, заменяющий действие отброшенной части текста.

Статья посвящена выбору подходящей структуры многокомпонентных векторов  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ( $n$  — число компонентов вектора смысла) и  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  ( $m$  — число компонентов вектора фрагмента текста). В отношении вектора  $Y$  все относительно просто. В качестве фрагмента текста мы приняли окончание. Полагаем, что глагольные окончания состоят не более чем из трех букв, поэтому формально представим окончание в виде трехкомпонентного вектора  $Y = (y_1, y_2, y_3)$ , где  $y_1, y_2, y_3$  — буквы, стоящие на первом, втором, третьем местах фрагмента (окончания) соответственно. Нумерация букв фрагмента производится слева направо. Переменные  $y_1, y_2, y_3$  имеют области изменения, задаваемые следующими уравнениями алгебры конечных предикатов [3]:

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 \vee y_1^i \vee y_1^{ii} \vee y_1^e \vee y_1^e \vee y_1^i \vee y_1^{ii} \vee y_1^a \vee y_1^a \vee y_1^a \vee y_1^b &= 1; \\ y_2^r \vee y_2^a \vee y_2^m \vee y_2^m \vee y_2^r \vee y_2^r \vee y_2^a &= 1; \\ y_3^a \vee y_3^e \vee y_3^a \vee y_3^0 \vee y_3^b \vee y_3^r &= 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Выбор структуры вектора  $X$  зависит от ограничений, накладываемых на модель спряжения глаголов, поэтому сначала обсудим эти ограничения.

Построение математической модели будем производить для невозвратных глаголов. Соответствующие формы возвратных глаголов, если они вообще имеются, отличаются лишь наличием конечного постфикса *-ся* (*-сь*), который присоединяется к словоформе посредством несложной формальной процедуры. В глагольную парадигму будем включать лишь личные формы (наиболее важные компоненты глагола как части речи). Причастия и деепричастия рассматриваются как самостоятельные части речи.

В качестве исходной формы для всей системы глагола примем неличную форму — инфинитив, которая не имеет форм словоизменения. Глагольная парадигма включает два залога — действительный и страдательный. В действительном залоге формы противопоставляются по наклонениям, временам, числам, лицам и (в прошедшем времени) по родам.

Модель будем строить для грамматического разряда с максимальной парадигмой, т. е. для глаголов переходных несовершенного вида (не многократных и не безличных), например: *читать* [1]. Остальные грамматические разряды глаголов имеют

сокращенные парадигмы, получение которых выходит за рамки нашей задачи.

Математическая модель не учитывает сослагательное наклонение, сложное будущее время, одну из форм первого лица множественного числа повелительного наклонения (форму обращения ко многим лицам), например, *пойдемте*, так как в данной форме четырехбуквенное окончание (а у нас с целью экономии аппаратурных средств выбран трехбуквенный регистр); присоединение частиц *-ся(-сь)* к страдательным формам и к окончаниям возвратных глаголов.

С учетом изложенных замечаний приведем пример рассматриваемой глагольной парадигмы на примере конкретного глагола: *<делать, делаю, делаешь, делает, делаем, делаете, делают, делай, делаем, делайте, делал, делала, делали>*. Окончания в формах действительного и страдательного залога совпадают с точностью до постфикса *-ся(-сь)*, поэтому на данном этапе признак залога не вводится. Еще два замечания: 1) инфинитив относится к неличным формам глагола, поэтому необходимо учесть противопоставление личных и неличных форм признаком репрезентации со значениями инфинитив, личная форма; 2) глаголы совершенного и несовершенного видов имеют одинаковые окончания в настоящем и будущем времени, поэтому глагольные формы будем противопоставлять только по двум временам — непрошедшему (т. е. настоящему или будущему) и прошедшему.

Таким образом, мы имеем возможность ввести шесть компонентов вектора  $X = (x_1, x_2, \dots, x_6)$ , т. е. шесть признаков. Значения переменных  $x_1, x_2, \dots, x_6$  являются значениями компонентов смысла. Признаку репрезентации сопоставим переменную  $x_1$ ; признакам рода, числа, наклонения, времени, лица — переменные  $x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  соответственно.

Признак репрезентации имеет одно из двух значений: инфинитив (и) и личная форма (л). Любому слову присуще одно из трех возможных значений рода: мужской (м), женский (ж), средний (с). Глагольные формы противопоставляются по единственному (е) и множественному (м) числу, по изъявительному (и) и повелительному (п) наклонению, по прошедшему (п) и непрошедшему (н) времени, а также по лицам — первому (1), второму (2), третьему (3). Таким образом, области изменения переменных  $x_1, x_2, \dots, x_6$  задаются следующими уравнениями алгебры конечных предикатов:

$$\begin{aligned} x_1^i \vee x_1^l &= 1; & x_2^m \vee x_2^f \vee x_2^c &= 1; & x_3^e \vee x_3^m &= 1; \\ x_4^i \vee x_4^p &= 1; & x_5^n \vee x_5^f &= 1; & x_6^1 \vee x_6^2 \vee x_6^3 &= 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Указанных признаков оказывается недостаточно для однозначного определения окончания конкретной словоформы. Например, если задать набор признаков  $x_1^l x_3^e x_4^i x_5^f x_6^2$ , то возможным

становится любое из трех окончаний *-ешь*, *-ѣшь*, *-ишь*; при наборе  $x_1^7 x_3^e x_4^n x_5^n x_6^2$  возможно любое из двух окончаний *у*, *-ю*.

Проведенные исследования показали, что дополнительными признаками, обеспечивающими выполнение принципа однозначности, являются следующие:  $x_7$  — признак последней буквы основы с областью значений на множестве букв русского алфавита;  $x_8$  — тип влияния основы со значениями первый (1), второй (2);  $x_9$  — признак спряжения с одним из возможных значений первое (1), второе (2);  $x_{10}$  — ударность основы со значениями ударная (у), безударная (б);  $x_{11}$  — признак наличия частицы *вы-* со значениями да (д), нет (н);  $x_{12}$  — признак предпоследней буквы основы, заданный на множестве букв русского алфавита;  $x_{13}$  — признак наличия нормативных ограничений с одним из возможных значений да (д), нет (н). Области изменения переменных  $x_7, x_8, \dots, x_{13}$  следующие:

$$\begin{aligned} x_7^n \vee x_7^o \vee \dots \vee x_7^n &= 1; \quad x_8^1 \vee x_8^2 = 1; \quad x_9^1 \vee x_9^2 = 1; \\ x_{10}^y \vee x_{10}^b &= 1; \quad x_{11}^d \vee x_{11}^n = 1; \quad x_{12}^a \vee x_{12}^b \vee \dots \vee x_{12}^z = 1; \\ x_{13}^d \vee x_{13}^n &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, вектор смысла имеет тринадцать компонентов  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{13})$ . Нетрудно убедиться в том, что указанный набор признаков не только полон, но и несократим. Исключив из набора, например, признак числа, получим не одно, а два возможных окончания *-ю*, *-ем* (*делаю*, *делаем*); исключив признак ударности основы, вновь получим неоднозначность *-ешь*, *ѣшь* (*делаешь*, *делаѣшь*).

Впредь фрагментное отношение  $L(X, Y)$  будем называть морфологическим в связи с тем, что в качестве фрагмента  $Y$  выступает часть слова, а именно — окончание. В силу полноты набора признаков перейдем от морфологического отношения  $L(X, Y)$  к морфологической функции  $Y = f(X)$ .

Весь набор признаков  $X$  удобно представить в виде совокупности двух относительно самостоятельных групп. В одну группу войдут признаки, характеризующие влияние основы конкретной словоформы на окончание, т. е. влияние слова на окончание (признаки  $x_7, x_8, \dots, x_{13}$ ). В другую — признаки ( $x_1, x_2, \dots, x_6$ ), характеризующие влияние всей остальной части отброшенного текста на окончание. Этот вид влияния назовем просто влиянием текста. Такое разделение признаков позволяет обрабатывать каждую из групп отдельно.

В [2] предлагается функцию  $Y = f(X)$  представить в виде  $Y = \varphi(S, t)$ , где  $S = \xi(X)$ ,  $t = \eta(X)$ . Для функции  $t$  аргументами являются признаки  $x_1, x_2, \dots, x_6$ , а для функции  $S$  —  $x_7, x_8, \dots, x_{13}$ . Функции  $t$  и  $S$  построены методом, изложенным в [2]. В результате проведенного разбиения множеств значений признаков получим пронумерованные произвольным образом

классы смежности разбиения, которые и примем в качестве значений функций

$$t = \eta(x_1, x_2, \dots, x_6) \text{ и } S = \xi(x_7, x_8, \dots, x_{13}).$$

Функция  $t = \eta(x_1, x_2, \dots, x_6)$  запишется в виде:

$$\begin{aligned} t^1 &= x_1^n; & t^2 &= x_1^n x_3^n x_4^n x_5^n x_6^n; & t^3 &= x_1^n x_3^n x_4^n x_5^n x_6^n; \\ t^4 &= x_1^n x_3^n (x_4^n x_5^n \vee x_4^n) x_6^n; & t^5 &= x_1^n x_3^n (x_4^n x_5^n \vee x_4^n) x_6^n; & (4) \\ t^6 &= x_1^n x_3^n x_4^n x_5^n x_6^n; & t^7 &= x_1^n x_3^n (x_4^n \vee x_4^n x_5^n) x_6^n; \\ t^8 &= x_1^n x_2^n \wedge x_3^n x_4^n x_5^n; & t^9 &= x_1^n x_2^n x_3^n x_4^n x_5^n; & t^{10} &= x_1^n x_2^n x_3^n x_4^n x_5^n; \\ t^{11} &= x_1^n x_3^n x_4^n x_5^n; & t^{12} &= x_3^n x_5^n x_6^n; & t^{13} &= x_3^n x_5^n x_6^n. \end{aligned}$$

Каждому значению функции  $t$  соответствует определенная группа окончаний. Например, значению  $t=2$  соответствуют окончания  $-y, -ю$ , значению  $t=7$  — окончания  $-ym, -юm, -am, -ям$ . Найденные значения функции  $t$  указывают на наличие 13 способов влияния текста на окончание.

В результате построения функции  $S = \xi(x_7, x_8, \dots, x_{13})$  оказалось, что слово влияет на окончание 47-ю способами. Произвольно выбранные уравнения для нескольких значений функции  $S$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} S^1 &= (x_7^a \vee x_7^e \vee x_7^o \vee x_7^y \vee x_7^u \vee x_7^m \vee x_7^i \vee x_7^o \vee x_7^a \vee x_7^i) x_8^1 x_9^1 \times \\ &\times x_{10}^y x_{11}^n x_{13}^n; & S^{24} &= (x_7^k \vee x_7^a \vee x_7^m) x_8^2 x_{10}^y x_{11}^n x_{13}^n (x_{12}^a \vee x_{12}^e \vee \\ &\vee x_{12}^i \vee x_{12}^o \vee x_{12}^y \vee x_{12}^u \vee x_{12}^m \vee x_{12}^i \vee x_{12}^o \vee x_{12}^a); & (5) \\ S^{38} &= (x_7^k \vee x_7^m \vee x_7^i) x_8^1 x_9^2 x_{10}^y x_{13}^n. \end{aligned}$$

Использование функций  $t$  и  $S$  позволяет компактно записать функцию  $Y = f(X)$ . Приведем для примера несколько уравнений:

$$\begin{aligned} y_1^a &= t^7 (S^{22} \vee S^{24} \vee S^{38} \vee S^{43}); & y_1^a &= t^7 (S^7 \vee S^8 \vee S^{12} \vee S^{13} \vee \\ &\vee S^{14} \vee S^{15} \vee S^{23} \vee S^{24} \vee \dots \vee S^{27} \vee S^{39} \vee S^{40} \vee S^{41} \vee \\ &\vee S^{42} \vee S^{44} \vee S^{45} \vee \dots \vee S^{47}); & y_2^m &= t^3; & y_2^m &= t^5; \\ y_2^n &= t^9 \vee t^{10} \vee t^{11} \vee t^8 (S^1 \vee S^2 \vee \dots \vee S^{15}); & y_3^o &= t^{10}. & (6) \end{aligned}$$

Ранее проведенные исследования показали, что слово влияет на окончание 160-ю способами, а текст — 19-ю. Большое число способов влияния связано с общей постановкой задачи, которая состояла в формировании полной словоформы глагола с учетом всех изменений, происходящих в ней при спряжении. В данной же статье задача сведена к формированию глагольного окончания. Эта задача органически связана с более обширной задачей формирования окончаний для всех частей речи русского языка.

Список литературы: 1. Зализняк А. А. Грамматический словарь русского языка.— М.: Русский язык, 1979.— 879 с. 2. Математическое описание процесса склонения имен прилагательных / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, М. Ф. Бондаренко, В. М. Бондарев, З. Ю. Шабанова-Кушнарченко.— Проблемы бионики, 1980, вып. 24, с. 22—27. 3. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Об алгебре конечных предикатов.— АСУ и приборы автоматки, 1979, вып. 50, с. 14—20.

Поступила в редколлегию 08.04.81.

УДК 510.8

Н. Г. САРНАВСКИЙ, В. В. ШЛЯХОВ

### РАСПОЗНАВАНИЕ $n$ -АРНЫХ ОТНОШЕНИЙ

В этой статье будут доказаны результаты об  $n$ -арных отношениях, обобщающие теорию предыдущего параграфа о бинарных отношениях со свойствами симметрии и антисимметрии.

Пусть  $E$  — произвольное множество;  $n$ -арным отношением называется произвольное подмножество  $F$  декартова произведения  $E \times E \times \dots \times E = E^{(n)}$ .

Будем называть отношение  $\rho$  рефлексивным, если для любого  $x \in E$  вектор  $(x, x, \dots, x) \in F$ . Пусть  $G$  — произвольная подгруппа симметрической группы  $S_n$  (группы всех подстановок  $\begin{pmatrix} 1 & \dots & n \\ \alpha_1 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix}$  из  $n$  элементов). Назовем отношение  $\rho$   $G$ -симметричным, если для каждого вектора  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in F$  и любой подстановки

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & n \\ \alpha_1 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix} \in G$$

вектор  $(x_{\alpha_1}, \dots, x_{\alpha_n})$  также принадлежит подмножеству  $F$ . Если  $G = S_n$ , то  $G$ -симметричные  $n$ -арные отношения  $\rho$  будем называть симметричными. Будем также изучать  $A_n$ -симметричные  $n$ -арные отношения, где  $A_n$  — подгруппа всех четных подстановок группы  $S_n$ .

В дальнейшем будем рассматривать только рефлексивные  $n$ -арные отношения,  $G$ -симметричные по отношению к некоторой группе  $G \subseteq S_n$ . Каждому рефлексивному  $n$ -арному отношению  $\rho$  соответствует трехзначная функция  $T(x) (x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E^{(n)})$ :

$$D_\rho(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 = x_2 = \dots = x_n, \\ 1, & \text{если } x = (x_1, \dots, x_n) \in F \text{ и } \exists x_i \neq x_j, \\ -1, & \text{если } x \notin F. \end{cases} \quad (1)$$

Пусть  $L$  — произвольное множество;  $f_1, \dots, f_n$  — отображения множества  $L$  на множество  $E$ :  $f_i: L \rightarrow E (i = 1, 2, \dots, n)$  (2). Тогда трехзначная функция (1) и отображения (2) определяют функцию  $T(x_1, x_2, \dots, x_n) = D_\rho(f_1(x_1), \dots, f_n(x_n))$  (3).

Трехзначная функция  $T(x_1, \dots, x_n)$  обладает следующими свойствами.

1) Для любого фиксированного элемента  $x_i = \bar{x}_i \in L$  существуют такие элементы  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n \in L$ , что

$$T(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, \bar{x}_i, x_{i+1}, \dots, x_n) = 0.$$

Доказательство. Пусть  $f_i(\bar{x}_i) = y_i$ . Так как  $f_1, \dots, f_{i-1}, f_{i+1}, \dots, f_n$  — сюръективные отображения на  $E$ , то для некоторых  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n \in L$  имеют место равенства  $f_1(x_1) = \dots = f_{i-1}(x_{i-1}) = f_{i+1}(x_{i+1}) = \dots = f_n(x_n) = y_i$ . Тогда  $T(x_1, \dots, x_n) = D_p(y_i, \dots, y_i) = 0$ . Утверждение доказано.

2) Пусть  $x_i, x_i \in L$  и  $T(y_1, \dots, y_{i-1}, x_i, y_{i+1}, \dots, y_m) = T(z_1, \dots, z_{i-1}, x_i, z_{i+1}, \dots, z_m) = 0$  (4).

Если хотя бы для одного индекса  $m \neq i$  выполняется равенство  $y_m = z_m$  (4'), то для любых  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n \in L$   $T(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) = T(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)$ .

Доказательство. Из (4), (2), (1) видно, что  $f_i(x_i) = f_m(y_m)$ ;  $f_i(x_i) = f_m(z_m)$ . Так как  $y_m = z_m$ , то отсюда получаем  $f_i(x_i) = f_i(x_i) = f_m(y_m)$  (5). На основании (5) и (3) для любых  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$  имеем

$$\begin{aligned} T(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) &= D_p(f_1(x_1), \dots, f_{i-1}(x_{i-1}), \\ & f_i(x_i), f_{i+1}(x_{i+1}), \dots, f_n(x_n)) = D_p(f_1(x_1), \dots, f_{i-1}(x_{i-1}), \\ & f_i(x_i), f_{i+1}(x_{i+1}), \dots, f_n(x_n)) = T(x_1, \dots, x_{i-1}, \\ & x_i, x_{i+1}, \dots, x_n), \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

Любая функция  $T(x_1, \dots, x_n)$  на  $L \times \dots \times L$  определяет на

$L_n$  отношений эквивалентности  $\rho_1, \dots, \rho_n$   $x_i \rho_i y_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), если для всех  $z_1, \dots, z_{i-1}, z_{i+1}, \dots, z_n \in L$   $T(z_1, \dots, z_{i-1}, x_i, z_{i+1}, \dots, z_n) = T(z_1, \dots, z_{i-1}, y_i, z_{i+1}, \dots, z_n)$ .

Пусть  $L = \cup_j L_{ij}$  ( $L_{ij} \cap L_{i'j} = \Lambda$ , если  $j_1 \neq j_2$ ) — разбиение множества  $L$  на классы эквивалентных между собой элементов по отношению к эквивалентности  $\rho_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

**Теорема 1.** Пусть трехзначная функция  $T(x_1, \dots, x_n)$  на  $L^{(n)}$  удовлетворяет условиям 1 и 2. Тогда множества  $N_i = \{L_{ij}\}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) классов  $\rho_i$ -эквивалентных между собой элементов имеют одну и ту же мощность. Взаимно однозначное соответствие между этими множествами устанавливается так: для фиксированного  $i$  каждому подмножеству  $L_{ij}$  сопоставляется такое подмножество  $L_{i'j}$ , что для некоторых элементов  $x_1 \in L_{i'1}, x_i \in L_{ij}, y_2, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n \in L$  выполняется равенство  $T(x_1, y_2, \dots, y_{i-1}, x_i, y_{i+1}, \dots, y_n) = 0$  (6).

Доказательство. Пусть  $x_1 \in L_{i'1}$ . В силу свойства 1 функций  $T(x_1, \dots, x_n)$  найдутся такие элементы  $x_2, \dots, x_n \in L$ , что

$T(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0$ . Если  $T(x_1, x_2, \dots, x'_i, \dots, x_n) = 0$  то ввиду свойства 2 для любых  $z_1, \dots, z_{i-1}, z_{i+1}, \dots, z_n \in$   
 $T(z_1, \dots, z_{i-1}, x_i, z_{i+1}, \dots, z_n) = T(z_1, \dots, z_{i-1}, x'_i, z_{i+1}, \dots, z_n)$   
 т. е.  $x_{i\rho_i}x_i$ .

Следовательно, соответствие  $L_{1t} \rightarrow L_{ij} (x_i \in L_{1t}, x_i \in L_{ij})$  определено корректно. В силу свойства 1 класс  $L_{ij}$  пробегает все множества  $N_i$ , когда класс  $L_{1t}$  пробегает множество  $N_1$ . Далее различным классам  $L_{1t}, L_{1s}$  соответствуют различные подмножества  $L_{ij}$ , ибо из равенства  $T(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = T(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots, x_n) = 0$ . В силу свойства 2 вытекает, что  $x_{i\rho_i}x_i$ .

Теорема доказана.

Согласно теореме 1 можно ввести такую нумерацию классов  $L_{ij}$ , что индекс  $j$  пробегает одно и то же множество  $M$  и для каждого фиксированного  $j \in M$  классы  $L_{1j}, L_{2j}, \dots, L_{nj}$  соответствуют друг другу (в силу теоремы 1):  $T(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$  тогда и только тогда, когда для некоторого  $j \in M$   $x_1 \in L_{1j}, \dots, x_n \in L_{nj}$ .

В дальнейшем мы будем предполагать, что классы  $L_{ij}$  занумерованы именно таким образом, не оговаривая это специально. Введем следующее  $n$ -арное отношение  $\rho^*$  на множестве  $N_1 = \{L_{ij}\}$ . Классы  $L_{1j_1}, L_{1j_2}, \dots, L_{1j_n} \in N_1$  находятся в отношении  $\rho^*$ , если для некоторых элементов  $x_1 \in L_{1j_1}, x_2 \in L_{2j_2}, \dots, x_n \in L_{nj_n}$  выполняется равенство  $T(x_1, \dots, x_n) = 0$  или  $T(x_1, \dots, x_n) = 1$ . Это определение корректно, так как в силу нахождения классов  $L_{ij}$  значение функции  $T(x_1, \dots, x_n)$  не изменяется, если  $x_i$  заменить любым элементом класса  $L_{ij}$ , содержащим этот элемент.

Введенное выше  $n$ -арное отношение  $\rho^*$  на множестве  $N_1 = \{L_{ij}\} = N$  позволяет найти на  $N \times \dots \times N$  трехзначную функ-

цию  $D_{\rho^*}$  согласно формуле (1). Определим  $n$  отображений  $f_1, \dots, f_n$  множества  $L$  на множество  $N$ :  $f_i(x) = L_{ij}$ , если  $x \in L_{ij} (i = 1, \dots, n)$  (7). Покажем, что имеет место формула

$$T(x_1, \dots, x_n) = D_{\rho^*}(f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)). \quad (8)$$

В самом деле, если  $T(x_1, \dots, x_n) = 0$ , то  $x_1 \in L_{1j_1}, \dots, x_n \in L_{nj_n}$  и, следовательно,  $D_{\rho^*}(f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)) = D_{\rho^*}(L_{1j_1}, \dots, L_{1j_n}) = 0$ . Пусть  $T(x_1, \dots, x_n) = 1$  и  $x_i \in L_{ij_i}$ .

Тогда согласно определению отношения  $\rho^*$  и формуле (7)  $D_{\rho^*}(f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)) = D_{\rho^*}(L_{1j_1}, \dots, L_{1j_n}) = 1$ . Пусть, наконец,  $T(x_1, \dots, x_n) = -1$  и  $x_i \in L_{ij_i}$ . Снова применяя определение отношения  $\rho^*$ , имеем  $D_{\rho^*}(f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)) = D_{\rho^*}(L_{1j_1}, \dots, L_{1j_n}) = -1$ , ибо классы  $L_{1j_1}, \dots, L_{1j_n}$  не находятся в отношении  $\rho^*$ . Это завершает доказательство формулы (8).

**Теорема 2.** Пусть  $T(x_1, \dots, x_n)$  — трехзначная функция, заданная на декартовой степени  $\underbrace{L \times \dots \times L}_n$  произвольного множе-

ства  $L$ . Функция  $T(x_1, \dots, x_n)$  тогда и только тогда представима в виде (3) (где  $\rho$  — рефлексивное  $n$ -арное отношение), когда  $T(x_1, \dots, x_n)$  удовлетворяет условиям 1 и 2.

**Доказательство.** Для трехзначной функции  $T(x_1, \dots, x_n)$ , удовлетворяющей условиям 1 и 2, нами выше установлена формула (8). В этой формуле  $\rho^*$  является рефлексивным  $n$ -арным отношением, что сразу вытекает из определения этого отношения. Теорема доказана.

Установим теперь условия, которым должна удовлетворять трехзначная функция  $T(x_1, \dots, x_n)$ , представимая в виде (3), где  $\rho$  —  $G$ -симметричное  $n$ -арное отношение ( $G$  — некоторая подгруппа симметрической группы  $S_n$ ).

Определим сначала, каким дополнительным условием должна удовлетворять функция  $T(x_1, \dots, x_n)$ , представимая в виде (2), где  $\rho$  — симметричное  $n$ -арное отношение.

**Теорема 3.** Трехзначная функция  $T(x_1, \dots, x_n)$  тогда и только тогда представима в виде (3) (где  $\rho$  — рефлексивное и симметричное  $n$ -арное отношение), когда она удовлетворяет условиям 1, 2 и следующему дополнительному условию:

3) Пусть  $T(x_{11}, x_{22}, \dots, x_{nn}) = 1$ .

$$\text{Если } T(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) = 0,$$

$$T(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}) = 0,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$T(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn}) = 0,$$

то для любой перестановки  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  чисел  $1, 2, \dots, n$   $T(x_{\alpha_1 1}, x_{\alpha_2 2}, \dots, x_{\alpha_n n}) = 1$ .

**Доказательство.** Установим сначала необходимость условия (3). Пусть имеет место формула (3), где  $\rho$  — симметричное  $n$ -арное отношение.

$$\text{Пусть } T(x_{11}, x_{22}, \dots, x_{nn}) = D_\rho(f_1(x_{11}), \dots, f_n(x_{nn})) = 1$$

$$\text{и } T(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) = D_\rho(f(x_{11}), \dots, f_n(x_{1n})) = 0,$$

$$T(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn}) = D_\rho(f_1(x_{n1}), \dots, f_n(x_{nn})) = 0.$$

$$\text{Тогда } f_1(x_{11}) = \dots = f_n(x_{nn}),$$

$$f_1(x_{21}) = \dots = f_n(x_{2n}),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$f_1(x_{n1}) = \dots = f_n(x_{nn}).$$

(9)

Пусть  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  — любая перестановка чисел  $1, 2, \dots, n$ . Учитывая свойство симметрии отношения  $\rho$  и формулы (9), имеем

$$1 = T(x_{11}, \dots, x_{nn}) = D_\rho(f_1(x_{11}), \dots, f_n(x_{nn})) =$$





**Теорема 4.** Трехзначная функция  $T(x_1, \dots, x_n)$ , тогда и только тогда представима в виде (3) (где  $\rho$  — рефлексивное и антисимметричное  $n$ -арное отношение), когда она удовлетворяет условиям 1, 2, 5, 6.

Доказательство. Необходимость условий теоремы была доказана выше. Достаточность доказывается аналогично теореме 3.

Таким образом, набор доказанных четырех теорем дает необходимые и достаточные условия для представимости предиката через предикат  $n$ -арного отношения.

Поступила в редколлегию 14.03.80.

УДК 621.391

Г. Ф. КРИВУЛЯ, канд. техн. наук, А. Н. КУЗНЕЦОВ  
**РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ  
И ДИАГНОСТИКИ**

Известны различные способы отображения случайного сигнала: временным дискретным рядом, путем квантования сигнала по амплитуде и времени, временным рядом значений изменения его основных параметров — амплитуды, частоты и фазы, а также с помощью параллельного и последовательного спектрального анализа.

Временной анализ сигналов — наиболее скоростной способ преобразования. Но полученные после преобразования численные значения требуют сложных алгоритмов обработки. Так, временной ряд, полученный в результате квантования сигнала по времени и амплитуде, подвергают обработке для определения его закономерностей. Такая обработка требует построения аппроксимирующих функций, которые обычно нелинейные и для их решения необходимо много вычислительного времени. Разработанный в настоящее время математический аппарат анализа временных рядов больше подходит для задач прогнозирования, чем для задач распознавания.

Спектральное преобразование сигнала с последовательным анализом дает выигрыш в аппаратуре и очень низкую достоверность каждого отдельного выборочного спектра сигнала. Здесь имеется в виду достоверность выборочного спектра, содержащего набор частот, по отношению ко всему спектру частот анализируемого сигнала. Формирование пространства характерных признаков по выборочным спектрам имеет тот существенный недостаток, что входящие в эти спектры частоты с течением времени будут изменяться. Только при достаточно длительном времени наблюдения и многократно повторенной анализируемой информации можно сформировать подлинный спектр сигнала, представляющий собой математический предел суммы выборочных спектров при неограниченном увеличении времени наблюдения  $T_{набд.}$

Спектральное преобразование сигнала с параллельным анализом лишено недостатков последовательного анализа (достоверность выборочного спектра) и может быть применено для формирования пространства характерных признаков сигнала. Однако ограничения, накладываемые на диапазон анализируемых частот при высокой разрешающей способности анализатора, не позволяют аппаратно просто построить такой анализатор. Кроме того, время анализатора частоты ограничено полосой пропускания.

Способ выявления скрытых периодичностей исследуемого сигнала для формирования пространства и его характерных признаков является самым приемлемым. Данный способ [1], согласно нашим исследованиям, давал хорошие результаты приближения исходного процесса к аппроксимирующей функции. Однако существенным недостатком его является неоднозначность выделяемых периодических составляющих для одного и того же сигнала, т.е. количество периодических составляющих и их период могут изменяться

в зависимости от поступающей информации для одного и того же сигнала. Это снижает достоверность распознавания. Кроме того, время машинной обработки алгоритма выделения периодических составляющих с учетом аппроксимации всех трех параметров сигнала (амплитуды, частоты и фазы) исчисляются десятками минут на цифровой ЭВМ ЕС-1022.

*Амплитудно-временное преобразование сигналов.* Авторами статьи разработано амплитудно-временное преобразование случайных сигналов [2, 3], которое уменьшает погрешность распознавания сигналов по сравнению с известными преобразованиями.

Рассмотрим амплитудно-временное преобразование синусоидального сигнала с начальной нулевой фазой  $U(t) = U_m \sin \omega t$ .

Диапазон изменения амплитуды сигнала разобьем на  $m$  равномерных уровней с приращением амплитуды на каждом уровне  $\Delta U$ . Тогда текущая амплитуда сигнала  $U(t)$  может быть выражена следующим образом:  $U(t) = j\Delta U$ , где  $j$  — текущий номер уровня ( $j=0, 1, 2, \dots, m-1$ ).

Временные интервалы  $\Delta t_j$ , измеренные между точками пересечения синусоиды с каждым уровнем, представляют время существования сигнала на каждом уровне. Нетрудно убедиться, что закон изменения временных интервалов является функцией, обратной исходной, и для данного примера — это  $\arcsin$ .

Обозначим приращение времени на  $j$ -м уровне  $\delta t_j$ . Тогда получим  $j\Delta U = m\Delta U \sin \omega \delta t_j$ , откуда  $\delta t_j = \frac{1}{\omega} \arcsin k_j$ , где  $k_j = \frac{j}{m}$  — коэффициент пропорциональности текущего номера уровня  $j$ .

Время существования сигнала на  $j$ -м уровне определим как разность значений полупериода сигнала и двух приращений времени, т. е.

$$\Delta t_j = \frac{\pi}{\omega} - 2\delta t_j = \frac{1}{\omega} (\pi - 2\arcsin k_j).$$

Из полученного соотношения видно, что временной интервал  $\Delta t_j$  является функцией частоты  $\omega$  и амплитуды  $U(t)$ , так как коэффициент  $k_j = \frac{U(t)}{m\Delta U}$ .

При постоянной частоте исходного синусоидального сигнала  $\omega = \text{const}$  значения  $\Delta t_j$  будут являться функцией амплитуды

$$U(t): \Delta t_j = \frac{c_j}{\omega_j}, \text{ где } c_j = \pi - 2\arcsin k_j.$$

В общем случае, когда частота сигнала изменяется, получим  $\Delta t_{ij} = \frac{c_j}{\omega_j}$ . Здесь  $\Delta t_{ij}$  — время существования сигнала, имеющего частоту  $\omega_j$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), измеренное на  $j$ -м уровне квантования ( $j=0, 1, 2, \dots, m-1$ ).

Измерив за определенное время с заданной точностью значения  $\Delta t_{ij}$ , получим матрицу  $A = \|\Delta t_{ij}\|$  размерностью  $n \times m$ . Столб-

цы матрицы  $A$  представляют собой значения, характеризующие изменение амплитуды и формы сигнала при постоянной частоте  $\omega_i$ . Строки матрицы  $A$  отражают наличие различных частот на определенном уровне.

Таким образом, в матрице  $A$  имеется информация о параметрах исходного сигнала. Эти параметры могут быть определены соответствующей обработкой полученных временных интервалов. При равномерном квантовании по уровню закон изменения временных интервалов в зависимости от номера уровня представляет собой функцию  $\arcsin$ .

Переходя от рассмотрения временной функции сигнала к функции времени существования сигнала по дискретным уровням амплитуды, т. е. выполнив преобразование временной функции сигнала  $U(t)$  в функцию изменения по уровням времени существования сигнала  $I_j(\Delta t_j)$ , построим пространство признаков исследуемого сигнала в виде дискретных значений, которые удобно использовать для обработки в цифровых ЭВМ.

*Пример формирования пространства признаков сигнала.* В качестве примера используем приведенные в [4] кривые осциллограмм мужских и женских голосов, полученные при произношении слова «шесть». Указанные графики сигналов проквантуем равномерно по амплитуде на 10 эталонных уровней, на каждом уровне измерим время существования сигнала, используя описанный выше принцип. Полученные числовые данные усредним. Усредненные значения  $\overline{\Delta t_j}$  по каждому уровню  $j$  нанесем на график  $U_j(\Delta t)$ .

Для иллюстрации характера изменения величин  $\overline{\Delta t_j}$  по уровням условно соединим их между собою. На рис. 1 показаны преобразованные в координатах  $U_j(\overline{\Delta t_j})$  кривые осциллограмм, взятые из [4]. Распознавать полученные в результате преобразования  $U(t) \rightarrow U_j(\overline{\Delta t_j})$  кривые значительно проще, чем исходные. Критериями различения будут являться средние значения величин временных интервалов  $\overline{\Delta t_j}$  на каждом уровне квантования и область задания этих величин  $2\varepsilon_j$ . На рис. 1 область задания  $2\varepsilon$  нанесена пунктирной линией. Эта область характеризует пространство признаков эталонных сигналов, причем слежение за всеми полученными значениями  $\overline{\Delta t_j}$  ведется по всем уровням одновременно. Выбор интервала  $2\varepsilon$  определяется на основании данных, полученных при обработке эталонных сигналов.

В данном примере граница интервала  $2\varepsilon$  определяется кривой 1 и 2, т. е. их максимальные и минимальные значения  $\overline{\Delta t_j}$  определяют границы интервала, зная априори, что эти кривые принадлежат одному классу сигналов.

Попадание отдельных значений  $\overline{\Delta t_j}$  неизвестного сигнала в область  $2\varepsilon$  не означает еще принадлежности этого сигнала к

данной области, а значит, и подобия его эталонному сигналу. Отношение числа  $\overline{\Delta t_j}$ , попавших в интервал  $2\varepsilon$ , к максимальному числу  $m$  характеризует коэффициент подобия исследуемого сигнала эталонному:  $\eta = N/m$ , где  $N$  — число средних значений временных интервалов  $\Delta t_j$  по уровням  $j$ , попавших в интервал  $2\varepsilon$ ;  $m$  — число уровней квантования;  $j=0, 1, 2, \dots, m-1$ .

Коэффициент подобия  $\eta$  изменяется в пределах  $0 \leq \eta \leq 1$ . Значению  $\eta=1$  соответствует полное подобие исследуемого

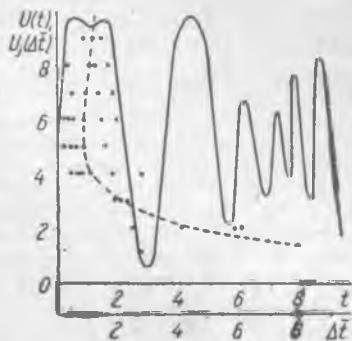
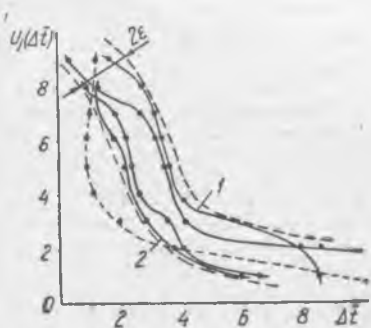


Рис. 1. Преобразованные осциллограммы

Рис. 2. Пример случайного сигнала

сигнала эталонному, значению  $\eta=0,5$  соответствует неопределенность распознавания. Таким образом, интервалу значений коэффициента подобия, равному  $0,5 < \eta \leq 1$ , эквивалентна принадлежность распознаваемого сигнала и эталонного одному классу, а интервалу значений этого коэффициента, равному  $0 < \eta < 0,5$ , — принадлежность разным классам. Численные значения коэффициента подобия (при прочих равных условиях) будут характеризовать величину погрешности распознавания, которая зависит от многих факторов, в частности, и от вида распознаваемого сигнала.

На рис. 2 показаны случайный сигнал  $U(t)$  и полученная условная кривая преобразования этого сигнала в координатах  $U_j(\Delta t_j)$ . Данная кривая нанесена и на рис. 1 при соблюдении единого масштаба обоих рисунков (1 и 2). Как видно из рис. 1, этот сигнал не подобен сигналам, определяемым областью  $2\varepsilon$ , поскольку его коэффициент подобия  $\eta < 0,5$ . Структура сигнала определяет погрешность распознавания. Так как описанный способ предполагает усреднение величин  $\Delta t_j$ , то при этом сглаживается информация об изменении временных интервалов во времени, что является его недостатком. Поэтому те сигналы, которые классифицированы как одинаковые по усредненным  $\overline{\Delta t_j}$ , могут быть разными, например, по структуре чередования всплесков амплитуды.

Однако на практике распознающие системы создаются, как правило, для определенного, конечного числа распознаваемых классов сигналов (диагностические системы в медицине, системы контроля и диагностики радиоэлектронных устройств, диагностика машин и механизмов и др.). Техническое устройство затруднительно обучить на ограниченном пространстве признаков тонкому механизму распознавания любых сигналов. В этой связи представляется целесообразным использование таких простых методов построения пространства признаков (как описанный выше), которые в сочетании со статистическим методом обработки результатов распознавания могут дать хороший эффект для конкретных задач.

**Список литературы:** 1. Серебренников М. Г., Первозванский А. А. Выявление скрытых периодичностей. — М.: Наука, 1965.—244 с. 2. Кривуля Г. Ф., Кузнецов А. Н., Кузьменко А. Г. А. с. 568963 (СССР). Способ распознавания речевого сигнала. — Опул. в Б. И., 1977, № 30, с. 127. 3. Кривуля Г. Ф., Кузнецов А. Н., Кузьменко А. Г. А. с. 657454 (СССР). Способ распознавания речевого сигнала. — Опул. в Б. И., 1979, № 14, с. 210. 4. Логинов В. М., Цепков Г. В., Чинаев П. И. Экономичное кодирование. — Киев: Техника, 1976.—176 с.

Поступила в редколлегию 05.03.81.

УДК 510.62

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

#### О МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН СРЕДСТВАМИ ТЕОРИИ ИНТЕЛЛЕКТА

Формальный и приборный аппарат теории интеллекта [1, 2] пригоден не только для математического описания и схемной реализации функций человеческого интеллекта. С его помощью можно описывать и воплощать в действующие приборы также функции машинного интеллекта, т. е. операции, выполняемые цифровой вычислительной машиной. В статье математически описываются и приборно реализуются в виде переключаемых цепей простейшие операции вычислительных машин, которые принято называть элементарными [3].

Целесообразность подобных разработок определяется следующими обстоятельствами. Описание и реализация элементарных операций вычислительных машин демонстрирует возможности аппарата теории интеллекта, расширяет сферу его применения на новую область. Далее, новый способ формального описания элементарных операций в ряде случаев оказывается более компактным, обозримым и удобным для разработчика вычислительных машин, чем те методы, которыми он пользовался до сих пор.

Кроме того, переход от полученных описаний к приборной реализации в некоторых случаях приводит к новым, неизвест-

ным еще схемным вариантам, интересным для практики. Наконец, средствами теории интеллекта легко описывается и приборно реализуется обобщенный буквенный вариант элементарных операций. При этом варианте операции производят не над двоичными кодами, как это обычно имеет место в ЭВМ, а над словами, составленными из букв произвольного конечного алфавита.

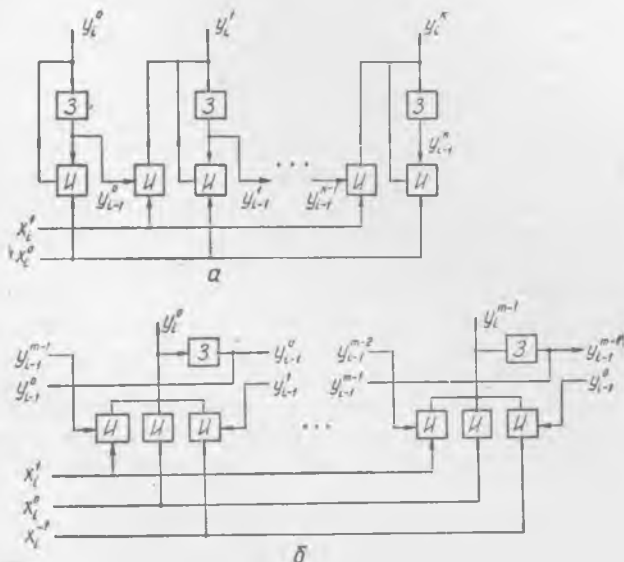


Рис. 1. Схемы счетчиков

Некоторые элементарные операции — сложение и вычитание чисел, шифровка и дешифровка слов — были рассмотрены ранее [4, 5]. В данной статье рассматривается операция счета, а также операции сравнения и сдвига слов. Опишем средствами теории интеллекта работу счетчика двоичных сигналов с единичным кодированием. Пусть  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — двоичные цифры 0 или 1;  $y$  — их сумма, принимающая значения из множества символов  $\{0, 1, 2, \dots, n\}$ . Имеем  $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$  (1). Введем промежуточные суммы  $y_i = x_1 + x_2 + \dots + x_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) (2) и запишем с их помощью равенство (1) в виде системы равенств  $y_i = y_{i-1} + x_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) (3).

В первом из них фигурирует переменная  $y_0$ , которую следует приравнять нулю:  $y_0 = 0$  (4). Переменную  $y_n$  отождествляем с суммой  $y$ . На языке алгебры конечных предикатов равенства (3), (4) запишем соответственно в виде условий  $x_i^1 y_{i-1}^{j-1} \vee x_i^0 y_{i-1}^j = y_i^j$  ( $1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n$ ) (5),  $y_0^0 = 1, y_0^1 = y_0^2 = \dots = y_0^n = 0$  (6).

В выражениях (5) фигурируют узавания вида  $y_{i-1}^{-1}$ , которые должны быть приравнены к нулю:  $y_0^{-1} = y_1^{-1} = \dots = y_{n-1}^{-1} = 0$  (7).

Реализация системы уравнений (5)–(7) в виде конечного автомата приводит к схеме счетчика, представленного на рис. 1, а. В качестве начального состояния автомата должно быть принято  $y_0 = 0$ , т. е.  $y_0^0 = 1$ ,  $y_0^1 = y_0^2 = \dots = y_0^n = 0$ . На вход схемы в моменты времени  $1, 2, \dots, n$  последовательно подаются двоичные слагаемые  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . На выходе схемы в те же моменты времени появляются промежуточные суммы  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . По прошествии  $n$  тактов с момента включения счетчика на его выходе формируется искомая сумма  $y$  в виде числа  $y_n$ . Перед началом работы счетчика его память должна быть приведена в начальное состояние  $y_0 = 0$ . Счетчик может быть использован, помимо своего прямого назначения, в качестве датчика управляющих импульсов. В этом случае должно быть принято  $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 1$ , что соответствует подаче на вход счетчика серии из  $n$  следующих друг за другом импульсов.

Аналогичным образом может быть описано функционирование кольцевого реверсивного счетчика, формирующего сумму  $y_n = a + x_1 + x_2 + \dots + x_n \pmod{m}$  (7'). Здесь  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — троичные слагаемые, принимающие значения  $-1, 0, 1$ ;  $a$  — начальное показание счетчика;  $y_n$  — конечное показание счетчика после  $n$  тактов его работы. Показания счетчика могут изменяться в пределах от  $0$  до  $m-1$ . Введем промежуточную сумму

$$y_i = a + x_1 + x_2 + \dots + x_i \pmod{m}, \quad (1 \leq i \leq n), \quad (8)$$

которую показывает счетчик в произвольный  $i$ -й момент дискретного времени. Запишем равенство (7) в форме  $y_i = y_{i-1} + x_i \pmod{m}$ ,  $(1 \leq i \leq n)$  (9), полагая  $y_0 = a$  (10). На языке алгебры конечных предикатов уравнения (9), (10) запишутся в виде условий

$$x_i^1 y_{i-1}^{-1 \pmod{m}} \vee x_i^0 y_{i-1}^1 \vee x_i^{-1} y_{i-1}^{1 \pmod{m}} = y_i^1, \quad (11)$$

где  $1 \leq i \leq n$ ,  $0 \leq j \leq m-1$ , и условий

$$y_0^0 = 0, \quad y_0^1 = 0, \quad \dots, \quad y_0^{a-1} = 0, \quad y_0^a = 1, \quad y_0^{a+1} = 0, \quad \dots, \quad y_0^{m-1} = 0. \quad (12)$$

Схема кольцевого реверсивного счетчика, построенного по формулам (11), показана на рис. 1, б. Перед запуском счетчика в него вводится начальное показание  $y_0 = a$  согласно условиям (12).

Опишем теперь операцию сравнения на совпадение двух слов  $x_1 x_2 \dots x_n$  и  $y_1 y_2 \dots y_n$ , составленных из букв алфавита  $\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ . Эта операция может быть задана предикатом  $(x_1 \approx y_1)(x_2 \approx y_2) \dots (x_n \approx y_n) = t$  (13). При совпадении слов предикат принимает значение  $t = 1$ , при несовпадении — значение  $t = 0$ . Чтобы реализовать эту операцию в виде автомата, введем

вспомогательные логические переменные  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , определяемые следующими рекуррентными соотношениями:

$$t_{i-1} (x_i^{a_i} y_i^{a_i} \vee x_i^{a_i} y_i^{a_i} \vee \dots \vee x_i^{a_k} y_i^{a_k}) = t_i, \quad (1 \leq i \leq n). \quad (14)$$

Полагая  $t_0 = 0$ , имеем  $t = t_n$ . По формулам (14) на рис. 2, а построен автомат, устанавливающий за  $n$  тактов работы равенство или неравенство двух слов длины  $n$ . В начальный момент вре-

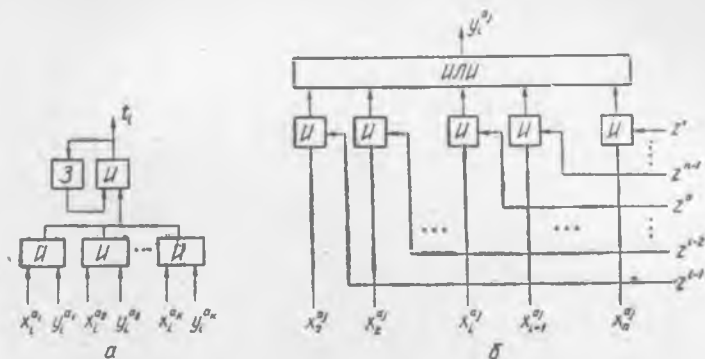


Рис. 2. Автомат определения равенства слов

мени  $i = 0$  автомат должен находиться в состоянии  $t_0 = 0$ . Буквы сравниваемых слов, представленные узнаваниями  $x_i^{a_i}$  и  $y_i^{a_i}$ , поступают поочередно на входе автомата в моменты времени  $i = 1, 2, \dots, n$ . Сигнал  $t_n$ , возникающий на выходе автомата в момент времени  $n$ , указывает на совпадение ( $t_n = 1$ ) или несовпадение ( $t_n = 0$ ) слов  $x_1 x_2 \dots x_n$  и  $y_1 y_2 \dots y_n$ .

Перейдем к описанию операции циклического сдвига слова  $x_1 x_2 \dots x_n$ , составленного из букв алфавита  $a_1, a_2, \dots, a_k$ . Сдвиг осуществляется на  $z$  позиций вправо, в результате получаем слово  $y_1 y_2 \dots y_n$ . Переменная  $z$  может принимать значения  $0, 1, \dots, n-1$ . В неявном виде операцию циклического сдвига запишем следующим образом:

$$(x_1 \approx y_1)(x_2 \approx y_2) \dots (x_n \approx y_n) z^0 \vee (x_n \approx y_1)(x_1 \approx y_2) \dots (x_{n-1} \approx y_n) z^1 \vee \dots \vee (x_2 \approx y_1)(x_3 \approx y_2) \dots (x_1 \approx y_n) z^{n-1} = 1. \quad (15)$$

Явное описание этой же операции:

$$x_1^{a_1} z^{i-1} \vee x_2^{a_2} z^{i-2} \vee \dots \vee x_i^{a_i} z^0 \vee x_{i+1}^{a_{i+1}} z^{n-1} \vee \dots \vee x_n^{a_n} z^i = y_i^{a_i}. \quad (16)$$

Здесь индекс  $i$  изменяется в пределах от 1 до  $n$ , а индекс  $j$  — в пределах от 1 до  $k$ . Сдвигатель слова представляет собой устройство, состоящее из  $kn$  однотипных схем. Схема, формирующая узнавание  $y_i^{a_i}$  для  $i$ -й по счету буквы  $y_i$  выходного слова, показана на рис. 2, б. Для построения сдвигателя слова при

потенциальном представлении сигналов требуются  $3kn^2$  диодов. При импульсном представлении сигналов требуются  $2kn^2$  диодов, поскольку все блоки разделения в сдвигателе можно заменить узлами.

Можно построить сдвигатель в виде автомата, осуществляющего сдвиг слова  $x_1x_2x_n$  последовательно во времени за  $n$  тактов. В момент времени  $t$  на выходных клеммах автомата фор-

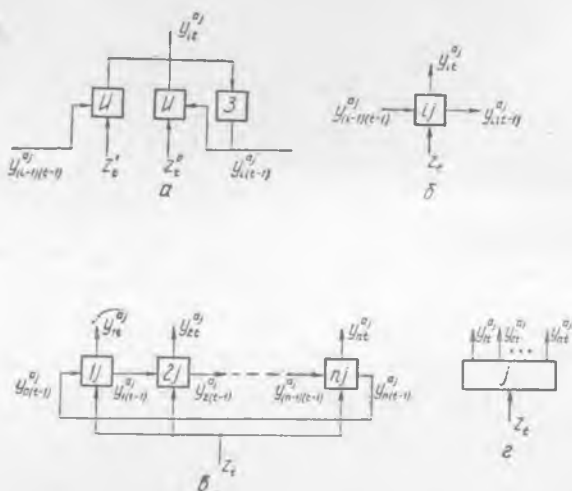


Рис. 3. Компоненты автомата циклического сдвига слова вправо

мируется слово  $y_{1t}y_{2t} \dots y_{nt}$ . При  $t = n$  автомат формирует слово  $y_{1n}y_{2n} \dots y_{nn}$ , которое принимается в качестве выходного слова  $y_1y_2 \dots y_n$  преобразования сдвига. В отдельном  $i$ -м такте слово либо вовсе не сдвигается (при  $z_i = 0$ ), либо сдвигается на один разряд вправо (при  $z_i = 1$ ). Процесс сдвига на  $i$ -м такте может быть описан равенствами

$$y_{i(t-1)}^a z_t^0 \vee y_{(i-1)(t-1)}^a z_t^1 = y_{it}^a, \quad (17)$$

где  $1 \leq i \leq n$ ,  $1 \leq j \leq k$ .

Каждому из этих равенств при фиксированных  $i$  и  $j$  соответствует блок, изображенный на рис. 3, а. На рис. 3, б указано условное изображение того же блока. На рис. 3, в изображена батарея, состоящая из  $n$  таких блоков, которая формирует узнавания  $\zeta$  показателем  $a_j$  для всех букв выходного слова. Условное обозначение этой батареи приведено на рис. 3, г. При построении батареи дополнительно принято  $y_{0(t-1)}^a = y_{n(t-1)}^a$  (18).

Сдвигатель в целом получаем, собирая все батареи в единую схему (рис. 4). В момент времени  $t=0$  на сдвигатель в виде его начального состояния вводится входное слово  $x_1x_2 \dots x_n$

(ввод условно показан пунктиром). Выходное слово  $y_1y_2...y_n$  формируется сдвигом на его выходных клеммах в момент времени  $t=n$  в виде слова  $y_{1n}y_{2n}...y_{nn}$ . Число разрядов, на которое производится сдвиг слова, регулируется числом единиц в двоичном коде  $z_1z_2...z_n$ . Сдвигатель описанного типа требует для своего построения  $4kn$  диодов, что в  $0,5n$  раз меньше, чем в предыдущей схеме (в импульсном исполнении). Платой за это упрощение служит введение в схему  $kn$  элементов задержки на один такт и увеличение времени сдвига в  $n$  раз.

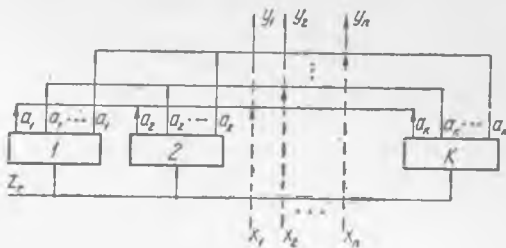


Рис. 4. Автомат циклического сдвига вправо

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О теории интеллекта.—Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 3—11. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О переключательных цепях теории интеллекта.—Проблемы бионики, 1980, вып. 25, с. 11—18. 3. Рабинович З. Л. Элементарные операции в вычислительных машинах.—Киев: Техніка, 1966.—303 с. 4. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О моделировании арифметических операций.—Проблемы бионики, 1981, вып. 26, с. 49—53. 5. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О моделировании алфавитных операторов средствами теории интеллекта.—Проблемы бионики, 1981, вып. 26, с. 3—10.

Поступила в редколлегию 29.02.80.

УДК 612.82.014.42.001.57

Г. А. КОЛОТЕНКО, Т. И. АХМЕДОВ, канд. мед. наук

#### К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИНХРОННЫХ СВЯЗЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

В современной нейробионике и нейрокибернетике общепризнанным является положение о том, что детерминистские модели головного мозга (типа схемы регуляции в нейронных сетях, предложенной Макколлоком и Питтсом) не оправдывают себя вследствие подчеркнутой схоластичности устройства мозга [1].

Одним из принципиальных новых подходов к конструированию искусственных систем автоматического управления является разработка бионических устройств и систем, которые по эффективности, надежности, структурной и функциональной пластичности и экономичности могли бы воспроизводить пространственно-временные синхронные и асинхронные свойства биоэлектрической активности целостности головного мозга [2]. «Мозг в аспекте модели можно рассматривать как в высшей

степени специализированный вычислитель сходства и различия образов внешнего мира» [3].

Цель статьи — распознать функциональное состояние операторов АСУ путем кибернетического анализа структуры иерархических систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга конъюнктивным методом.

Исследовались ЭЭГ практически здоровых лиц в возрасте 18—36 лет в состоянии относительного покоя (фоновая ЭЭГ, функциональная проба — закрытые глаза), при аутоуггестии покоя и ритмической фотостимуляции (ФС) частотой 8 Гц. Регистрация ЭЭГ производилась по международной системе. ЭЭГ волны считывались с выхода десятиканального электроэнцефаллографа фирмы «Альвар». Применялась одна из модификаций многоканального устройства для количественного анализа множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. По этой модификации считываются системы пространственно-временных связей головного мозга по каждому каналу автономно, фиксируя диахронные или асинхронные связи, а также вариабельно в сочетаниях  $c_8^1, c_8^2, \dots, c_8^8$ , реализуя при помощи логических элементов «И» изохронные, синхронные связи головного мозга.

Проанализируем множества дифференцируемых систем совмещенных синхронных связей головного мозга диффузных иерархических структур.

Экспериментально установлено, что для кортежа систем совмещенных синхронных связей  $H_{36,56}^5$  октавных структур характерно наличие зон регистрации левой  $s$  стороны. Для подмножества систем совмещенных синхронных связей  $H_{36,41}^5$  заметно доминирование структур  $s$  стороны с подключением в некоторых подмножествах систем совмещенных синхронных связей  $H_{42,49}^5, H_{51,54}^5$  двух или одного  $H_{50}^5, H_{55,56}^5$  участка правой  $D$  стороны, кроме  $F_d$ .

Четкая дифференциация функциональных состояний производится по перемещению центров тяжести  $\mu$  и изменению весовых пространственных пульсаций (по данным среднеквадратических отклонений  $\delta$ ) систем совмещенных синхронных связей головного мозга  $H_{47,48}^5, H_{54}^5, H_{56}^5$ .

Системы совмещенных синхронных связей  $T_d - p_d - F_s - T_s - p_s (H_{47}^5), T_d - p_d - F_s - o_s - p_s (H_{48}^5)$  при одном функциональном состоянии имеют одинаковые центры тяжести  $\mu$  и почти равные  $\delta$ . В случае различных функциональных состояний максимальный центр тяжести наблюдается в период фона  $\sup \mu_{\Phi} = 6$  бит, минимальный — в период ФС 8 Гц  $\inf \mu_{\Phi} = 3$  бит, т. е. перепад в два раза. Весовая импульсация системы совмещенных синхронных связей  $H_{47}^5$  характеризуется в период фона  $\sigma_{\Phi} =$

$= 15,9$  бит, ауто­суг­гес­тии по­коя  $\sigma_n = 6$  бит, ФС 8 Гц  $\sigma_{\text{фс}} = 1,81$  бит. Как видно, ге­совое расхожде­ние системы свя­зей го­ловного мозга по коэф­фи­циенту сравне­ния  $k_c = \sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{фс}} = 8,78$ , ауто­суг­гес­тии по­коя и ФС 8 Гц  $k_c = \sigma_n/\sigma_{\text{фс}} = 3,33$ . Система сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{47}^5$  фона и ФС 8 Гц диф­фе­рен­циру­ется по коэф­фи­циенту вариации  $v$  в 4,5 раза,  $k_c = v_{\text{ф}}/v_{\text{фс}} = 4,42$ . При коэф­фи­циенте вариации  $v_n = 265$  бит (ха­рак­те­ри­зую­щем со­сто­я­ние опе­ра­то­ров АСУ), опре­де­ляе­мого ауто­суг­гес­тией по­коя, коэф­фи­циент вариации  $v_{\text{фс}}$  пе­ри­ода ФС 8 Гц по коэф­фи­циенту сравне­ния от­ли­ча­ется в 2,5 раза ( $k_c = v_n/v_{\text{фс}} = 2,52$ ). Отно­си­тель­ная ошиб­ка ЭЭГ фона  $m_{\text{ф}} = 4,5$  бит в 9 раз боль­ше, чем при ФС 8 Гц ( $m_{\text{фс}} = 0,55$  бит).

Для системы сов­мещенных синхронных свя­зей  $o_d - p_d - T_s - o_s - p_s$  ( $H_{54}^5$ ) ха­рак­терны:  $\mu_{\text{ф}} = 13$  бит,  $\mu_n = 9$  бит,  $\mu_{\text{фс}} = 10$  бит. При  $\sigma_{\text{ф}} = 30$  бит  $K_c = \sigma_{\text{ф}}/\sigma_n = 2,26$ ,  $k_c = \sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{фс}} = 2,48$ . В то время как  $k_c = v_{\text{ф}}/v_{\text{фс}} = 1,93$ ,  $k_c = v_{\text{ф}}/v_n = 1,57$ . В связи с этим  $m_{\text{ф}} = 8,6$  боль­ше в два раза, чем относительные ошибки в пе­ри­од ауто­суг­гес­тии по­коя  $m_n = 4,02$  бит и ФС  $m_{\text{фс}} = 4,03$  бит.

Система сов­мещенных синхронных свя­зей  $p_d - F_s - T_s - o_s - p_s$  ( $H_{56}^5$ ) при раз­лич­ных функ­ци­ональ­ных со­сто­я­ниях имеет сле­дую­щие па­ра­метры:  $\sigma_{\text{ф}} = 22,1$  бит,  $\sigma_n = 13,66$  бит,  $\sigma_{\text{фс}} = 6,91$  бит, т. е. система свя­зей в пе­ри­од фона в три раза боль­ше, чем при ФС 8 Гц ( $k_c = \sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{фс}} = 3,2$ ). Схожде­ние весов системы сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{56}^5$  в пе­ри­од ауто­суг­гес­тии по­коя почти в два раза мень­ше, чем при ФС 8 Гц ( $K_c = \sigma_n/\sigma_{\text{фс}} = 1,98$ ). На­и­бо­лее ста­биль­ными (жесткими) свя­зя­ми ха­рак­те­ри­зу­ется система  $H_{56}^5$  при ФС 8 Гц.

В кор­те­же систем сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{36,56}^5$  ори­ги­наль­но диф­фе­рен­циру­ема система  $H_{36}^5$ :  $\sigma_{\text{ф}} = 15,2$  бит,  $\sigma_n = 2,19$  бит, т. е. система сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{36}^5$  фона по сравне­нию с ауто­суг­гес­тией по­коя расхо­дится по ве­су в 7,12 раза и в 0,28 раза по сравне­нию с ФС 8 Гц. Коэф­фи­циент вариации фона  $v_{\text{ф}} = 260$  бит, в пе­ри­од ауто­суг­гес­тии по­коя  $v_n = 44$  бит, в ре­зуль­та­те чего система сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{36}^5$  фона от­диф­фе­рен­циру­ется от ве­са этой же системы в пе­ри­од ауто­суг­гес­тии по­коя почти в 6 раз ( $k_c = v_{\text{ф}}/v_n = 5,9$ ). При раз­лич­ных функ­ци­ональ­ных со­сто­я­ниях относительные ошибки от­ли­ча­ются друг от друга в два раза.

При ки­бер­нетическом анализе кор­те­жа систем сов­мещенных синхронных свя­зей  $H_{1,35}^5$  диф­фе­рен­циру­ются системы  $H_{23}^5$ ,  $H_{33}^5$ : центр тя­же­сти в пе­ри­од ауто­суг­гес­тии по­коя  $\mu_n = 1$  бит, ФС 8 Гц  $\mu_{\text{фс}} = 8$  бит. Диф­фе­рен­циру­емых систем сов­мещенных синхронных свя­зей по ве­су сред­не­квад­ратических от­кло­не­ний не имеет­ся ( $\sigma_n = \sigma_{\text{фс}} = 1,5 - 2,5$ ). Диапазон раз­броса ве­са коэф­фи­циента вариации огра­ни­чен пре­де­лами:  $\sup v = 150$  бит,  $\inf v = 80$  бит. Система сов­мещенных синхронных свя­зей осо­бенно

ярко дифференцируется по коэффициенту вариации в периоды фона и ФС 8 Гц ( $k_c = v_{\Phi}/v_{\Phi c} = 3,49$ ).

Кибернетический анализ подмножеств систем совмещенных синхронных связей  $H_{47,48}^5$ ,  $H_{54}^5$  показывает следующее. Для этих систем пространственно-временных совмещенных синхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях сохраняются стабильные пространственно-временные отношения между обеими сторонами. В системе совмещенных синхронных связей головного мозга  $H_{56}^5$  левосторонние пространственно-временные «архитектоники» подключают  $p_d$ .

Множества и подмножества систем совмещенных синхронных связей головного мозга шестикомпанентных структур развивают те же направленности весов, что и подсистемы совмещенных синхронных связей головного мозга локальных структур.

При гомоморфном моделировании установлено, что в случае совмещения систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга этого структурного типа вес структурной компоненты  $o_d$  системы совмещенных связей  $T_d - T_s - o_s - p_s - p_d - o_d$ , отложенный по оси  $\sigma_{o_d}$ , перекрывается большим весом той же структурной компоненты системы совмещенных синхронных связей  $o_d - F_s - T_s - o_s - p_d - o_d$ . В соответствии с дизъюнкцией производится объединение компонент  $F_s$ ,  $T_d$  с составной частью структуры  $o_d - p_d - p_s - o_s - T_s$ . В результате формируется структура, идентичная системе совмещенных синхронных связей головного мозга и семикомпанентной структуре. Так, при гомоморфном моделировании веса иерархических систем и подсистем совмещенных синхронных связей головного мозга выявляется трансформация структур пространственно-временных связей головного мозга.

Кортеж систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,21}^6$ , включающих в структурный состав компоненту  $F_d$ , имеет максимальный центр тяжести  $\sup \mu = 4$  бит, минимальный  $\inf \mu = 1$  бит, что по диапазону перемещения центров тяжести систем совмещенных синхронных связей головного мозга ниже, чем систем совмещенных синхронных связей головного мозга октавных структур  $H_{1,35}^5$ . Билатеральная асимметрия веса систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,21}^6$ ,  $H_{22,28}^5$  выражена соответствующей пропорцией с такой же направленностью, как и для систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,35}^5$ ,  $H_{36,56}^5$ . Для подмножества систем совмещенных синхронных связей  $H_{22,28}^5$  максимальный центр тяжести  $\sup \mu = 6$  бит, минимальное отклонение центра тяжести этих систем совмещенных синхронных связей головного мозга  $\inf \mu = 36$  бит, что на полтора—два порядка выше, чем для кортежа систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,21}^6$ , и на столько же ниже по сравнению с кортежем систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,35}^5$ . Весовое расхождение систем сов-

мещенных синхронных связей головного мозга в этом случае свидетельствует о наличии билатеральной асимметрии пространственно-временных связей головного мозга между сторонами. Для кортежа систем совмещенных синхронных связей  $H_{22,28}^6$  среднее квадратическое отклонение в среднем равно  $\sigma_{cp} = 10$  бит. Для систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,21}^6$   $\sigma_{cp} = 5$  бит. Высокий коэффициент вариации у систем совмещенных синхронных связей головного мозга  $H_{22,28}^6$ ,  $H_4^6$ ,  $H_{11}^6$ . Вес относительных ошибок кортежа систем совмещенных синхронных связей  $H_{22,28}^6$  в 1,5—2 раза больше, чем у систем совмещенных синхронных связей головного мозга.

Если по структурной иерархии перейти в область систем совмещенных синхронных связей головного мозга локальных структур, то обнаружится, что четче дифференцируются системы совмещенных синхронных связей головного мозга, в состав которых не включены  $F_d$  независимо от иерархии. Система совмещенных синхронных связей  $T_d - o_d - p_d - T_s - o_s - p_s (H_{25}^6)$ , симметрично включающая зоны регистрации обеих сторон, при различных функциональных состояниях отличается в 1,5—3 раза.

Система совмещенных синхронных связей  $o_d - p_d - F_s - T_s - o_s - p_s (H_{28}^6)$  при аутоподсказке покоя и фотостимуляции 8 Гц имеет равные центры тяжести  $\mu_n = \mu_{фс} = 4$  бит, отличимые почти в два раза среднее квадратическое отклонения  $\sigma_n = 11,8$  бит,  $\sigma_{фс} = 5,14$  бит. При сравнении с фоновой ЭЭГ наблюдаются следующие дифференцируемые параметры:  $k_c = \sigma_{ф}/\sigma_n = 1,48$ ,  $k_c = \sigma_{ф}/\sigma_{фс} = 3,4$ ,  $k_c = \sigma_n/\sigma_{ф} = 2,3$ . Коэффициент вариации в периоды фона и аутоподсказки покоя равны  $v_{ф} = v_n = 292$  бит. По коэффициенту сравнения коэффициенты вариации веса системы совмещенной синхронной связи  $H_{28}^6$  в период аутоподсказки покоя и ФС 8 Гц отличаются почти в три раза ( $k_a = v_n/v_{фс} = 2,29$ ). Для этой же системы связей относительные ошибки отличаются в 1,5—3 раза.

Системы совмещенных синхронных связей головного мозга семикомпонентных структур при восьмиканальной регистрации ЭЭГ имеют граничную выраженность пространственно-временной фронтально-окципитальной (особенно для Д стороны) и билатеральной асимметрий, что заметно при сравнении кортежа систем совмещенных синхронных связей  $H_{1,7}$ ,  $H_8$ . Наиболее благоприятное психофизиологическое воздействие (аутоподсказка покоя) увеличивает расхождение веса систем совмещенных синхронных связей головного мозга, главным образом левой стороны.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что переход от одного функционального состояния организма операторов автоматизированных систем управления к другому сопровождается сменой иерархических систем и подсистем

совмещенных синхронных связей головного мозга, их структур и вариативной направленности пространственно-временных отношений. Эвристическая программа системного нейрокибернетического анализа пространственно-временных свойств биоэлектрической активности головного мозга предусматривает набор алгоритмов, построенных в соответствии с изменениями, вызванными целенаправленными возмущениями. Валидность эвристических программ нейрокибернетического анализа переменных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга может быть доказана повышением эффективности эргатической системы. Сопряжение с агрегатными системами вычислительной техники множества дифференцируемых иерархических систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга оператора АСУ позволит независимо от осознания им возмущений управлять ими. Эту сеть связей между плоскостями возмущений и плоскостью окликов эргатической системы можно представить, как звено системы управления, решающее интеграции остальных звеньев эргатической системы. Оно может быть автоматически контролируемо и управляемо.

Таким образом, появляется возможность реализации гомеостатического принципа эргатической системы при помощи прямых и обратных связей, устанавливающих в подсистеме плоскостей факторов и множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Корректирование гомеостаза и разработка эшбивских «мозгоподобных» машин с этой целью пока что не нашли практического применения. Чтобы вскрыть механизм взаимосвязи между целенаправленными возмущениями множества дифференцируемых систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, требуется кропотливое изучение разнообразия этих систем связей во всем их сходстве и различии, случайной единичности и множественно-целостности.

Множества систем переменных пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга отрицательной и положительной полярности находятся в устойчивом неравновесии. Генерация и регенерация множества систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга, отображающие противоположные эквиваленты, находятся в неразрывном единстве, в единстве целостного. Процесс генерации  $i(t)$ , «взаимопроникая», как бы управляет процессом регенерации  $j(t)$  систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга иерархических структур, который, по обратной связи (в результате взаимовлияния) управляет процессом  $i(t)$ . Поэтому множество систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга циклично, замкнуто, роторно и одновременно с этим по определенным

«степеням свободы» разомкнуто и универсально приспособляемо. Процессы генерации и регенерации множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга вместе с этим в силу превалирования тех или иных процессов, вызывающих дополнительное развитие систем связей определенных структур, обуславливают (как это видно из экспериментального материала) неустойчивое неравновесие подмножеств систем даже признаков однородного вариационного ряда, находящегося в цепи иерархических рангов.

Рассмотрим квазирегулярную модель регенерации системы связей головного мозга. Пусть непрерывная функция развития системы пространственно-временных связей головного мозга обозначает количество структурных компонент дифференцируемой системы связей головного мозга в момент  $t$ . Если количество генерируемых связей системы за  $dt$  уменьшится, то образуется равенство  $\Delta x(t) = -\lambda x(t) \Delta t$ ,  $\lambda > 0$ , где  $\lambda$  — плотность потока аналогичных связей регенерации наблюдаемых в процессе преобразования при переходе от предыдущего момента к последующему. Отсюда  $dx(t)/dt = -\lambda x(t)$ .

При  $x(0) = x_0 > 0$  уравнение имеет вид  $x(t) = x_0 t^{-\lambda t}$ . В предельном случае (при  $t \rightarrow \infty$ ) число связей системы изменится от  $x_0$  до 0, т. е. система связей головного мозга регенерирует, наступает существенный момент.

Вероятную гомоморфную модель иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга при переходе от одного момента времени к другому, когда система характеризуется числом связей  $x > 0$  и вероятность регенерации хотя бы одной структурной связи за интервал времени  $(t, t + \Delta t)$  равна  $\lambda x \Delta t + O(\Delta t)$ , можно выразить уравнением  $p_x(t + \Delta t) = (1 - \lambda x \Delta t) p_x(t) + \lambda(x + 1) p_{x+1}(t)$ .

При  $\Delta t \rightarrow 0$  система связей головного мозга характеризуется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp_x(t)}{dt} = -x p_x(t) + \lambda(x + 1) p_{x+1}(t).$$

Квазирегулярная модель множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, учитывая случайные изменения количества связей системы при переходе от одного момента к другому описывает среднее число пространственно-временных отношений целостно-го мозга.

Система синхронных и асинхронных связей головного мозга переходит из одного функционального состояния к другому, если происходит структурное, весовое, переменное изменение. При этом процессы генерации и регенерации иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга аппроксимируются, так как плотность

потока  $\lambda$  связей головного мозга не зависит от числа связей системы. Аналог такой квазирегулярной модели кибернетически анализируемой системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга можно выразить алгоритмом  $p(t) = x_i(t)/N$ , где  $x_i(t)$  — среднее число связей системы в  $i$ -м состоянии;  $N$  — общее число пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга.

При кибернетическом анализе множества иерархических систем синхронных и асинхронных связей головного мозга на одном уровне биоэлектрической активности целостного мозга переход от одной системы пространственно-временных связей к другой зависит от длительности импульсов на этом уровне активности и, возможно, крутизны фаз ЭЭГ волн.

Для пуассоновского перехода системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга за бесконечно малый интервал времени  $dt$  система связей, находясь в состоянии  $i$ , совершает переход в состояние  $j$  с вероятностью  $\lambda_{ij}dt$  ( $i \neq j$ ). Допустимость того, что система пространственно-временных связей головного мозга находится в состоянии  $i$  в момент  $t$ , можно назвать вероятностью состояния  $p_i(t)$  системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. В момент  $t$  система пространственно-временных связей головного мозга может находиться в состоянии  $i \neq j$  и за время  $dt$  совершить переход из состояния  $i$  в состояние  $j$ . В интервале  $(t, t + \Delta t)$  система пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга находится не в  $i$ , не в  $j$ , а в каком-то качественно новом и по-прежнему старом состоянии  $k$ , которое при одном уровне анализа может выпадать из плоскости исследований.

Таким образом, изучение информационно-статистических характеристик иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга позволяет установить ряд специфических особенностей функционирования целостного мозга, играющих важную роль в оптимизации регуляторных механизмов.

Дальнейшие исследования доминантных иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга дают возможность подвести основы к раскрытию принципов деятельности целостного мозга, который по надежности и пластичности функционирования оставляет далеко позади лучшие из известных современных бионических систем адаптации.

**Список литературы:** 1. Старостин Б. А. Параметрическое моделирование систем высших уровней сложности. — В кн.: Биологическая и медицинская кибернетика. Ч. 3, М.—Л., изд. АН СССР, 1974, с. 173—175. 2. Коган А. Б., Чораян О. Г. Роль вероятностных нейронных ансамблей в оптимизации функций систем автоматического управления структур мозга. — В кн.: Биологическая и медицинская кибернетика. Ч. 3, М.—Л., изд. АН СССР, 1974, с. 90-93. 3. Брайнес С. Н., Суслов А. И. Нейрокибернетика и динамическая нейрологография. — В кн.: Биологическая и медицинская кибернетика. Ч. 3, М.—Л., изд. АН СССР, 1974, с. 37.

Поступила в редколлегию 10.09.80.

### АЛГОРИТМ ПОИСКА ВСЕХ ТУПИКОВЫХ ТЕСТОВ С МАЛЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ПАМЯТИ

Для многих классов задач распознавания образов успешно применяются тестовые методы. Главным их недостатком является значительное время нахождения тестов и большой объем памяти, требуемый для этого.

Наиболее распространенный алгоритм (общий алгоритм Яблонского) поиска всех тупиковых тестов (ТТ) дискретной обучающей выборки (ОВ) состоит в том, что каждая строка матрицы сравнений (МС) рассматриваются как дизъюнкция соответствующих переменных, а процесс нахождения всех ТТ сводится к раскрытию скобок и проведению поглощений [1]. Какова бы ни была стратегия раскрытия скобок, промежуточные результаты большого объема можно хранить практически только в оперативной памяти, в противном случае время работы программы поиска ТТ будет недопустимо большим. Поэтому представляют интерес алгоритмы, не требующие большого объема памяти.

В статье предполагается алгоритм поиска всех ТТ (АПВТТ), не требующий хранения большого объема промежуточных результатов. Тесты в АПВТТ находятся более или менее равномерно в течение его работы, а найденные ТТ при этом не требуются хранить в памяти цифровой ЭВМ для поиска остальных ТТ в отличие от алгоритма в [2]. В АПВТТ используется метод ограниченного перебора МС. Здесь не затрагивается вопрос, в какой мере нужны все ТТ для различных алгоритмов распознавания.

**Основные определения.** Для простоты будем рассматривать случай, когда ОВ  $\{A', B'\}$ , состоящая из  $n$ -мерных векторов, представляет два класса  $A$  и  $B$ . АПВТТ легко обобщить на случай произвольного количества  $k$  классов. Для читателей, не знакомых с теорией тестов, приведем несколько определений. Более подробно с тестами можно ознакомиться например, в [1], там же имеется обширная библиография по данной тематике.

**Определение 1.** *Набором признаков (НП) называется любое подмножество фиксированного множества  $\Gamma$  признаков  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .*

**Определение 2.** *НП  $\alpha = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}\}$  называется тестом ОВ  $\{A', B'\}$ , если любые два вектора  $a_i$  и  $b_j$  ( $a_i \in A'$ ,  $b_j \in B'$ ) различаются хотя бы одной из компонент с номерами  $i_1, i_2, \dots, i_k$ .*

**Определение 3.** *Набор  $\alpha$  называется ТТ, если  $\alpha$  — тест, и никакой собственный поднабор  $\alpha$  не является тестом.*

**Определение 4.** *Полной МС называется матрица  $t_1 t_2 \times n$ , где  $t_1$  — количество векторов в классе  $A'$ ;  $t_2$  — количество векторов в классе  $B'$ . Матрица состоит из всех строк вида*

$$y_1^{i,j}, y_2^{i,j}, \dots, y_n^{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, t_1; \quad j = 1, 2, \dots, t_2,$$

$y_i^{i,j} = 1$ , если  $\alpha_i^i \neq \beta_i^j$  и  $y_i^{i,j} = 0$ , если  $\alpha_i^i = \beta_i^j$ ,

$a_i = (\alpha_1^i, \alpha_2^i, \dots, \alpha_n^i)$ ,  $b_j = (\beta_1^j, \beta_2^j, \dots, \beta_n^j)$ ,  $a_i \in A'$ ,  $b_j \in B'$ .

Таким образом, строками МС являются булевы векторы, получаемые попарным сравнением векторов ОВ из разных классов. Как известно, множество всех ТТ вместе с ОВ является «хорошим» описанием различий классов  $A$  и  $B$ .

На первом этапе работы АПВТТ строит МС по заданной ОВ так же, как в алгоритме Яблонского.

Отметим некоторые «инженерные» приемы, не затрагивающие суть АПВТТ, но сокращающие время его работы, затем перейдем к описанию АПВТТ.

Вначале рекомендуется провести все поглощения в МС, которые реализуются шагом (2) формального описания. Если столбцы МС переставить в порядке убывания количества единиц, что равносильно некоторому изменению первоначально заданного порядка признаков, то время работы АПВТТ уменьшается в несколько раз.

Некоторое сокращение времени работы (до 20%, как показал машинный эксперимент с реальными выборками) достигается, если строки МС также переставить в порядке убывания количества единиц. Перестановки столбцов и строк МС реализуются в шаге (3). Указанные перестановки занимают меньше машинного времени, чем перестановки строк и столбцов в [2].

**Сокращение перебора по МС.** Рассмотрим типичную процедуру нахождения ТТ методом, отличным от алгоритма Яблонского. Сначала будем проверять на «тестовость» НП  $\{x_1\}$ . Для этого просмотрим первый столбец МС. Если в процессе просмотра встретится нуль в первом столбце МС, то НП  $\{x_1\}$  не является тестом. Если НП  $\{x_2\}$  также не является тестом, то на некотором этапе нужно проверять на тестовость НП  $\{x_1, x_2\}$ , что равносильно просмотру двух первых столбцов МС. Нецелесообразно начинать такой просмотр сначала, поскольку до обнаружения нуля в первом столбце значительная его часть уже могла быть просмотрена.

В отличие от типичной процедуры более логично просматривать столбцы 1 и 2 с той строки, в которой был обнаружен нуль в первом столбце. Если в процессе этого просмотра встретятся нули в  $i$ -й строке в столбцах 1 и 2, то НП  $\{x_1, x_2\}$  также не является тестом. В этом случае просмотр столбцов 1, 2 и 3 целесообразно начинать с  $i$ -й строки. Такое «наращивание» проверяемого НП (шаг (20)) можно производить до тех пор, пока последний из них не окажется тестом. В этом случае однократный просмотр МС гарантирует нахождение одного теста (быть может, не тупикового). В АПВТТ найденный таким образом тест сразу проверяется на тупиковость (шаги (8)–(13)).

Предположим далее, что некоторый НП  $\alpha = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}\}$ , полученный в результате описанного «наращивания», оказался

тестом. Из способа построения  $\alpha$  следует, что НП  $\beta = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{k-1}}\}$  не является тестом. Если  $i_k < n$ , то после НП  $\alpha$  АПВТТ проверяет на тестовость НП  $\alpha' = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{k+1}}\}$ . Просмотр столбцов с номерами  $i_1, i_2, \dots, i_k + 1$  целесообразно начинать с той строки, на которой обнаружилась «нетестовость» НП  $\beta$ . Следовательно, при обнаружении «нетестовости» некоторого набора и перед присоединением к нему очередной переменной целесообразно запоминать текущий номер строки МС (шаг (20)).

**Метод реализации стратегии поиска ТТ.** Опишем организацию специальной памяти  $M$  (называемой в дальнейшем квазимагазинной), по своему функционированию напоминающую магазинную память и играющую ключевую роль в сокращении перебора по МС.

Память  $M$  имеет  $n$  уровней ( $n$  — размерность вектора ОВ), которые нумеруются числами от 1 до  $n$ . При присоединении переменной к набору текущий номер уровня увеличивается на 1 (шаг (20)). Номер уровня совпадает с количеством переменных в НП, проверяемом на тестовость. Каждый уровень имеет три поля:  $I(L)$ ,  $S(L)$  и  $D(L)$ . Их содержимое и назначение следующее:  $I(L)$  — номер строки МС, на которой обнаружена «нетестовость» НП, проверявшегося на предыдущем уровне;  $S(L)$  — НП, проверявшийся на тестовость на предыдущем уровне;  $D(L)$  — номер переменной, которая присоединена к НП.

$\text{НП } \alpha = S(L) \cup \{X_{D(L)}\}$  проверяется на тестовость при текущем значении указателя  $L$  (шаги (5) — (7)).

Информация из памяти  $M$  используется как при переходах от одного НП к другому, так и при проверке на тупиковость найденных тестов (шаги (8) — (13)).

**Формальное описание АПВТТ.** Алгоритм. Поиск всех ТТ.

Вход. ОВ  $(A', B')$ , состоящая из  $n$ -мерных дискретных векторов.

Выход. Множество  $Y$  всех ТТ.

Рабочая память. Квазимагнитная память  $M$ ; указатель  $L$  глубины погружения в  $M$ ; текущий рассматриваемый набор (ТРН)  $\alpha$ ; текущий номер  $T1$  строки МС; вспомогательный указатель  $N$ .

Шаг (1). Строится МС по ОВ  $(A', B')$ .

(2). Производятся все возможные поглощения в МС, как в алгоритме Яблонского.

(3). Столбцы и строки МС переставляются в порядке убывания количества единиц.

(4). В  $S(1)$  записывается пустой НП.  $I(L)$ ,  $D(L)$  и  $L$  устанавливаются в 1.

(5). Формируется ТРН  $\alpha = S(L) \cup \{X_{D(L)}\}$ . Полагается  $T1 = I(I)$ .

(6). Если компоненты с номерами, соответствующими ТРН, в строке с номером  $T1$  равны нулю, переход к (18).

(7). Если строка с номером  $T1$  не последняя,  $T1$  увеличивается на 1, переход к (6).

(8) (начало обработки обнаруженного теста). Полагается  $N = l - 1$ .

(9). Если  $N < 0$ , переход к (14).

(10). Формируется НП  $\beta = \alpha \setminus \{X_{D(N)}\}$ . Полагается  $T1 = I(N)$ .

(11). При нулевых значениях всех компонент, соответствующих НП строки с номером  $T1$ , переход к (13).

- (12). Если строка  $T1$  — последняя в  $MC$ , переход к (15). Иначе  $T1$  увеличивается на 1, и переход к (11).
- (13).  $N = N - 1$ . Переход к (9).
- (14).  $\alpha$  включается в  $Y$ .
- (15). Если  $D(L) = n$ , переход к (17).
- (16).  $D(L) = D(L) + 1$ . Переход к (5).
- (17).  $L = L - 1$ . Если  $L < 0$ , работа заканчивается, иначе переход к (16).
- (18) (начало обработки нетестового набора). Если  $L = n$ , работа заканчивается с выдачей сообщения об отсутствии тестов.
- (19). Если  $D(L) = n$ , переход к (21).
- (20). Полагается  $D(L + 1) = D(L) + 1$ ,  $I(L + 1) = TI$ ,  $S(L + 1) = \alpha$ ,  $L = L + 1$ . Переход к (5).
- (21).  $L = L - 1$ . Если  $L < 0$ , переход к (17).
- (22). Если  $D(L) + 1 = D(L + 1)$ , переход к (21), иначе переход к (16).

**Результаты машинных экспериментов.** АПВТТ программно реализован на языке Ассемблера в операционной системе ДОС ЕС. При этом в реализации характерно широкое использование макросредств [3] для получения возможно лучшей структуры программы в зависимости от параметров (размерность вектора, количество классов, значность отдельных признаков и т. п.).

По АПВТТ при  $n = 28$ ,  $k = 2$  было найдено всего 314 ТТ для ОВ, взятой из [4] и состоящей из  $5 + 2$  двоичных векторов. Время счета на ЭВМ ЕС-1020 составило менее 9 мин. При  $n = 16$ ,  $k = 2$  было найдено всего 264 ТТ по ОВ из  $4 + 8$  векторов, время счета 20 с (ОВ взята из [1]).

**Список литературы:** 1. Соловьев Н. А. Тесты. — Новосибирск: Наука, 1978. — 187 с. 2. Слуцкая Т. Л. Алгоритм вычисления информационных весов признаков. — Дискретный анализ, 1968, вып. 12, с. 75—90. 3. Хусаинов Б.С. Макросредства в языке Ассемблера ЕС ЭВМ. — М.: Статистика, 1978. — 98 с. 4. Бугаец А. Н., Дуденко Л. Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. — Ленинград: Недра, 1976. — 269 с.

. Поступила в редколлегию 29.05.80.

УДК 621.391

Ф. А. ДОМНИН, канд. техн. наук, А. И. ПОВОРОЗНЮК

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МГУА

Современные клинические исследования сопровождаются регистрацией и совместным анализом значительного количества различных снимаемых параметров. При их анализе часто возникает необходимость установить не только степень корреляции, но и функциональную связь между сигналами, выраженную аналитически, т. е. в определении для сильно коррелированных параметров зависимости  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Наличие аналитической связи позволяет глубже анализировать физику протекающих процессов и решать задачи по разработке моделей объекта и автоматизации его исследования. В отдельных случаях полученные таким образом функциональные зависимости могут быть использованы для задач управления реальным объектом. Последнее представляет особый интерес в лечебной

практике, в разработке и внедрении различных искусственных органов и пр.

Один из возможных методов определения функциональной зависимости — метод группового учета аргументов (МГУА), в частности его полиномиальный вариант. Известно, что любую функциональную зависимость  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  можно с достаточной точностью представить в виде полинома Колмогорова — Габора — «полное описание» [1]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (1)$$

Полиномиальные алгоритмы МГУА определяют коэффициенты полинома (1), используя несколько коротких «частных описаний» первой или второй степени от двух аргументов. При этом все исходные экспериментальные точки разбиваются на две последовательности: обучающую, которая используется для определения коэффициентов «частных описаний», и проверочную, что служит для определения точности аппроксимирующего полинома. Алгоритмы МГУА воспроизводят схему массовой селекции согласно «гипотезе селекций» [1]. Основные недостатки данного метода следующие.

1. Как и любой метод селекции, он продолжителен и недостатки селекции наиболее выражены при аппроксимации линейных полиномов.

2. Когда в процессе усложнения структуры полинома на определенном этапе увеличивается ошибка, то нельзя получить более точную аппроксимацию.

3. После получения результирующего полинома необходимо провести операцию исключения промежуточных переменных (пошаговая подстановка результатов предыдущего этапа в последующий и сведение подобных членов). Это усложняет машинное выполнение расчета по определению структуры полинома [1].

Чтобы упростить техническую реализацию полиномов, представляет интерес получение общего полинома в виде произведения линейных полиномов  $y = y_1 y_2 \dots y_l$  (2), где  $y_i = a_{0i} + a_{1i} x_1 + a_{2i} x_2 + \dots + a_{ni} x_n$ .

Ниже рассматривается модифицированный алгоритм МГУА, который не обладает приведенными недостатками и позволяет получить структуру полинома в виде (2). Определение структур линейных полиномов  $y_i$  происходит поэтапно, при этом каждый последующий полином  $y_{i+1}$  обеспечивает приближение к заданной точности аппроксимации.

Рассмотрим процедуру построения линейного полинома  $y_1$  на первом этапе. Процедура получения полиномов  $y_j$  на  $j$ -м этапе аналогичная. Методом наименьших квадратов по точкам обучающей последовательности функция  $y$  аппроксимируется линейным полиномом  $n$ -переменных. Кроме того, поочередно отбрасывая

один из аргументов, строится семейство линейных аппроксимирующих полиномов от  $n-1$  переменных. Продолжая данную процедуру для  $n-2$ ,  $n-3$  и т. д. до  $n-(n-1)$ , получим на первом этапе аппроксимацию исходной функции  $N$  линейными полиномами:  $N = \sum_{i=0}^{n-1} C_n^i$  (3).

Для всех аппроксимирующих полиномов определяем погрешность на точках проверочной последовательности и, взяв  $F$  наиболее регулярных ( $F < N$ ), т. е. дающих наименьшую погрешность на точках проверочной последовательности, определяем частные вида  $\Delta_i^1 = y/y_{i1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, F$  (4), где  $y$  — значение исходной функции, заданное экспериментально;  $y_{i1} = P_{i1} \sum_{j=1}^n x_j$  — линейные «частные описания» исходной функции.

Полученные частные  $\Delta_i^1$  следует рассматривать как мультипликативные остатки, умножение которых на аппроксимирующие полиномы дает аппроксимируемую функцию. На этом первый этап оканчивается и выбранные  $F$  остатков рассматриваются как исходные функции для выполнения аналогичных действий на втором этапе. Процедура наращивания этапов (сложности результирующего полинома) продолжается до тех пор, пока точность на точках проверочной последовательности уменьшается.

Точность аппроксимации ищется в виде

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m y_i}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — точность аппроксимации;  $\hat{y}_i$  — значение исходной функции в  $i$ -й точке;  $y_i$  — значение аппроксимирующего полинома в  $i$ -й точке;  $m$  — число экспериментальных точек.

На последнем этапе выбираем наиболее регулярный полином и с учетом соотношения

$$\begin{aligned} y &= \Delta^1 P_1; \\ \Delta^1 &= \Delta^2 P_2; \\ &\dots \\ \Delta^{l-1} &= \Delta^l P_l = P_l, \end{aligned} \quad (6)$$

находим аналог частного описания

$$y = P_1 P_2 \dots P_l = \left( a_0 + \sum_{i=1}^{k_1} a_i x_i \right) \left( b_0 + \sum_{i=1}^{k_2} b_i x_i \right) \dots \left( c_0 + \sum_{i=1}^{k_l} c_i x_i \right). \quad (7)$$

Рассмотренный метод требует корректировки в случае необходимости выполнения деления на величину, близкую к нулю.

При разработке алгоритмов реализации метода в качестве корректировки может быть рекомендовано введение постоянного смещения аппроксимируемой функции, которое затем легко учесть. Имеется программа решения задач методом модифицированного МГУА, написанная на алгоритмическом языке FORTRAN — IV ДОС ЕС, которая содержит 175 операторов.

На рисунке представлены характеристики системы гемодинамики при различных уровнях физической нагрузки [2] и приведена аппроксимация таких важных параметров сердечно-сосудистой системы, как частота сердечных сокращений  $f_c$  и «насосный коэффициент» сердца  $a$  [2].

Величина  $f_c$  (кривая 1) аппроксимируется:

а) методом МГУА  $f_c = -3,9 \cdot 10^3 + 6,65 \cdot 10^2 P_v + 5,4 \cdot 10^2 R_c - 10^2 P_v R_c - 22 P_v + 1,5 \cdot 10^2 R_c$  (8) с точностью  $\epsilon = 5,1\%$  (кривая 2);

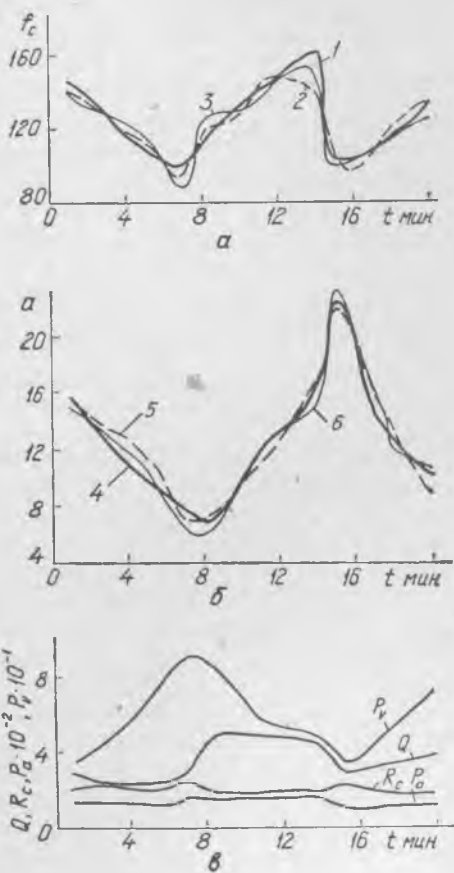
б) модифицированным МГУА полиномом вида  $f_c = (151 + 7,85Q - 0,86P_v)(1 + 0,37 \cdot 10^{-3}a - 5,6 \cdot 10^{-5}P_a)$  (9) с точностью  $\epsilon = 3,7\%$  (кривая 3).

Величина  $a$  (кривая 4) аппроксимируется:

а) методом МГУА  $a = 1,21 \cdot 10^2 - 1,3f_c - 0,7P_v + 4 \cdot 10^{-3}f_c P_v + 4,2 \cdot 10^{-3}f_c^2$  (10) с точностью  $\epsilon = 4,0\%$  (кривая 5);

б) методом модифицированного МГУА полиномом  $a = (18,5 + 0,73Q - 0,16P_v)(0,99 + 3 \cdot 10^{-6}Q + 9 \cdot 10^{-6}P_v)$  (11) с точностью  $\epsilon = 2,8\%$  (кривая 6).

На рисунке и в выражениях (8)–(11) использованы величины:  $f_c$  — частота сердечных сокращений [уд./мин];  $a$  — «насосный коэффициент» сердца [см<sup>3</sup>/мм рт.ст.];  $Q$  — минутный объем крови [л/мин];  $P_a$  — среднее артериальное давление [мм вод.ст.];  $P_v$  — центральное венозное давление [мм вод.ст.];  $R_c$  — общее периферическое сопротивление [мм рт.ст./см<sup>3</sup>].



Результаты аппроксимации параметров сердечно-сосудистой системы

Как видно из приведенного примера, применение модифицированного МГУА позволило увеличить точность аппроксимации без увеличения сложности аппроксимирующего полинома по сравнению с методом МГУА. Однако в модифицированном МГУА уже на первом шаге выделяются все наиболее существенные параметры, чего нет в обычном МГУА, где на первом шаге может быть лишь два аргумента.

**Список литературы:** 1. Ивахненко А. Г., Зайченко Ю. П., Димитров В. Д. Принятие решения на основе самоорганизации. — М.: Сов. радио, 1976. — 279 с. 2. Лиссова О. И., Палец Б. Л., Береговский Б. А. Регуляция кровотока. Экспериментальные и математические исследования. — Киев: Наук. думка, 1977. — 256 с.

*Поступила в редколлегию 24.03.80.*

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН

### БИОРЕГУЛЯЦИЯ ПУПИЛЛОМОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Зрачок глаза, «эстезиометр тела и души», со своими исполнительными органами — сфинктором и дилатором — представляет собой заключительное звено в сложной пупилломоторной системе зрительного аппарата человека. В данной статье мы рассмотрим биорегуляцию зрачка глаза. Известно, что зрачок глаза реагирует на воздействие света, звука, конвергенции и дивергенции, аккомодации, болевые ощущения. Установлена связь этой реакции с симпатической и парасимпатической нервной системой [1]. Все это указывает на многоуровневую систему регуляции зрачка глаза. Создается впечатление, что биорегуляция этой системы осуществляется в рамках нескольких автономных контуров, а ее исполнительными элементами являются два эффекторных органа, регулирующие диаметр зрачка: сфинктер, ответственный за сужение зрачка, и дилатор — за расширение зрачка.

Согласно существующим представлениям «между мышцей, суживающей зрачок, и мышцей, расширяющей зрачок, в процессе их деятельности существуют реципрокные взаимоотношения» [2, с. 23]. Наличие двух разных по своим энергетическим параметрам мышц в пупилломоторной системе, по-видимому, обусловлено их различной функциональной ролью. С одной стороны, необходима быстрая реакция зрачка в случае резких перепадов освещенности на уровне глаза, чтобы предохранить его рецепторный аппарат от перегрузок. С другой — длительное сохранение максимальной величины диаметра зрачка в сумерках для ориентации в различных фоновых освещениях и медленное изменение размера зрачка при аккомодации

с целью сохранить необходимую глубину резкости оптической системы глаза вблизи.

Реализация этих разных по своей функциональной значимости целей в процессе эволюции, видимо, должна (по аналогии с другими системами зрительного аппарата, например глазодвигательной) формироваться в виде разных контурных систем, каждая из которых отвечает за выполнение определенной функции. В самом деле, быстрая реакция сужения зрачка, осуществляемая сфинктером, вряд ли может совмещаться с медленными ее изменениями, за которые, скорее всего, ответственен диллятор, поскольку анатомическая структура его в большей степени ориентирована на реализацию медленной реакции зрачка глаза. Тем более в реакции зрачка, например, за световую вспышку четко проглядываются две разные по временным характеристикам фазы — быстрая (*I*), связанная с сужением зрачка, и медленная (*II*) — с его расширением (рис. 1, позиция 7, *II*). Однако Левенштейн даже в сужении зрачка выделял три фазы: быструю парасимпатическую, медленную симпатическую и медленную вариабельную симпатическую, в то время как Дришель выделял только две фазы: быструю — в первом периоде сужения — и более медленную — во втором периоде. И. И. Меркулов также отмечает, что «сокращение зрачка в первый период было более живым и резким, по сравнению со вторым периодом» [1, с. 41]. Рассматривая в целом форму пупиллограммы, очевидно, важно правильно оценить, за какие конкретно участки ответственен сфинктер и диллятор, а вместе с ними и те контуры регуляции, с которыми они связаны. Именно в этом случае представляется возможность не только дифференцировать регуляцию пупилломоторной системы по ее отдельным контурам, но и представить взаимосвязь между ними.

Анализ регуляции моторной системы зрительного анализатора и в частности ее глазодвигательной и пупилломоторной систем показывает, что между ними имеется много общего и в основе своей они построены на одних и тех же принципах. Это значит, что в пупилломоторной системе так же, как и в глазодвигательной, должны быть фазическая и тоническая система регуляции, которые, в свою очередь, связаны с фазическими и тоническими участками ретикулярной формации. Исходя из этого логично предположить, что сфинктер связан с фазической системой, а диллятор — с тонической. Поскольку быстрая фаза сужения зрачка наступает при воздействии световой вспышки и переводе взгляда из дали вблизи, то, по-видимому, здесь следует различать два отдельных фазических контура пупилломоторной системы, один из которых — зрачковый рефлекс на свет (контур *I*), а другой является составной частью триадного механизма, связанного с установкой глаз на близкие предметы (контур *II*). Кроме того, третий контур создает тонус

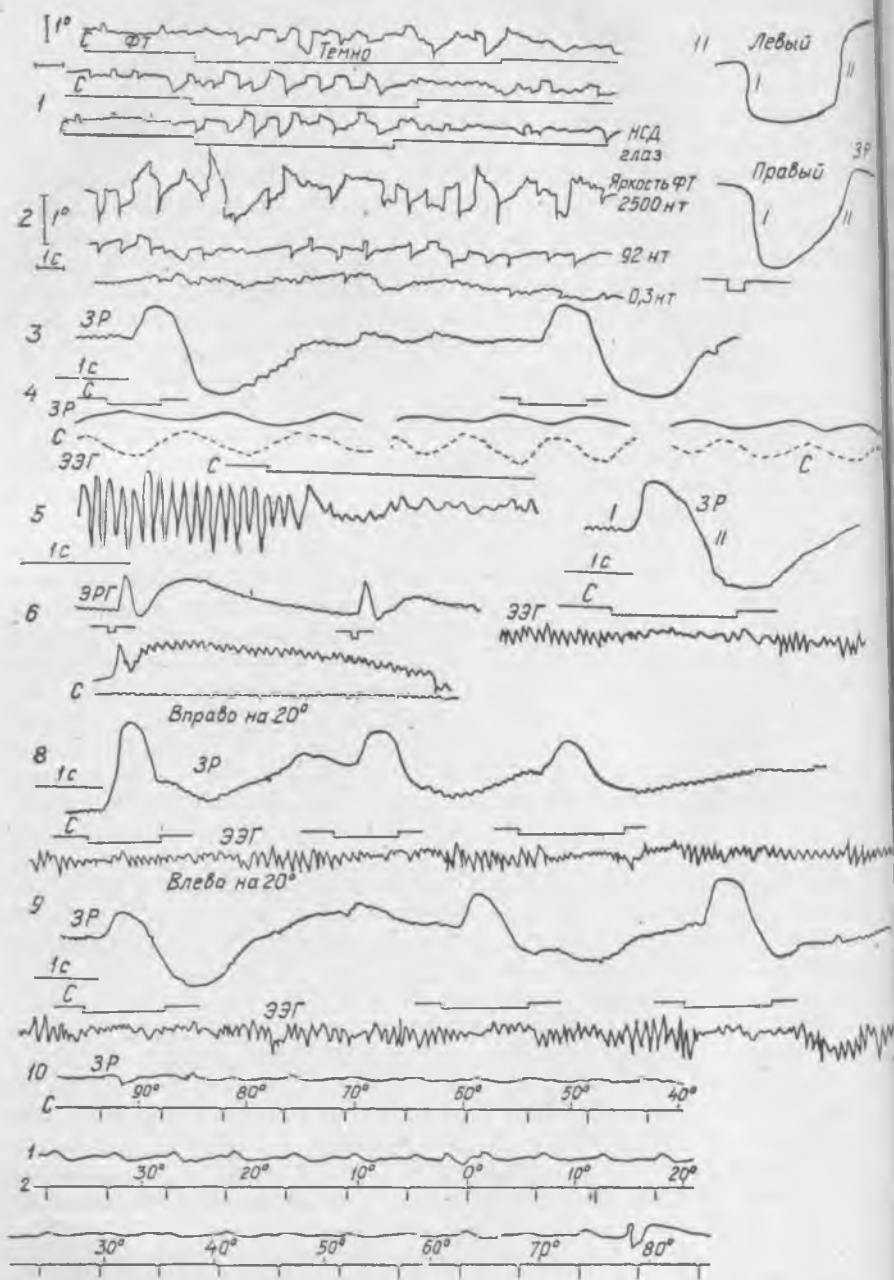


Рис. 1. Пупилломоторная система зрительного аппарата человека:

С — стимуляция; НСД — произвольное, саккадическое движение глаз; ЗР — зрачковый рефлекс; ЗРГ — электроретинограмма; ЭЭГ — энцефаллограмма; ФТ — фиксационная точка

сфинктера. Все эти три контура физической системы схематично изображены на гипотетической схеме (рис. 2), разработанной нами по аналогии с глазодвигательной системой.

Тоническая пупилломоторная система также состоит из нескольких контуров. Среди них контур регуляции IV, управляющий тонусом мышечных волокон дилатора (Д), контур регуляции V, связанный с триадным механизмом, осуществля-

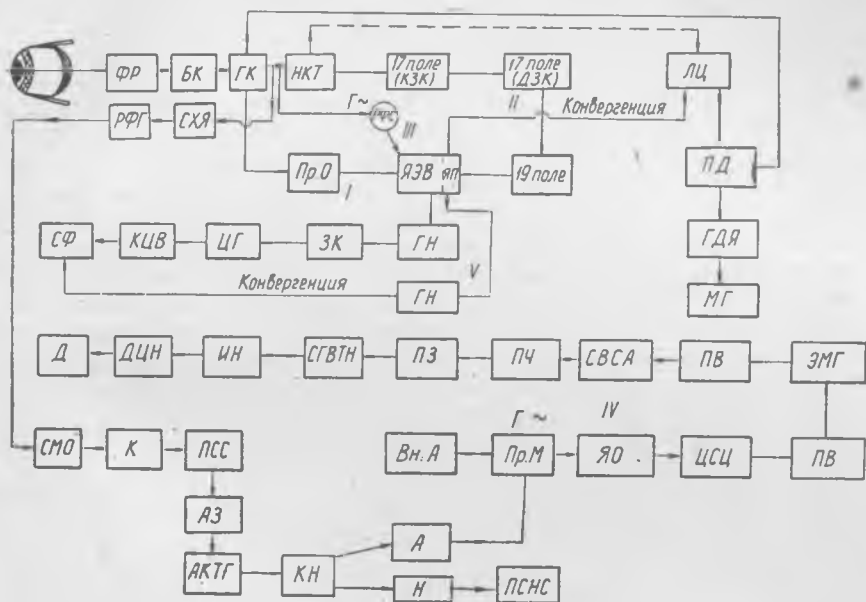


Рис. 2. Гипотетическая схема

ющим перевод взгляда из близи в даль. Рассмотрим каждый из этих контуров отдельно.

*Контур I регуляции зрачкового рефлекса на свет с физиологической точки зрения рассматривается в виде рефлекторной дуги, а с технической его можно оценивать как биологический вариант системы автоматического регулирования статического типа непрямого действия. Его управляющий сигнал  $J_1$  возникает на уровне сетчатки. Здесь информационный зрительный сигнал с выхода фоторецептора (ФР) на участке от биполярных клеток (БК) до ганглеозных клеток (ГК) создает также пупилломоторный сигнал, который далее с выхода сетчатки в зрительном нерве и зрительном тракте распространяется по своим пупилломоторным волокнам. Основанием для такого предположения служат два фактора: анатомический, в соответствии*

с которым пупилломоторные волокна направляются в претектальную область (Пр. О) до наружного коленчатого тела (НКТ) и физиологический, согласно которому реакция зрачка на свет возникает по всей площади сетчатки при ее локальном засвете. На последнем факторе остановимся более подробно. Нами было показано, что стимуляция сетчатки по одному из ее меридианов ритмической подачи светового стимула с угловым разрешением 15—20 угл. мин приводит к появлению реакции зрачка, аналогичной диффузной стимуляции (рис. 1, позиция 10). Эти данные с учетом первого фактора могут указывать на наличие самостоятельных центростремительных пупилломоторных волокон. Более того, если есть такая корреляция между локальным раздражением разных участков сетчатки и пупилломоторным ответом, можно, видимо, говорить о существовании топографической связи между сетчаткой и претектальной областью. На такую связь сетчатки с другими участками мозга, в частности лобными центрами (ЛЦ), четверохолмием (ПЦ), не говоря уже о зрительных центрах (17 и 19 поле), указывали многие авторы [3]. Правда, эти данные касались в основном глазодвигательной системы. Надо полагать, что пупилломоторная система с ее собственными пупилломоторными волокнами также должна была сформировать в процессе эволюции свою топографическую проекцию сетчатки на претектальную область и далее на адекватные ей ядерные клетки Эдингера — Вестфаля глазодвигательных ядер (ГДЯ).

Претектальная область рассматривается как первая релейная станция, где прерывается нейрон, идущий от сетчатки, и начинается новый нейрон, направляющийся в глазодвигательные ядра. Сигнал  $J_1$ , усиленный в глазодвигательном ядре и в частности ядрах Эдингера — Вестфаля, далее уже в виде эфферентного сигнала по глазодвигательному нерву (ГН) направляется к заднему корешку (ЗК) через цилиарный ганглий (ЦГ) по коротким цилиарным волокнам (КЦВ) к сфинктеру (СФ) (рис. 2). По-видимому, между  $J_1$  и силой  $F_c$  сокращения, развиваемой сфинктером, в первом приближении на определенном участке динамического диапазона существует зависимость  $F_{ci} = F_{oc} + \kappa J_1$ . Причем это усилие всегда развивается на фоне тонического напряжения сфинктера  $F_{oc}$ , создаваемого контуром III регуляции. Однако суммарная сила, под действием которой сокращается зрачок, складывается, видимо, из разности двух сил, создаваемых сокращением сфинктера  $F_c$  и дилатора  $F_d$ :  $\Delta F_i = F_{ci} - F_{di}$ .

В свою очередь, значение силы  $F_d$  будет определяться сигналом  $J_d$ , создающим тонус дилатора. Поскольку направление действия этих сил диаметрально противоположное ( $F_c$  сокращает зрачок, а  $F_d$  расширяет его), то значение  $\Delta F$  на участке сокращения зрачка должно быть максимальным в первый период

сокращения и постепенно уменьшаться к концу сокращения. Это объясняется тем, что сфинктер, сокращаясь, вынужден преодолевать сопротивление сокращенного дилататора, растягивая его подобно растяжению сжатой пружины. На подобный характер взаимодействия между сфинктером и дилататором, как известно, указывал еще Бэр. Он допускал такой вариант реципрокных отношений между ними, «при котором активное сокращение одной мышцы сочетается с неизменностью тонуса антагониста» [2].

Понятно, что в этом случае сопротивление мышцы-антагониста, в частности дилататора, будем тем выше, чем сильнее приходится растягивать дилататор, т. е. чем сильнее суживается зрачок. Именно этим обстоятельством, видимо, можно объяснить тот факт, что скорость сокращения зрачка во второй половине периода уменьшается (рис. 1). Кроме того, считается общепринятым, что реципрокные взаимоотношения между мышцами-антагонистами характеризуются тем, что при сокращении одной мышцы другая расслабляется и наоборот.

Правда, до сих пор остается непонятным сам механизм такого взаимоотношения между мышцами-антагонистами. Особенно наглядно это проявляется на мышцах глазодвигательной системы при крупных скачках глаз. В глазодвигательной системе этот механизм, вероятно, связан с действием рефлекторной дуги, афферентный сигнал которой возникает с мышечных веретен растягиваемой мышцы-антагониста при сокращении мышцы-агониста. Этот сигнал тем больше, чем быстрее растягивается мышца-антагонист. Далее афферентный сигнал поступает на группу ганглеозных клеток глазодвигательных ядер, чтобы ослабить уровень фазической импульсации в мышце-антагонисте.

Таким образом, при сокращении мышцы-агониста на мышце-антагонисте через латентный период, соответствующий времени прохождения управляющего сигнала в рамках указанной выше рефлекторной дуги, происходит ослабление тонуса ее фазических волокон, которое проявляется в уменьшении треморных движений глаз на этой мышце. Причем тонус фазических волокон обеих мышц создается центрами генерации фазической импульсации, размещенными в ретикулярной формации. Внешнее действие этой импульсации проявляется на треморных движениях глаз. Возможно, что аналогичный принцип имеет место и в пупилломоторной системе. Начальный участок у пупиллограммы так же, как у скачка глаза, имеет пологий фронт, за которым крутизна нарастания сигнала резко возрастает, а далее понижается. Хотя временная длительность сигналов в обоих случаях разная, однако имеет общую форму изменения их фронтов. Возможно, что в пупилломоторной системе также имеются свои афферентные датчики на дилататоре в виде мышечных веретен. афферентный сигнал с которых при растяжении дилататора за счет сокращения сфинктера через местную рефлектор-

ную дугу приводит к расслаблению дилататора и тем самым к уменьшению  $F_d$ , т. е. уменьшению сопротивления сфинктеру. Когда же сигнал  $J_1$  становится равным нулю, а  $F_c$  равно  $F_{oc}$ , то регуляцию зрачка берет на себя тоническая система. В этом случае реципрокные отношения между сфинктером и дилататором имеют типичную для этих взаимодействий картину.

*Контур IV регуляции* ответственен за реакцию расширения зрачка, а его исполнительным звеном является дилататор. Последний, в отличие от сфинктера, расширяет зрачок. Его мышечная система устроена так, что ее сокращение направлено только на расширение зрачка. Тонус этой мышцы управляется тоническим сигналом  $J_d$ , генерируемым своим участком ретикулярной формации, размещенным, вероятно, в продолговатом мозге (Пр. М). Причем силу сокращения  $F_d$ , развиваемую дилататором, в общем виде можно представить так:  $F_d = \kappa J_d = \kappa (J_{од} - J_a)$ , где  $J_{од}$ ,  $J_a$  — соответственно величина генерационного сигнала в темноте при наличии состояния бодрствования;  $J_a$  — сигнал, внешней афферентации, тормозящий активность генерации клеток ретикулярной формации. Согласно этой зависимости максимальное сокращение дилататора имеет место в темноте, в результате чего размер зрачка становится максимальным. При наличии же фонового освещения, определяемого величиной  $J_a$ , значение  $F_d$  уменьшается, а вместе с ним понижается сила сокращения дилататора и зрачок уменьшается в размере.

Таким образом, тоническая система, связанная с симпатической нервной системой, ответственна в основном за обеспечение адаптации пупилломоторной системы к фоновым освещенностям и плавным перепадам его яркости. И наоборот, фазическая система, связанная с парасимпатической нервной системой, ориентирована на регуляцию скачкообразных изменений света на уровне глаз. Иначе говоря, длительное сохранение размера зрачка при том или ином фоновом освещении обеспечивается дилататором. Его управляющий сигнал  $J_d$  генерируется, по-видимому, группой клеток ретикулярной формации продолговатого мозга, относящейся к отделу симпатической нервной системы. Этот сигнал распространяется по волокнам, проходящим через яремное отверстие (ЯО), далее поступает на цилиоспинальный центр (ЦСЦ), где он, вероятно, усиливается и по преганглионарным волокнам поступает на шейный симпатический ганглий, относящийся к разряду экстрамуральных ганглиев (ЭМГ). Затем по постганглионарным волокнам (ПоВ) через сплетение внутренней сонной артерии (СВСА), полость черепа (ПЧ), пещеристую пазуху (ПЗ), ствол глазничной ветви тройничного нерва (СГВТН), по изоцилиарному нерву (ИН) он поступает на длинные цилиарные нервы (ДЦН) и на мышцы дилататора (Д). На сфинктер же, в отличие от дилататора, управляющий сигнал поступает в виде нервной импульсации,

которая имеет форму отдельных фазических посылок, сформированных с выхода сетчатки под влиянием резких перепадов освещенности на уровне глаз.

Генерационная способность ретикулярной формации, как известно [4], характеризуется и своими биоритмами, что, естественно, должно находить отражение на тоне диллятора. Так, по данным [1], зимой диаметр зрачка увеличивается, а весной и летом уменьшается. Возможно, это различие можно объяснить разным уровнем освещенности. Мы считаем, что оно скорее связано с изменением тона диллятора и тех участков ретикулярной формации, которые ответственны за тонус его мышечных волокон. Тем более обнаружено, что при повышенной плюсовой температуре у человека наблюдается сужение зрачка, а при пониженной, наоборот, его увеличение так же, как и купание в прохладной воде, приводит к расширению зрачков. В данном случае несомненно, что перемена внешних условий приводит к изменению активности симпатической системы, что в наиболее наглядной форме проявляется на колебании диаметров зрачков глаза. Неудивительно, что зрачок глаза рассматривается как индикатор вегетативной нервной системы и как «барометр состояния нашего организма».

В то же время известно, что тонус многих мышц, формируемых симпатической нервной системой, повышается при охлаждении организма. Достаточно вспомнить об увеличении тона сосудов, который уменьшает их внутренний диаметр, что служит оборонительным рефлексом от охлаждения организма. Все это указывает на тесную связь диллятора с симпатической иннервацией. Известно также, что активность симпатической системы с возрастом уменьшается и как следствие этого уменьшается диаметр зрачка. Хотя определенную долю в это изменение вносят и возрастные нарушения в ткани радужки [2].

Но наиболее резко зависимость изменения диаметра зрачка от генерационной активности участков ретикулярной формации, связанных с симпатической нервной системой, проявляется во сне. Сон, как известно, сопровождается существенным понижением активности ретикулярной формации мозга, что приводит к уменьшению тона некоторых систем. Поддержание тона этих систем сопровождается генерационными сигналами из ретикулярной формации. Конкретно для пупилломоторной системы во сне уменьшается сигнал  $J_d$  и прежде всего  $J_{од}$ , а вместе с ним и сила  $F_d$ , приводящая к сокращению диллятора. Последний в данном случае расслабляется, и зрачок суживается. Этим объясняется сужение зрачка во сне. При этом утверждается, что «глубине сна пропорциональна степень сужения зрачка» [2, с. 21].

Можно сказать более конкретно: степень сужения зрачка пропорциональна активности ретикулярной формации. Величина же последней в процессе сна зависит от его фазы. Так, при

быстрой фазы сна, сопровождаемой, как правило, сновидениями, активность ретикулярной формации, видимо, возрастает. Понятно, что в этот период сна размер зрачка должен увеличиваться по сравнению с фазой медленного сна, так как из ретикулярной формации на дилататор поступает сигнал  $I_d$  большого энергетического потенциала, т. е. в виде большей частоты нервной импульсации.

Поскольку активирующая функция ретикулярной формации, связанной с симпатической нервной системой, характеризуется генерализационным влиянием, возрастание ее активности в период быстрой фазы сна должно проявляться не только на изменении диаметра зрачка (как наиболее ярко выраженного индикатора вегетативной нервной системы организма), но и на других его системах, также находящихся под активирующим влиянием ретикулярной формации. И действительно, по данным А. М. Вейна, «в быстром сне возникает «вегетативная буря»: регистрируются учащения и нерегулярные дыхания, пульс неритмический и частый, артериальное давление повышается. Подобные сдвиги могут достигать 50% от исходного уровня». Кроме того, «в период быстрого сна выявлено также усиление гормональной активности» [5, с. 27].

Таким образом, изменение диаметра зрачка в процессе сна можно рассматривать лишь как частное проявление вегетативной функции организма, связанной с изменением активирующей функции ретикулярной формации, управляющей тонусом мышц и нейронов пурилломоторной системы. И наоборот, в период медленного сна «при засыпании суживаются зрачки, кожа розовеет, усиливается потоотделение, уменьшается секреторная деятельность желудка... наблюдается урежение дыхания, пульса, снижение артериального давления» [5, с. 27], т. е. четко проявляется понижение тонуса вегетативных систем организма, что, несомненно, должно указывать на спад активирующей функции ретикулярной формации. Кроме того, связь быстрой фазы сна с ретикулярной формацией была доказана еще М. Жуве.

Следует отметить, что одновременно с изменением тонуса мышц во сне, в частности дилататора, изменяется также активность нейронов, в том числе корковых. Так, во сне альфа-ритм ЭЭГ практически исчезает или существенно уменьшается в дремотном состоянии. По-видимому, и сам сон следует рассматривать как следствие изменения активирующей функции ретикулярной формации в сторону резкого уменьшения ее активирующей функции. Блокада альфа-ритма ЭЭГ при воздействии внешней световой афферентации и ее последующая адаптация к новому фоновому освещению во многом напоминает реакцию зрачка на световую вспышку (рис. 1, позиция 5). Видимо, в основе этих двух явлений лежит одна и та же причина, связанная с уменьшением активирующей функции участков рети-

кулярной формации. По крайней мере, наши экспериментальные результаты одновременной записи альфа-ритма ЭЭГ и зрачкового рефлекса на световые вспышки в определенной степени могут указывать на их общую закономерность изменения (рис. 1, позиция 7—9).

Самым удивительным оказалось то, что эта закономерность свойственна всем параметрам зрительного анализатора, тонус которых создается генерирующими клетками ретикулярной формации (рис. 1) [6]. По-видимому, данное явление распространяется не только на зрительный анализатор, но и на все системы организма, находящиеся под активирующим влиянием ретикулярной формации. Правда, сама форма нервной импульсации для разных систем, в том числе и подсистем зрительного анализатора, включая пупилломоторную, глазодвигательную, аккомодационную и другие, отличается для каждой из них своей специфичностью, на что указывал П. К. Анохин [7].

*Контур II регуляции* управляет сужением зрачка при установке глаз на близкое расстояние и связан с триадным механизмом, в котором он составляет одну из его частей. Этот контур относится к произвольному незамкнутому виду, так как его регуляция осуществляется по команде, исходящей, видимо, из лобных центров (ЛЦ), ведающих произвольными движениями всей моторной системы зрительного анализатора (рис. 2). В данном случае управляющий сигнал  $J_{\text{ц}}$  контура регуляции  $V$  из лобных центров при переводе взгляда из дали вблизи и наоборот одновременно поступает на мышцы глаз (МГ) через переднее двухолмие (ПД) и глазодвигательные ядра, сфинктер, через группу клеток ЯЭВ по глазничному нерву, минуя цилиарный ганглий и цилиарный мускул, в частности мышцу Брюкке. В результате одновременно сокращаются мышцы глаз, зрачок, цилиарный мускул. Понятно, что величина этого сигнала должна зависеть от расстояния до объекта, на который переводится взгляд из дали вблизи. Так, угол  $\alpha$  конвергенции глаз в зависимости от расстояния  $X$  изменяется по формуле

$$\alpha = 2 \arctg \frac{B}{2X}, \quad (1)$$

где  $B$  — база межцентрового расстояния глаз.

Изменение фокусного расстояния оптической системы глаза от  $X$ , обеспечиваемое аккомодационным аппаратом получения резкого изображения на сетчатке разноудаленных предметов, определяется формулой [8, 9]:

$$f'_t = \sqrt{X_t \frac{f^2 + 2f^2 \Delta_{cl}}{X_t + 1,5f^2}} \quad (2)$$

Из формул (1), (2) видно, что  $\alpha$  и  $f'$  больше всего изменяются на отрезке от 400 мм и меньше. Отсюда следует, что изменение  $J_{\text{ц}}$  должно быть адекватным изменению  $\alpha$  и  $f'$ . Надо пола-

гать, что изменение диаметра сфинктера при скачкообразном или плавном слежении в зависимости от  $X$  также должно происходить по закономерности, близкой к изменению  $\alpha$  и  $\beta$ . Действительно, по данным [2], наибольшее уменьшение диаметра зрачка глаза происходит именно на близких дистанциях слежения за объектом, начиная от 500 мм и меньше.

Хотя изменение компонентов триады имеет одинаковую закономерность, тем не менее каждый из них имеет свою особенность.

Роль нейроэндокринной системы в регуляции зрачка глаза можно проследить на примере контура VI регуляции (рис. 2). Здесь управляющий сигнал  $J_n$  генерируется группой клеток ретикулярной формации гипоталамуса (РФГ), который далее поступает, вероятно, в средний медиальный отдел (СМО) на нейросекреторные клетки, где трансформируется в релизинг-гормон, например, кортиколиберин (К). Затем через портальную сосудистую систему (ПСС) в аденогипофизе (АЗ) трансформируется в промежуточный гормон АКТГ, который, воздействуя на мозговой слой коры надпочечников (КН), приводит к генерации в систему кровообращения катехоламинов-адреналина (А) и норадреналина (Н). Последние, воздействуя на ретикулярную формацию, а также проводящую систему симпатической нервной системы (ПСНС), активируют ее деятельность, что отражается на поведении зрачка.

Результаты экспериментальных исследований, описанные в статье, были получены с помощью разработанных нами объективных методов регистрации зрачков и движений глаз [6, 9] в сочетании с существующими методами записи ЭЭГ и электроретинограммы (ЭРГ).

**Список литературы:** 1. *Смирнов В. А.* Зрачки в норме и патологии. — М.: Медицина, 1953. — 220 с. 2. *Меркулов И. И.* Учение о зрачке. — Вопросы нейроофтальмологии, 1961, 7, с. 5—86. 3. *Шахнович А. Р., Шахнович В. Р.* Пупиллография. — М.: Медицина, 1964. — 251 с. 4. *Наумова Т. С.* Физиология ретикулярной формации. — М.: Медгиз, 1963. — 195 с. 5. *Вейн А. М.* Бодрствование и сон. — М.: Наука, 1970. — 127 с. 6. *Ананин В. Ф.* Исследование методов регистрации движений глаз и зрачковых рефлексов. — Канд. дис., М., 1964. — 314 с. 7. *Анохин П. К.* Очерки о физиологии функциональных систем. — М.: Медицина, 1975. — 448 с. 8. *Ананин В. Ф.* Аккомодация как биологическая система автоматического регулирования. — Физиол. журн. СССР, 1975, № 8, с. 1190—1196. 9. *Ананин В. Ф.* Объективные методы исследования зрения человека. — Физиология человека, 1976, 2, № 4, с. 693—696.

*Поступила в редколлегию 17.07.80.*

## ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ САМООРГАНИЗАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Современные физиологические исследования [1] свидетельствуют о том, что синаптические связи между нейронами мозга не наследуются полностью. Вследствие опыта, приобретаемого организмом в процессе обучения, могут появляться новые и изменять свою эффективность уже существующие синаптические соединения. Иными словами, нейронные структуры мозга обладают свойством самоорганизации для выполнения определенной, полезной для организма функции. Относительно природы пластических изменений синаптического аппарата существует ряд гипотез, анализ которых изложен в [2]. Суть этих гипотез сводится к тому, что эффективность синаптической связи между пресинаптической и постсинаптической клетками меняется по определенному алгоритму в зависимости от их состояния. Данные гипотезы лежат в основе известных моделей самоорганизующихся нейронных сетей. Наряду с этим в [3] приводятся сведения о наличии в нейронных структурах мозга спонтанно генерирующих нейронов и пейсмекеров. Высказывается предположение, согласно которому самоорганизация нейронных сетей связана не только с пластическими изменениями синаптических связей, но и с деятельностью пейсмекеров.

В данной статье предлагается модель нейронной сети, обладающая свойствами самоорганизации. В этой модели, как и в живом мозге, синаптические связи между нейронами изменяют свою эффективность и структуру так, чтобы учесть приобретенный опыт. Показана роль пейсмекеров в самоорганизации сети.

*Алгоритм обучения нейронной сети.* Данные физиологических экспериментов позволяют предположить существование нейронных сетей, которые осуществляют распознавание непрерывных сигналов, отображающих определенное явление или какую-либо ситуацию во внешней среде. Это могут быть и звуковые колебания, и непрерывные движения глаз в процессе восприятия зрительных образов. Задача нейронной сети в данном случае — отнести пришедший сигнал к определенному классу. В работе [4] рассматривается метод классификации непрерывных сигналов на основе анализа качественных соотношений между компонентами или значениями этих сигналов, взятых в дискретных точках.

Исходя из рассуждений, представленных в [4], рассмотрим нейронную сеть, осуществляющую распознавание непрерывных сигналов и обладающую свойствами самоорганизации. Будем полагать, что сигналы, поступающие на входы сети, образованы в результате специальной переработки информации. Сущность ее состоит в том, что поступающий непрерывный сигнал преобразуется в  $m$  мерный вектор

$$\vec{x}_i = \langle x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m} \rangle,$$

где  $i=1, 2, \dots, n$ , компонентами которого являются значения этого сигнала, взятые в  $m$  заданных дискретных точках. В качестве основного функционального элемента нейронной сети рассмотрим нейрон, имеющий два типа синаптических входов —

тормозные и возбуждающие. Условное обозначение нейрона представлено на рис. 1, где стрелкой обозначен возбуждающий вход, а точкой — тормозной. Запишем алгоритм функционирования нейрона в следующем виде:

$$Y_i = \sum_{j=1}^l \gamma_j x_{i,j}; Y_{\text{вых}i} = \max \{0, Y_i\}. \quad (1)$$

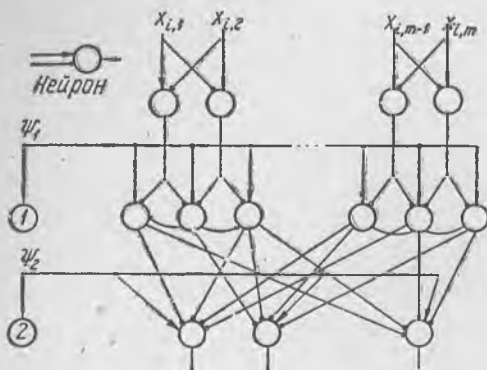


Рис. 1. Нейронная сеть

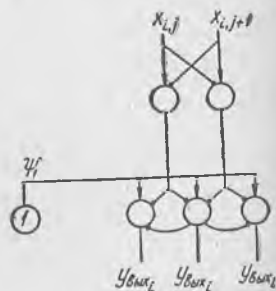


Рис. 2. Элементарный нейронный ансамбль

Здесь  $x_{i,j}$  — входной сигнал, поступающий на  $j$  вход;  $\gamma_j$  — синаптический вес  $j$  входа, который может быть возбуждающим или тормозным;  $y_{\text{вых}i}$  — выходной сигнал нейрона.

Введем в состав нейронной сети другой тип нейрона — пейсмекерный. Этот нейрон не имеет синаптических входов и основное его функциональное назначение заключается в генерации постоянного пейсмекерного потенциала. С учетом сказанного представим нейронную сеть в виде, изображенном на рис. 1, где цифрами 1, 2 обозначены пейсмекерные нейроны. Верхний слой нейронов (рис. 1) назовем рецепторными элементами, средний слой — анализирующими элементами, а нижний слой — реагирующими элементами. Введем в схему нейронной сети следующие обозначения: веса входов рецепторных элементов  $\gamma$ , синаптические веса анализирующих элементов  $\gamma_a$  и синаптические веса реагирующих элементов  $\gamma_p$ . Величину пейсмекерного потенциала первого пейсмекерного нейрона (см. рис. 1) обозначим через  $\Psi_1$ , а величину потенциала второго пейсмекера — через  $\Psi_2$ .

Чтобы пояснить работу нейронной сети, рассмотрим алгоритм функционирования элементарного нейронного ансамбля, выявляющего соотношения между двумя соседними компонентами  $x_{i,j}$  и  $x_{i,j+1}$  входного сигнала  $x_j$ .

Внешний вид нейронного ансамбля на рис. 2. Представим алгоритм функционирования ансамбля в следующем виде: если

компоненты  $x_{i,j}$  и  $x_{i,j+1}$  входного сигнала  $\bar{x}_i$ , поступающие на входы ансамбля, связаны соотношением  $x_{i,j} > x_{i,j+1}$ , то возбуждается только правый анализирующий элемент; если  $x_{i,j} < x_{i,j+1}$ , то в возбужденном состоянии находится только левый анализирующий элемент; если компоненты связаны знаком равенства  $x_{i,j} = x_{i,j+1}$ , то возбужденным будет только средний анализирующий элемент. Тогда по реакции соответствующего анализирующего элемента можно однозначно судить о наличии определенного соотношения между компонентами входного сигнала, поступающими на входы ансамбля. Для простоты дальнейших рассуждений положим значения синаптических весов возбуждающих входов рецепторных элементов равными единице, а значения синаптических весов тормозных входов для всех элементов нейронной сети — равными минус единице.

Учитывая сказанное и принимая во внимание (1), видим, что если  $x_{i,j} > x_{i,j+1}$ , то на выходе левого рецепторного элемента (см. рис. 2) появится сигнал, равный  $y_{\text{вых}_l} = x_{i,j} - x_{i,j+1}$ , а выходной сигнал правого рецептора равен при этом нулю. Согласно алгоритму работы нейронного ансамбля при данном соотношении между компонентами входного сигнала в возбужденном состоянии должен быть только правый анализирующий элемент. Для этого необходимо выполнить следующее условие:  $x_{i,j} - x_{i,j+1} \geq \gamma_a \psi_1$  (2).

Действительно, при выполнении этого условия выходной сигнал левого рецептора, попадая на тормозные входы левого и среднего анализирующих элементов, обращает их выходные сигналы в ноль. А так как выходная величина правого рецептора равна нулю, то ее поступление на тормозной вход правого анализирующего элемента не оказывает тормозного влияния на последний, и на его выходе появляется сигнал  $y_{\text{вых}_r} = \gamma_a \psi_1$ .

При  $x_{i,j} < x_{i,j+1}$  ситуация аналогична. Только теперь на выходе правого рецепторного элемента появляется сигнал  $y_{\text{вых}_r} = x_{i,j+1} - x_{i,j}$ . Для того чтобы на выходе только левого анализирующего элемента появился сигнал  $y_{\text{вых}_l} = \gamma_a \psi_1$ , необходимо выполнение следующего условия:  $x_{i,j+1} - x_{i,j} \geq \gamma_a \psi_1$  (3).

Когда компоненты входного сигнала равны  $x_{i,j} = x_{i,j+1}$ , выходные сигналы обоих рецепторов равняются нулю, и на выходах всех трех анализирующих элементов появляется сигнал  $y_{\text{вых}_i} = \gamma_a \psi_1$ . Но выходной сигнал среднего анализирующего элемента попадает, кроме того (рис. 2), на тормозные входы левого и правого элементов и обращает их выходы в ноль. В этом случае возбужденным является только средний анализирующий элемент. Из выражений (2), (3) можно получить общее условие, обеспечивающее выполнение алгоритма функционирования нейронного ансамбля:

$$|x_{i,j} - x_{i,j+1}| \geq \gamma_a \psi_1. \quad (4)$$

Таким образом, при выполнении условия (4) на выходе одного из анализирующих элементов нейронного ансамбля появляется сигнал  $y_{\text{вых}i} = \gamma_a \psi_1$ , который указывает на то, каким именно из трех возможных соотношений  $> = <$  связаны компоненты  $x_{i,j}$  и  $x_{i,j+1}$  входного сигнала  $\bar{x}_i$ . Для анализа соотношений между всеми соседними компонентами входного сигнала  $\bar{x}_i = \langle x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m} \rangle$  потребуется  $(m-1)$  элементарных нейронных ансамблей. В этом случае необходимо, чтобы условие (4) выполнялось для каждого из них. С учетом сказанного и того обстоятельства, что выполнение условия (4) имеет смысл в случае  $x_{i,j} \neq x_{i,j+1}$ , из (4) можно получить выражение для синаптических весов  $\gamma_a$  возбуждающих входов анализирующих элементов нейронной сети. При этом обеспечивается выполнение алгоритма функционирования для всех  $(m-1)$  нейронных ансамблей. Полученное выражение имеет вид

$$\gamma_a \leq \min_j \frac{|x_{i,j} - x_{i,j+1}|}{\psi_1} \quad |x_{i,j} \neq x_{i,j+1}. \quad (5)$$

Если теперь каждому входному сигналу  $\bar{X}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) поставить в соответствие один  $i$  реагирующий элемент, который возбуждается при поступлении этого сигнала на входы  $(m-1)$  нейронных ансамблей, получим схему нейронной сети, представленной на рис. 1. К тормозным входам  $i$  реагирующего элемента подключаются выходы всех тех анализирующих элементов, которые не возбуждены при поступлении  $i$  входного сигнала  $\bar{X}_i$ .

Тогда нарушение хотя бы одного из соотношений между компонентами  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}$  входного сигнала  $\bar{X}_i$  должно затормозить  $i$  реагирующий элемент и, следовательно, отнести этот сигнал к другому классу. Для того чтобы это имело место, необходимо выполнить следующее условие:  $\gamma_a \psi_1 \geq \gamma_p \psi_2$  (6). Из (6) можно получить выражение для синаптических весов  $\gamma_p$  возбуждающих входов реагирующих элементов:

$$\gamma_p \leq \frac{\gamma_a \psi_1}{\psi_2}. \quad (7)$$

Таким образом, выражения (5), (7) определяют значения синаптических весов  $\gamma_a, \gamma_p$  возбуждающих входов анализирующих и реагирующих элементов, которые обеспечивают настройку нейронной сети на распознавание  $i$  входного сигнала  $\bar{X}_i$ . Если количество входных сигналов  $\bar{X}_i$ , подлежащих распознаванию, равно  $n$ , то условия (5), (7) должны выполняться для всех  $i=1, 2, \dots, n$ . Последнее обстоятельство, а также изложенные выше результаты приводят к алгоритму определения значений синаптических весов  $\gamma_a, \gamma_p$ . Процедуру поиска значений синаптических весов  $\gamma_a, \gamma_p$  назовем процессом обучения сети. Тогда алгоритм обучения нейронной сети можно записать в следующем виде

1. Полагаем значение  $\gamma_a$  произвольным положительным числом. Переход к п. 2.
2. Полагаем  $i = 1$ . Переход к п. 3.
3. Предъявляем входной сигнал  $\bar{X}_i = \langle x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m} \rangle$ . Переходим к п. 4.
4. Определяем  $A \leq \frac{\min_j |x_{i,j} - x_{i,j+1}|}{\psi_1} \mid x_{i,j} \neq x_{i,j+1}$ . Переходим к п.5.
5. Если  $A \geq \gamma_0$ , то  $\gamma_a = \gamma_0$ .  
Если  $A < \gamma_0$ , то  $\gamma_a = A$ .
- Переходим к п. 6.
6. Если  $i < n$ , переходим к п. 7. Если  $i = n$ , переходим к п. 8.
7. Полагаем  $i = i + 1$ , Переход к п. 3.
8. Определяем  $\gamma_p \leq \frac{\gamma_a \psi_1}{\psi_2}$ . Переход к п. 9.
9. Конец алгоритма.

Из выражений (5), (7), а также из приведенного алгоритма видно, что при определении значений синаптических весов  $\gamma_a$ ,  $\gamma_p$ , т. е. в процессе обучения нейронной сети, при поступлении на ее входы заданного множества входных сигналов  $\bar{X}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) решающую роль играют величины пейсмеркерных потенциалов  $\psi_1, \psi_2$ . При этом для обучения нейронной сети множество входных сигналов достаточно предъявить всего один раз.

*Алгоритм поиска структуры связей между анализирующими и реагирующими элементами нейронной сети.* После того, как определены значения синаптических весов  $\gamma_a, \gamma_p$ , необходимо найти структуру связей между анализирующими и реагирующими элементами нейронной сети. Если количество компонент входного сигнала равно  $m$ , то, как указывалось выше, для анализа соотношений между всеми соседними компонентами потребуется  $(m-1)$  нейронных ансамблей. Так как каждый ансамбль содержит три анализирующих элемента, общее число элементов этого типа в нейронной сети должно быть  $(m-1)3$ . Если количество входных сигналов  $\bar{X}_i$  равно  $n$ , то в нейронной сети должно быть  $n$  реагирующих элементов. Поставим в соответствие анализирующим элементам нейронной сети  $(m-1)3$  вершин  $\varphi_k$  ( $k = 1, 2, \dots, (m-1)3$ ), а реагирующим элементам —  $n$  вершин  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) графа  $G$ .

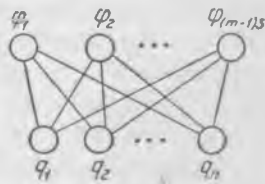


Рис. 3. Полный двудольный граф  $G$

Если теперь каждую вершину  $\varphi_k$  соединить со всеми вершинами  $q_i$ , то получим граф  $G$ , изображенный на рис. 3. Представим граф  $G$  в виде его матрицы смежности. Она будет представлять собой матрицу  $|C|$  с  $n$  строками и  $(m-1)3$  столбцами, каждый элемент  $c_{ik}$  которой равен единице (см. рис. 4).

Предъявляя каждый входной сигнал  $\bar{X}_i$  на входы рецепторных элементов нейронной сети, мы будем иметь (при условии, что сеть уже обучена) определенную комбинацию возбужденных и невозбужденных анализирующих элементов. Представим каждую такую комбинацию вектором  $\bar{P}_i = \langle p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,(m-1)3} \rangle$ . Тогда  $k$ -я

	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_{(m-1)3}$
$q_1$	1	1	1
$q_2$	1	1	1
$\vdots$			
$q_n$	1	1	1

Рис. 4. Матрица смежности  $|C|$  полного двудольного графа  $G$ .

компонента  $p_{i,k}$  вектора  $\bar{P}_i$  будет равна либо  $\gamma_a \psi_1$ , либо нулю в зависимости от того, возбужден или нет  $k$ -й анализирующий элемент при поступлении  $i$  входного сигнала  $x_i$ . Положим теперь, что каждая вершина  $\varphi_k$  графа  $G$  имеет свой вес, причем этот вес равен значению компоненты  $p_{i,k}$  вектора  $\bar{P}_i$ . В результате получим, что при поступлении первого входного сигнала  $\bar{X}_1$  веса вершин  $\varphi_k$  графа  $G$  будут определяться вектором  $\bar{P}_1 = \langle p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,(m-1)3} \rangle$  и т. д., при поступлении  $n$  входного сигнала  $\bar{X}_n$  веса вершин  $\varphi_k$  графа  $G$  будут равны соответствующим компонентам вектора  $\bar{P}_n = \langle p_{n,1}, p_{n,2}, \dots, p_{n,(m-1)3} \rangle$ .

Будем считать, что при поступлении на входы нейронной сети первого входного сигнала  $\bar{X}_1$  должен отвечать только первый реагирующий элемент и т. д., при поступлении  $n$  входного сигнала  $\bar{X}_n$  должен возбуждаться только  $n$  реагирующий элемент. Специфика связей между анализирующими и реагирующими элементами нейронной сети заключается в том, что к тормозным входам  $i$  реагирующего элемента подключаются выходы только тех анализирующих элементов, которые не возбуждены при поступлении  $i$  входного сигнала  $\bar{X}_i$ . В связи с этим алгоритм поиска необходимой структуры связей между указанными элементами можно представить в следующем виде.

1. Полагаем  $i = 1$ . Переходим к п. 2.
2. Предъявляем входной сигнал  $\bar{X}_i = \langle x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m} \rangle$ . Переходим к п. 3.
3. Формируем вектор  $\bar{P}_i = \langle p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,(m-1)3} \rangle$ . Переходим к п. 4.
4. Полагаем  $k = 1$ . Переходим к п. 5.
5. Если  $p_{i,k} = 0$ , переходим к п. 7. Если  $p_{i,k} \neq 0$ , переходим к п. 6.
6. Полагаем соответствующий элемент  $C_{i,k}$  матрицы  $|C|$  смежности графа  $G$  равным нулю.
7. Если  $k = (m-1) \cdot 3$ , переходим к п. 9. Если  $k < (m-1) \cdot 3$ , переходим к п. 8.

8. Полагаем  $K = k + 1$ . Переходим к п. 5.
9. Если  $i = n$ , переходим к п. 11. Если  $i < n$ , переходим к п. 10.
10. Полагаем  $i = i + 1$ , переходим к п. 2.
11. Конец алгоритма.

Из приведенного алгоритма видно, что поиск и обнуление соответствующих элементов  $c_{i,k}$  матрицы  $|C|$  означает устранение ненужных связей из общего числа всех возможных соединений между анализирующими и реагирующими элементами нейронной сети, которое определяется матрицей смежности  $|C|$  полного двудольного графа  $G$ . В результате действия алгоритма получаем такую матрицу смежности, которая определяет искомую структуру синаптических связей между анализирующими и реагирующими элементами нейронной сети для заданного множества входных сигналов  $\bar{X}_i$ .

Согласно приведенному алгоритму для осуществления поиска необходимой структуры синаптических связей необходимо иметь множества векторов  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ . Эти векторы, как указывалось выше, получают при анализе состояний соответствующих анализирующих элементов, по мере поступления множества входных сигналов  $\bar{X}_i$  на входы нейронной сети. При этом нейронная сеть должна быть уже обучена. А так как в ее обучении важную роль играют значения пейсмекерных потенциалов, то при поиске необходимой структуры соединений между анализирующими и реагирующими элементами деятельность пейсмекерных нейронов является определяющей. Более того, анализ алгоритма работы нейронной сети показывает, что для успешного ее функционирования важны не только конкретные значения пейсмекерных потенциалов  $\Psi_1, \Psi_2$ , но и сам факт их наличия.

На основании изложенного можно заключить, что специфика заданного множества входных сигналов отображается в нейронной сети, с одной стороны, в виде изменения до определенного значения эффективности синаптических весов  $\gamma_a, \gamma_p$  возбуждающих входов анализирующих и реагирующих элементов, с другой — в виде установления необходимой структуры синаптических связей между выходами анализирующих элементов и тормозными входами реагирующих элементов. Иными словами, в нейронной сети, как и в ее биологическом прототипе, под воздействием внешних стимулов меняется эффективность и структура синаптических связей между нейронами, т. е. осуществляется процесс самоорганизации, в результате которого нейронная сеть приобретает способность распознавать заданное множество входных сигналов. При этом важную роль играет деятельность пейсмекерных нейронов и значения генерируемых ими потенциалов. Моделирование процесса самоорганизации нейронной сети на цифровой ЭВМ ЕС-1020 полностью подтвердило справедливость изложенных результатов.

Список литературы: 1. *Куффлер С. Д., Николс Д.* От нейронов к мозгу. — М.: Мир, 1979. — 439 с. 2. *Kunihiko Fukushima.* Cognitron: A Self — organizing Multilayered Neural Network. — Biol. Cybernetics, 1975, 20, № 314, p. 121—136. 3. *Соколов Е. Н.* Роль пейсмекерных функций в самоорганизации нервных механизмов. — Проблемы адаптивного управления, 1974, с. 32—48. 4. *Кирве-*

Н. В. СКОРОБОГАТОВА

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МИГРАЦИИ СЕМЕЙ

Среди наиболее актуальных проблем народонаселения важное место занимает формирование рациональной системы расселения, способствующей решению главной задачи нашего общества — построению и развитию коммунизма, повышению уровня жизни народа. Одним из факторов, определяющих преобразование общества, является миграция населения, которая влияет на такие процессы, как обеспечение рациональной занятости населения, рост производительности общественного труда и т. д.

Миграция населения представляет собой процесс перемещения людей через границы тех или иных территорий со сменой навсегда или на длительное время постоянного места жительства либо с регулярным возвращением к нему. Миграция может как способствовать, так и препятствовать оптимизации демографической структуры населения, она изменяет численность жителей, их состав по полу и возрасту, семейному состоянию. Этот процесс может осуществляться одиночками и семейными.

Весьма актуальным является изучение миграции семей, так как большую часть жизни человек проводит в семье и многие общественные процессы так или иначе затрагивают эту ячейку общества. Определить особенности воздействия миграции на формирование и изменение семейного состава населения данного региона возможно только, выявив направленность и интенсивность миграции, а также причины, вызывающие это явление.

Но механизм миграции не всегда можно изучить со всей полнотой на основании имеющейся информации: данных переписи населения, отрывных талонов листков прибытия и выбытия. Тем не менее материалы, полученные в результате переписей населения, позволяют изучить миграцию в целом по всему населению за межпереписной период, но сфера приложения труда, распределение по полу, по семейному состоянию мигрантов в них не учитываются. На основе данных переписи можно определить сальдо миграции — показатель, который является контрольным при изучении этого процесса с помощью других источников информации.

Текущий учет передвижений населения ведется с помощью адресных листков на прибывших и выбывших в момент прописки или выписки и отрывных талонов к ним. Сведения о миграции населения, полученные с помощью текущего учета, содер-

жат большой объем сопоставимых и единообразных данных, позволяющих изучить закономерности миграционных потоков населения и их состав: половозрастной, семейный и т. д. Но качество текущего учета в настоящее время не может быть признано удовлетворительным, так как не точно регистрируются мигранты в сельской местности, не раскрываются причины переезда и т. п. На основе данных отрывных талонов листов прибытия и выбытия нет возможности глубоко изучить механизм, направление миграции населения, определить удельный вес семейных мигрантов в общем их числе, выявить взаимосвязь механического и естественного движения населения и ряд других характеристик.

Процесс перемещения людей можно изучать также по материалам статистики труда, транспортной, статистики, данных отделов кадров предприятий, различных списков и др. Но все эти данные учитывают лишь отдельные группы населения и зачастую однобоко. Поэтому их использование не всегда целесообразно.

Если на основании этих материалов трудно изучить миграцию одиночек, то процесс миграции семей исследовать просто невозможно.

Специальные выборочные обследования являются эффективным дополнением к существующему статистическому учету, так как проводятся они по специальной широкой программе, направленной на решение задач, соответствующих цели исследования, и требуют значительно меньше средств, чем сплошные. Выборочные наблюдения позволяют на основе изучения части единиц совокупности судить о всей совокупности в целом. Но при этом необходимо, чтобы выборочная совокупность была репрезентативна и характеризовала генеральную. Тогда выводы дают возможность выявить закономерности общественных процессов, судить о характерных связях и зависимостях.

В настоящее время кафедра планирования народного хозяйства Донецкого госуниверситета проводит работу по изучению миграции семей и ее влиянии на демографические процессы. Исследование осуществляется в двух направлениях: изучаются прибывающие и выбывающие из г. Донецка семьи с помощью саморегистрации; изучаются семьи, прибывшие в г. Донецк в 1976—1978 годах.

В качестве объекта исследования выбран г. Донецк, областной центр Донецкой области, один из крупнейших по величине и значению городов Украины. Его площадь 535 кв. км, население насчитывает 1 млн. 21 тыс. человек. Донецк — это административный и промышленный центр Донбасса, всесторонне развитый территориально-промышленный комплекс. Наряду с угольной и металлургической промышленностью здесь развито машиностроение, химическая, легкая, пищевая и строительная индустрия. Донецк — крупный транспортный узел, соеди-

няющий его со многими городами и районами страны. Современный Донецк — один из крупнейших центров науки, образования, культуры. Но кроме развитой отраслевой структуры народного хозяйства г. Донецк располагает благоприятными природно-климатическими условиями, высокой обеспеченностью детскими дошкольными учреждениями, здесь имеются все условия для получения образования и т. д. Все это объясняет большой приток сюда мигрантов, в том числе и семейных. Высокий уровень зарплаты, наличие основных жизненных благ способствуют высокой приживаемости мигрантов в г. Донецке. Такие региональные особенности города обусловили выбор его в качестве объекта исследования. Донецк является характерной единицей для области и мы можем ограничить им рамки исследования в изучении миграции семей. Предполагается, что разработанные в результате исследования рекомендации можно будет использовать для проведения обследований больших городов подобного типа.

Кроме изложенного, для обеспечения репрезентативности, полученной в результате исследования информации, существенным является правильное определение объема выборочной совокупности по числу единиц. При собственно-случайном бесповторном отборе он определяется с помощью формулы

$$n = \frac{t^2 \sigma^2 N}{N \Delta^2 + t^2 \sigma^2},$$

где  $t$  — коэффициент доверия;  $\sigma$  — дисперсия;  $N$  — объем генеральной совокупности;  $\Delta$  — предельная ошибка выборки.

Гарантийная вероятность, принимаемая нами,  $\phi(t) = 0,954$ , тогда  $t = 2$ .

Дисперсия определена ориентировочно. В исследуемой совокупности в среднем колеблемость признака принята равной 60%, что позволит в результате последующих расчетов число семей, подлежащих обследованию, получить не заниженным. Среднее квадратическое отклонение определим по формуле

$$\sigma = \frac{\bar{XV}}{100},$$

где  $V$  — коэффициент вариации;  $\bar{X}$  — средний коэффициент семейности в генеральной совокупности\*.

\* Коэффициент семейности по материалам областного статистического управления находится на уровне 3,5 по Донецкой области. Проведенное обследование развития семей Донецкой области под руководством проф. Карапетяна А. Х. и доц. Голуб Л. А. в 1975—1976 гг. показало, что коэффициент семейности у семей, прибывших на постоянное место жительства в Донецк, равен 2,9. Чтобы не допускать большой погрешности, мы сочли возможным принять коэффициент семейности для генеральной совокупности семей мигрантов равным 3,0. Расчет произведен на основании коэффициента семейности по УССР, равного 3,6 (данные последней переписи населения), поправленного на коэффициент 0,82 (2,9 : 3,5). Тогда  $3,6 \times 0,82 = 2,952 \approx 3,0$  чел.

В результате среднее квадратическое отклонение равно

$$\sigma = \frac{3,0 \times 60}{100} = 1,8 \text{ чел.},$$

а дисперсия  $\sigma^2 = 3,24$ .

Объем генеральной совокупности ( $N$ ), численность прибывших и выбывших примем равным 86 тыс. человек\*.

Предельная ошибка выборки ( $\Delta$ ) не должна превышать 10% от среднего генерального коэффициента семейности. Зададимся предельной ошибкой, равной 0,08. Объем выборочной совокупности

$$n = \frac{2^2 \times 1,8^2 + 8600}{86000 \times 0,08^2 + 2^2 \times 1,8^2} = 1978 \text{ чел.}$$

Следовательно, в 954 случаях из 1000 при объеме выборки 1978 человек выборочная средняя будет отличаться от генеральной средней на 0,08. Коэффициент семейности в выборочной совокупности находится в пределах

$$\bar{X} + \Delta > \bar{X} > \bar{X} - \Delta, 3,0 + 0,08 > \bar{X} > 3,0 - 0,08,$$

$$3,08 > \bar{X} > 2,92.$$

Исходя из выборки 1978 человек и коэффициента семейности 3,0 можно сказать, что выборочным обследованием достаточно охватить 659 семей (1978 : 3,0).

Учитывая, что информация, полученная в результате данного обследования, будет достаточно глубокой в том случае, если она широко охватывает стороны изучаемого явления, анкета для опроса мигрирующих семей содержит 4 группы вопросов.

1. Сведения о переезжающих членах семьи, дающие представление о ее составе,— численном, половозрастном; сведения об образовательном уровне каждого члена семьи, доходе семьи и т. п.

2. Чисто «миграционные» вопросы, т. е. дающие сведения о направлении передвижения семьи, времени проживания на последнем месте жительства, о причинах переезда.

3. Сведения, дающие представление об условиях жизни семьи на последнем месте жительства и предполагаемом.

4. Демографические данные о переезжающей семье, позволяющие непосредственно сделать выводы о влиянии миграции семьи на ее демографическое поведение.

Второе направление нашего исследования направлено на изучение приживаемости мигрирующих семей в г. Донецке. Известно, что под приживаемостью понимают процесс перехода новоселов в состав постоянных жителей мест вселения. Целью

\* Значение численности прибывших и выбывших взято условно.

изучения приживаемости является выяснение факторов, влияющих на этот процесс, так как приживаемость новоселов характеризует уровень жизни в месте вселения. Кроме того, изучению предполагается подвергнуть демографическое поведение семей за три года их проживания в данном населенном пункте, проследить корреляционную связь между коэффициентами оседлости, рождаемости, брачности и другими в пункте прибытия.

Нами разослано 1000 писем семьям, прибывшим на постоянное место жительства в г. Донецк три года назад. Обратная связь с респондентами продолжается. Обработка полученных материалов будет производиться по намеченной программе.

*Поступила в редколлегию 29.09.80.*

УДК 62.501

Т. Г. МАЩЕНКО

### РЕЛАКСАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ БИОИНФОРМАЦИИ

При обработке медикобиологической информации в большинстве случаев применяют машинные методы с использованием ЭВМ. С этой целью разработан алгоритм идентификации параметров исследуемого объекта.

Алгоритм идентификации должен, во-первых, обеспечить абсолютную (т. е. по всей области значений входов  $x_i$ ) сходимость оценки  $k_i$  к параметрам  $h_i$ . Если сходимость обеспечивается до какой-то минимальной ошибки, желательно иметь возможность оценки погрешности метода. Во-вторых, характеристики объекта исследования должны продолжать уточняться в замкнутой системе (при замыкании обратной связи). В-третьих, вычислительная реализация алгоритма должна быть настолько простой, чтобы можно было использовать для построения реальные вычислительные машины. В-четвертых, увеличение числа входных переменных должно приводить к пропорциональному повышению качества вычислений.

Этим требованиям удовлетворяют адаптивные модели, для реализации которых используются достаточно простые алгоритмы, позволяющие синтезировать модели объектов большой размерности. Кроме того, положительным свойством этих алгоритмов является большая помехозащищенность и простота учета дополнительных факторов. Принцип обратной связи, лежащий в основе процедуры уточнения, позволяет отстраиваться от всех помех, спектр которых ниже частоты среза алгоритма адаптации, т. е. практически ниже тактовой частоты уточнения.

В работе [1] предложены методы синтеза адаптивных алгоритмов, основанные на различных принципах. Вычислительные схемы этих методов просты и удобны для использования вычислительной техники. Алгоритмы релаксации, предложенные

в [2], являются более простыми в выборе весового параметра  $\rho_{\text{opt}}$ , существенно влияющего на состоятельность процедуры сходимости и ее скорость. Выбор весового параметра осуществляется в интервале  $[0, 2]$ . Кроме того, особенностью релаксационных алгоритмов при синтезе адаптивных моделей производственного процесса является возможность учета не всей предыдущей информации об объекте, а лишь ее необходимой части или вновь поступающей. Это выгодно отличает их от большинства итерационных алгоритмов оценки, тесно связанных с рекуррентной формой метода наименьших квадратов.

Рассмотрим использование алгоритма релаксации для исследования и обработки медико-биологической информации. Каждый адаптивный алгоритм имеет свою ограниченную область применимости, так как, во-первых, процесс итерации может оказаться расходящимся для данной системы, во-вторых, сходимость процесса может быть настолько медленной, что в практических условиях оказывается невозможным достигнуть удовлетворительной близости к решению.

Точность построения адаптивной модели методом релаксации характеризуется величиной абсолютной погрешности  $\|a - a^*\|$ , где  $a$  — параметр, описывающий объект;  $a^*$  — оценка этого параметра, величиной невязки  $\|\nabla J(a_n)\|$  или  $J$  невязки  $a - a^* = \Delta(a) = J(a)$ .

Релаксационный эффект шага  $(a_n, a_{n+1})$  в значительной степени зависит от множителя релаксации  $\rho$ . Алгоритм релаксации, в частности алгоритм Качмажа, имеет следующий вид:

$$a_{n+1} = a_n - \rho \frac{J(a_n) - J^*}{\|\nabla J(a_n)\|^2} \nabla J(a_n). \quad (1)$$

Для сходимости алгоритма необходимо выполнить условие  $0 \leq \rho \leq 2$ . Будем оценивать степень близости получаемых значений коэффициентов к оптимальным по величине

$$J_{n+1} = (V_n, V_n) = (V_{n+1}, V_{n+1}); V_n = a_n - a^*; V_{n+1} = a_{n+1} - a^*. \quad (2)$$

Для сходимости алгоритма необходимо, чтобы  $J_{n+1}$  было отрицательно. Тогда относительно ошибок оценивания коэффициентов алгоритма (1) получается следующим образом

$$V_{n+1} = V_n - \rho \frac{J(a_n) - J^*}{(\nabla J(a_n), \nabla J(a_n))}. \quad (3)$$

Возведя обе части в квадрат, получим

$$\begin{aligned} (V_{n+1}, V_{n+1}) = (V_n, V_n) - 2\rho \frac{J(a_n) - J^*}{(\nabla J(a_n), \nabla J(a_n))} (\Delta J(a_n), a_n - a^*) + \\ + \rho^2 \frac{(J(a_n) - J^*)^2}{\|(\nabla J(a_n), \nabla J(a_n))\|^2} (\nabla J(a_n), \nabla J(a_n)) \leq (V_n, V_n) - (2 - \\ - \rho) \rho \frac{|J(a_n) - J^*|^2}{(\nabla J(a_n), \nabla J(a_n))}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим выражение для  $(V_{n+1}, V_{n+1})$  в (3):

$$J_{n+1} \geq (2-p) \rho \frac{(J(a_n) - J^*)^2}{(\nabla J(a_n), \nabla J(a_n))}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что  $0 \leq p \leq 2$ .

Крайние случаи в этом выражении, когда  $p = 0$  и  $p = 2$ ,  $J_{n+1} = 0$ . При  $p < 1$  имеет место нижняя релаксация, при  $p = 1$  — полная,  $p > 1$  — верхняя релаксация.

Метод полной релаксации является наиболее удобным, так как он обеспечивает максимальное уменьшение функции невязки за один шаг. В качестве критерия идентификации можно принять квадратичную функцию от невязки  $\varepsilon_{n+1} = y_{n+1} - a^T X_{n+1}$ . Алгоритм (1) принимает вид

$$a_{n+1} = a_n + \rho \frac{y_{n+1} - (a_n, x_{n+1})}{\|x_{n+1}\|^2} x_{n+1}. \quad (6)$$

Построение адаптивной модели для медико-биологической информации производили с помощью ЭВМ методом статистического моделирования. Эта модель, полученная на основе (6) методом релаксации ( $p = 0,8$ ), имеет следующий вид:  $y = 0,351x_1 + 0,292x_2 + 0,619x_3 + 0,144x_4 + 0,512x_5$ , где  $y$  и  $x_{1..5}$  информативные параметры исследуемого объекта.

Релаксационные алгоритмы можно использовать при обработке электрокардиограмм, энцефаллограмм.

**Список литературы:** 1. Райбман Н. С. Типовая идентификация объектов управления. — В кн.: Теория и применение адаптивных систем. Алма-Ата, 1971, с. 18—25. 2. Аведьян Э. Д. Релаксационные алгоритмы идентификации линейных объектов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1972. — 18 с.

Поступила в редколлегию 09.04.81.

УДК 681.325

ВАХИД АХМАД, В. Г. ВОРОНОВ, д-р техн. наук, А. И. КОРДЮМОВ,  
Л. В. ДЕРБУНОВИЧ, канд. техн. наук

### ПРИНЯТИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ИНФАРКТЕ МИОКАРДА

Медицинская диагностика обладает той степенью сложности, которая часто не позволяет принять правильное решение на основе точных алгоритмических методов. Кроме того, большое число симптомов, совпадающих при различных болезнях, и их сочетание создают дополнительные трудности для принятия правильного решения.

Несовершенство медицинских знаний приводит к тому, что алгоритм, основанный на неполной информации, не может претендовать на абсолютную достоверность. Методы медицинских и лабораторных исследований отличаются друг от друга,

поэтому результаты, полученные по любому алгоритму, тоже могут отличаться. Необходимо отдать предпочтение тому алгоритму, который вместо абсолютного диагноза в каждом конкретном случае отражал бы неопределенности, возникающие из-за отсутствия необходимых данных, медицинских знаний или неопределенности результатов исследований.

Существует множество алгоритмов для определения номенклатуры симптомов и синдромов, стадий патологического процесса, характера динамики, локализации инфаркта и изучения динамики инфаркта миокарда в целях прогнозирования его исхода [1]. Однако все эти алгоритмы имеют общий недостаток, заключающийся в том, что на основании первичных данных (измерение параметров электрокардиосигнала (ЭКС)) ставят в однозначное соответствие полученные признаки с клинико-электрокардиографическими симптомами и синдромами.

Во многих случаях в медицинской диагностике возникают неопределенные границы между различными заболеваниями и даже между различными состояниями одного и того же заболевания. Попытки искусственно создать на основе небольшого объема статистических данных границы между заболеваниями приводят к появлению значительных ошибок при постановке диагноза. В данной статье для исключения упомянутых недостатков предлагается качественно-количественный алгоритм диагностики инфаркта миокарда с использованием нечеткого алгоритма.

При описании алгоритма приняты следующие обозначения, определяющие характер патологии, стадий патологического процесса и характер динамики патологического процесса:  $D_1$  — крупноочаговый инфаркт миокарда с преобладанием неповрежденной мышечной ткани;  $D_2$  — крупноочаговый инфаркт миокарда с преобладанием некротизированной мышечной ткани;  $D_3$  — проникающий крупноочаговый инфаркт миокарда;  $D_4$  — в «инфарктных отведениях» поражение субэпикардального слоя миокарда (мелкоочаговое);  $D_5$  — в «инфарктных отведениях» поражение субэпикардального слоя миокарда (крупноочаговое);  $D_6$  — а) в «инфарктных отведениях» поражение субэндокардиального слоя миокарда, б) в «дискордонтных отведениях» зеркальное отображение поражения противоположной стенки левого желудочка;  $D_7$  — острая стадия субэпикардального или проникающего инфаркта миокарда;  $D_8$  — первая фаза эволюции (подострой стадии) субэпикардального или проникающего инфаркта миокарда;  $D_9$  — вторая фаза эволюции (подострой стадии) субэпикардального или проникающего инфаркта миокарда;  $D_{10}$  — третья фаза эволюции (подострой стадии) субэпикардального или проникающего инфаркта миокарда. Эта же картина может сохраняться и в рубцовой стадии;  $D_{11}$  — острая стадия субэпикардального инфаркта миокарда;  $D_{12}$  — первая — вторая фазы эволюции (под-

острой стадии) субэндокардиального инфаркта миокарда;  $D_{13}$  — увеличение зоны некроза в результате рецидивирующего инфаркта миокарда;  $D_{14}$  — нормальная эволюция субэпикардиального или проникающего инфаркта миокарда в острой и подострой стадиях;  $D_{15}$  — нормальная эволюция субэндокардиального инфаркта миокарда в острой и подострой стадиях;  $D_{16}$  — уменьшение зоны некроза.

Алгоритм состоит из двух частей, основан на анализе амплитуд и форм зубцов и сегментов ЭКС и исходит из того, что у данного пациента, находящегося под наблюдением, уже установлен инфаркт.

В первой части алгоритма (рис. 1) на основе некоторых признаков однозначно определяется одно из состояний инфаркта, либо после того, как обнаруживается неопределенность между двумя состояниями, переходят ко второй части алгоритма, в которой определяется принадлежность пациента к тому или иному состоянию инфаркта (нечеткий алгоритм).

Алгоритм функционирует следующим образом:

1. Номеру исследуемого отведения присваивается значение 0.

2. Проверяется выполнение условия  $t=49$ , означающее проверку всех отведений. Если «Да», то программа заканчивается, в противном случае номер отведения увеличивается на 1.

3. Проверяется выполнение условия отличия от нуля амплитуды зубца  $Q$ . Если «Да», то проверяется отличие от нуля амплитуды зубца  $R$ , в противном случае проверяется поднятие сегмента  $RS - T$  над изолинией.

4. Если амплитуда зубца  $R$  отлична от нуля, то приходим к нечеткому алгоритму определения функций принадлежности  $D_1$  и  $D_2$ , в противном случае делаем заключение о диагнозе  $D_3$ .

5. Проверяем, поднят ли сегмент  $RS - T$  над изолинией. Если «Да», определяем  $D_5$ , в противном случае определяем равенство сегмента  $RS - T$  нулю или же его отклонение в обе стороны от изолинии на 1 мм.

6. Если после шага 3 зубец  $Q$  отсутствует и одновременно сегмент  $RS - T$  поднят над изолинией, тогда переходим к нечеткому алгоритму определения функций принадлежности  $D_4$  и  $D_5$ .

7. После выполнения шагов 5 и 6 проверяются условия положительности зубца  $T$ . Если «Да», то приходим к нечеткому алгоритму определения функций принадлежности  $D_7$  и  $D_8$ . В противном случае проверяется условие равенства нулю зубца  $T$ , или же его отклонение одновременно в обе стороны от изолинии, причем при положительном ответе определяем  $D_8$ , при отрицательном — делаем заключение о  $D_9$ .

8. Если сегмент  $RS - T$  равен нулю или отклонен в обе стороны от изолинии, тогда проверяем зубец  $T$ . Если он поло-

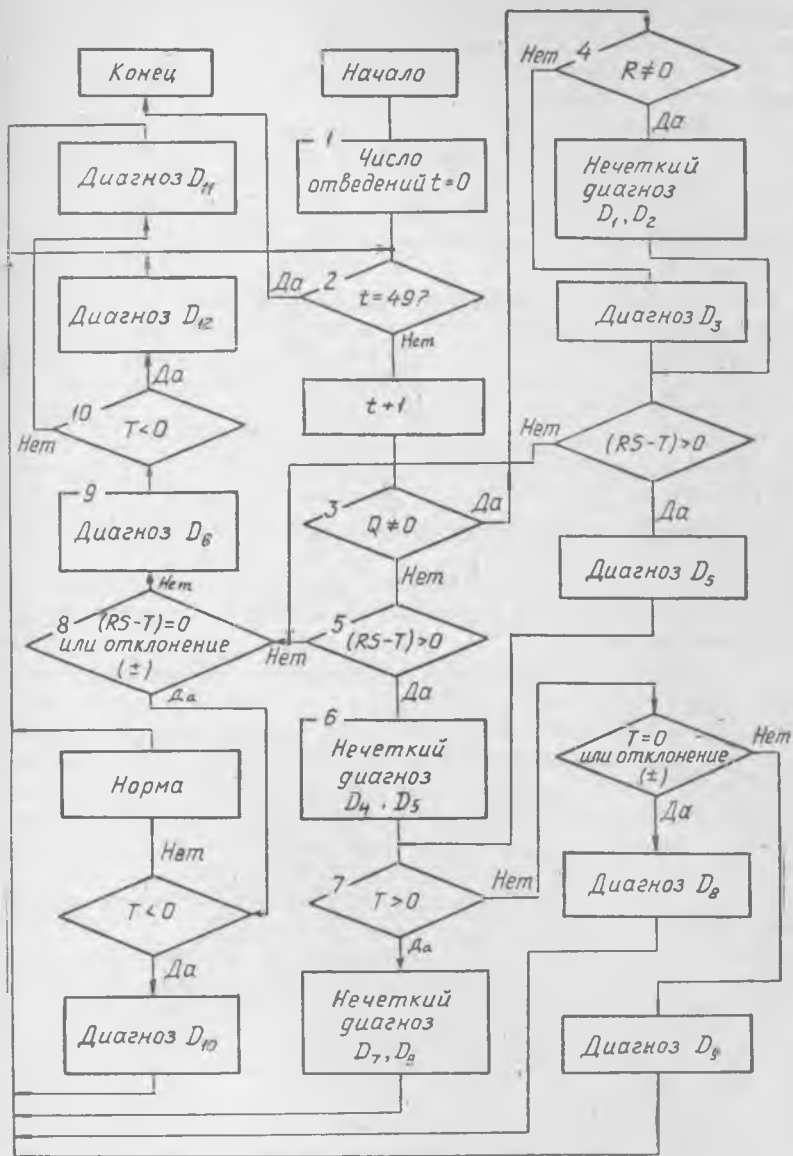


Рис. 1. Алгоритм диагностирования патологических состояний при инфаркте миокарда (I этап)

жителен, ставим диагноз  $D_{10}$ , в противном случае считаем, что данное отведение в норме.

9. В случае отрицательной проверки условия шага 8 делаем заключение о диагнозе  $D_6$ .

10. Проверяем условие отрицательности зубца  $T$ . Если «Да», то делаем заключение о диагнозе  $D_{12}$ , в противном случае ставим диагноз  $D_{11}$ .

11. После выполнения каждого цикла, заканчивающегося диагнозом отведения, результат выводим на печать и возвращаемся к шагу 2.

Для определения характера динамики патологического процесса производим запись ЭКС в момент времени  $\tau_1$  с последующей его обработкой. После истечения необходимого времени производим повторную запись ЭКС в момент времени  $\tau_2$ . Сравнивая два ЭКС по второй части алгоритма, устанавливаем диагнозы  $D_{13} - D_{16}$  (рис. 2).

Нечеткий алгоритм определяет функцию принадлежности пациента к той или иной стадии заболевания (в данном алгоритме это неопределенность между стадиями  $D_1$  и  $D_2$ ,  $D_4$  и  $D_5$ ,  $D_7$  и  $D_8$ ).

Нечеткий алгоритм состоит из двух частей. В первой части на основании статистических данных строят симптоматические поверхности, задающие значения функции принадлежности  $\mu_i(p_{ij})$  на всем пространстве симптомов. Выполнение первой части алгоритма производится в подготовительный период с учетом симптомов пациентов, уже прошедших курс лечения и подтвердивших диагноз результатами лечения. Вторая часть алгоритма служит для вычисления функции принадлежности вновь поступившего пациента с определенным набором симптомов к одному из возможных диагнозов. Результаты выполнения первой части алгоритма, необходимые для использования во второй части, хранятся в памяти вычислительной машины. Более подробно нечеткий алгоритм описан в [2].

Данный алгоритм предоставляет возможность качественно-количественного анализа предварительно обработанного ЭКС и позволяет ставить диагноз в тех случаях, когда последний является неопределенным между двумя состояниями болезни. Хотя включение нечеткого критерия до некоторой степени усложняет данный алгоритм диагностики и приводит к увеличению объема памяти специализированного устройства, возможность диагностирования неопределенных ситуаций, которые не решаются существующими алгоритмами, дает ему преимущество перед известными алгоритмами. Использование нечеткого алгоритма диагностики перспективно при диагностировании заболеваний, между которыми невозможно установить четкие границы, а также при диагностике относительно редких заболеваний, когда накопление достаточного объема статистических данных не представляется возможным.

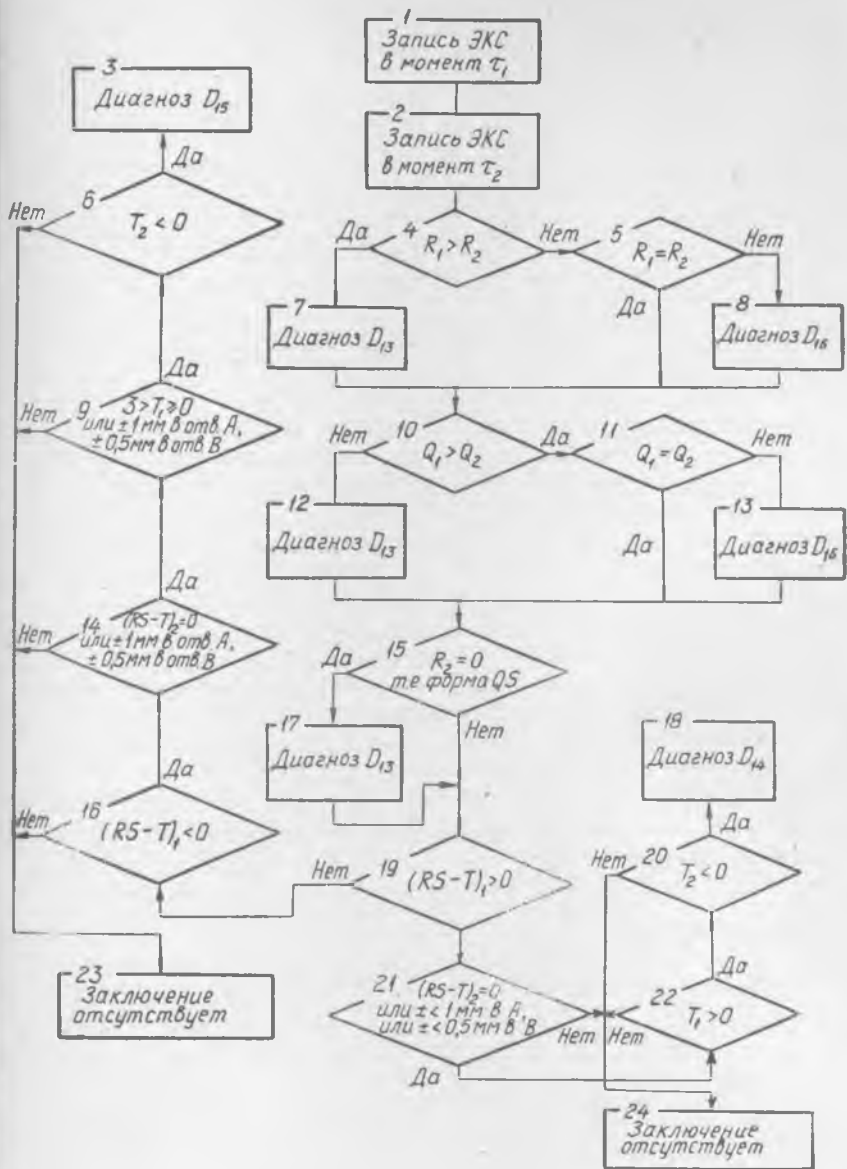


Рис. 2. Алгоритм определения характера динамики патологического процесса

Список литературы: 1. Малая Л. Т., Воронов В. Г., Мендлин М. С. О кодировании биомедицинской информации на примере ЭКГ при инфаркте миокарда. Сообщение 2. — Проблемы бионики, 1977, вып. 22, с. 42—50. 2. Вахид Ахмад, Кордюмов А. И. Антосик В. В. Исследование и разработка системы сбора и передачи информации в ЭВМ. Депон. отчет, № 79063896.— 82 с.

Поступила в редколлегию 03.03.80.

УДК 681.3.068

Е. Г. КАЧКО, канд. техн. наук, Ю. С. МАРЧЕНКО

## СИСТЕМА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВКУСОВОГО АНАЛИЗАТОРА.

### Сообщение 1

Изменение чувствительности вкусового анализатора человека, как правило, бывает связано с некоторыми заболеваниями. Расстройства вкуса часто предшествуют появлению других симптомов, связанных с заболеваниями, поэтому могут использоваться для их ранней диагностики [1]. При построении медицинских диагностических систем обычно не учитываются данные исследования вкуса, что ухудшает эффективность систем и уменьшает их надежность. В статье предлагается язык описания данных объективного исследования вкусового анализатора и транслятор с этого языка. Сообщение 1 посвящено описанию языка и правил формирования понятий на этом языке. Приводятся примеры записи данных обследования вкусового анализатора в случае различных заболеваний.

При разработке языка учитывались следующие требования: простота и доступность языка для непрограммистов; простота построения транслятора.

### Описание языка.

Алфавит языка. 1. Буквы русского и латинского алфавитов. 2. Арабские цифры 0|1|2|3|4|5|6|7|8|9. 3. Разделители:—,|,|∇|:|\*|L|\*|E|\*|&. 4. Ключевые слова: ОБЩИЙ МЕТОД, ЛЕВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ МЕТОД, ПРАВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ МЕТОД, ПЛЕТИЗМОГРАФИИ МЕТОД, СЛАДКОЕ, КИСЛОЕ, СОЛЕНОЕ, ГОРЬКОЕ, ПОЯВЛЕНИЕ РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ, СДВИГ МАКСИМАЛЬНЫЙ В СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЕ, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ, ВЕЛИЧИНА РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ, САХАР, ГЛЮКОЗА, ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ, ВИННАЯ КИСЛОТА, СОЛЯНАЯ КИСЛОТА, ХИНИН СОЛЯНО-КИСЛЫЙ.

Конструкции языка. 1. Числа. Правила записи чисел такие же, как в математике, только для отделения целой части от дробной используется точка, а не запятая. Например, запись 0,375 обозначает ноль целых и триста семьдесят пять тысячных. При записи очень маленьких чисел с большим количеством нулей после точки используют запись типа мантисса Е порядок, где мантисса — число с десятичной точкой или без нее; порядок — целое число, содержащее не более двух цифр и знака, который

может отсутствовать. Например, число 0,000375 может быть записано так: 375E-6 (правила записи чисел в языке заимствованы из ФОРТРАНа).

2. *Операторы языка.* При разработке операторов языка учитывались три метода обследования вкусового анализатора: общий, капельный, метод плетизмографии.

Рассмотрим операторы языка для описания данных, полученных общим и капельным методами. При описании операторов используется единая система обозначений. Эти обозначения описывают структуру операторов, т. е. указывают порядок, в котором конструкции могут или должны появляться, и требуемую пунктуацию. Параметр, заключенный в квадратные скобки, может быть опущен, а из параметров, заключенных в фигурные скобки, должен быть выбран только один.

Общий вид оператора для общего и капельного методов:

метод компонента:[ [эталон:] константа,], [компонента:[ [эталон:] константа,]],

Метод указывается с помощью ключевых слов:

{ ПРАВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ МЕТОД  
ЛЕВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ МЕТОД  
ОБЩИЙ МЕТОД }

При указании метода достаточно записать четыре первые буквы из его названия, возможно написание большого числа букв. Допускается также полное название метода. Например, записи ОБЩИ, ОБЩИЙ, ОБЩИЙ МЕТОД эквивалентны.

Для указания компоненты используют ключевые слова: СЛАДКОЕ, КИСЛОЕ, СОЛЕННОЕ, ГОРЬКОЕ. Компонента может быть сокращена до первых четырех символов.

Эталон зависит от компоненты. Для компоненты СЛАДКОЕ в качестве эталона используют САХАР или ГЛЮКОЗА, если эталон не указан, то предполагается САХАР. Для компоненты КИСЛОЕ используют ВИННАЯ КИСЛОТА, если эталон не указан, то предполагается СОЛЯНАЯ КИСЛОТА. Для СОЛЕННОЕ и ГОРЬКОЕ используют по одному эталону, ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ и ХИНИН СОЛЯНОКИСЛЫЙ соответственно, эти эталоны можно не указывать. При записи компоненты допустимо сокращение до первых четырех символов.

Константа — число, которое соответствует значению пороговой чувствительности для эталона данной компоненты. Методика измерения пороговой чувствительности для различных компонент и эталонов считается заданной, язык описания не зависит от этой методики.

Рассмотрим примеры описания данных исследования вкусового анализатора, характеризующие некоторые заболевания.

Пример 1. САХАРНЫЙ ДИАБЕТ \* L ГОРЬКОЕ: 7E-5,  
ОБЩИЙ МЕТОД: СЛАДКОЕ: ГЛЮКОЗА: 1,5,  
КИСЛОЕ: ВИННАЯ КИСЛОТА: 0,01, СОЛЕННОЕ: ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ:  
0,7;  
\*

Пример 2. ОПУХОЛЬ ВОСЬМОЙ ПАРЫ НЕРВОВ \* L ПРАВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ  
МЕТОД: МЕТОД:  
ЛЕВАЯ СТОРОНА КАПЕЛЬНЫЙ ГОРЬКОЕ: 0,0008,  
МЕТОД: СОЛЕННОЕ: 2,1,  
СЛАДКОЕ: 1,2, СЛАДКОЕ: 2,4,  
КИСЛОЕ: 0,4, КИСЛОЕ: 1,7;  
ГОРЬКОЕ: 0,0002, \*  
СОЛЕННОЕ: 0,5,

Название болезни может содержать не более 78 символов из числа входящих в алфавит ЕС ЭВМ, и признаком его окончания служит после-

довательность символов \* L. Признаком окончания описания болезни служит символ \*. Каждая строка записи перфорируется на отдельной перфокарте. При описании данных исследования допускается использование с первой по семьдесят вторую колонку перфокарт. На одной перфокарте могут быть отперфорированы несколько операторов. Один оператор может быть размещен на нескольких перфокартах, при этом не допускается разрыв первых четырех символов ключевых слов и констант.

Рассмотрим оператор языка для метода плетизмографии.

Оператор начинается с указанием метода:

#### ПЛЕТИЗМОГРАФИИ МЕТОД :

Для каждой из компонент формируется запись вида: компонента : [эталон : ]

ВЕЛИЧИНА РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : константа,.

СДВИГ МАКСИМАЛЬНЫЙ В СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЕ : константа,

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : константа.

ВЕЛИЧИНА РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : константа,.

В качестве метода должны быть указаны не менее четырех первых букв имени. Вместо компоненты и эталона указывается то же, что и в случае общего и капельного методов. Правила умолчания эталонов общие и описаны при рассмотрении предыдущих операторов. Как и при общем и капельном методах, данные для некоторых компонент могут отсутствовать. Приведем пример использования оператора.

Пример 3. НАРУШЕНИЕ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ \* L

ПЛЕТИЗМОГРАФИИ МЕТОД :

СЛАДКОЕ : САХАРОЗА :

ПОЯВЛЕНИЕ РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : 5,31,

СДВИГ МАКСИМАЛЬНЫЙ В СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЕ : 14,76,

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : 35,31,

ВЕЛИЧИНА РЕАКЦИИ В СЕКУНДАХ : 0,64,

СОЛЕНОЕ :

ПОЯВЛЕНИЕ РЕАКЦИИ : 5,35,

СДВИГ МАКСИМАЛЬНЫЙ : 16,51,

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ : 38,6,

ВЕЛИЧИНА РЕАКЦИИ : 0,75,

КИСЛОЕ : СОЛЯНАЯ КИСЛОТА :

ПОЯВЛЕНИЕ : 5,39,

СДВИГ : 20,61,

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ : 43,85,

ВЕЛИЧИНА : 0,84,

ГОРЬКОЕ : ХИНИН СОЛЯНОКИСЛЫЙ :

ПОЯВЛЕНИЕ : 5,36,

СДВИГ : 16,95,

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ : 38,84,

ВЕЛИЧИНА : 0,757;

\*

При обучении системе задаются данные обследования вкусового анализатора наряду с указанием названия болезни. Кроме этого, задается шкала для определения отклонений данных обследования вкусового анализатора от нормы. Отклонения оцениваются по пятибалльной системе: норма (NORM), меньше нормы (LESS), много меньше нормы (LTLT), больше нормы (MORE), много больше нормы (GTGT).

В таблице приведены данные для определения уровня отклонений от нормы при обследовании вкусового анализатора общим и капельным методами [2].

Для примера 1 с учетом данных таблицы получаем:

для КИСЛОЕ — NORM;

для ГОРЬКОЕ — NORM;

для СЛАДКОЕ — MORE;

для СОЛЕНОЕ — MORE.

При работе системы в режиме постановки диагноза указываются лишь данные обследования. Система определяет одно или группу заболеваний, для которых характерны соответствующие отклонения от нормы. Данные обследования указываются точно так же, как при обучении системы.

Ниже приведены правила задания информации диагностической системе в режиме обучения и постановки диагноза.

**Правило 1.** При обучении системы в первой строке должно быть указано имя болезни, которое содержит не более 78 символов, за которым следует \* L.

Наименование компоненты и эталона	Уровни концентрации				
	LTLT	LESS	NORM	MORE	GTGT
Сладкое					
Сахар	До 0,2	До 0,3	До 0,9	До 1,5	Свыше 1,5
Глюкоза	До 0,2	До 0,3	До 0,9	До 1,5	Свыше 1,5
Кислое					
Винная	До 45E—4	До 8E—3	До 0,016	До 0,03	Свыше 0,03
Соляная	До 0,003	До 0,005	До 0,008	До 0,015	Свыше 0,015
Соленое					
Хлористый	До 0,08	До 0,15	До 0,35	До 0,8	Свыше 0,8
Горькое					
Хинин	До 45E—6	До 65E—6	До 1E—4	До 2E—4	Свыше 2E—4

**Правило 2.** Результаты исследования различными методами могут быть представлены в произвольном порядке, но не должны пересекаться, т. е. результаты для следующего метода могут быть указаны только после всех результатов для предыдущего.

**Правило 3.** Внутри метода данные для различных компонент могут быть указаны в произвольном порядке; если данные для какой-либо компоненты отсутствуют, то считается, что они в пределах нормы.

**Правило 4.** Для каждой компоненты может быть указан только один эталон, если он не указан, то принимается «по умолчанию».

**Правило 5.** Все ключевые слова (названия методов, компонент, эталонов характеристических реакций) могут быть сокращены до четырех первых символов и выделяются символом «:», данные для различных компонент отделяются символом «,».

**Правило 6.** После окончания информации для метода ставится символ «:», а после окончания данных о болезни или результатов обследования — символ «\*». Символ «\*» должен быть в первой позиции.

**Правило 7.** После окончания всей информации ставится символ «&», который должен быть записан в первой позиции.

**Список литературы:** 1. Марченко Ю. С. К вопросу об использовании данных патологии вкусового анализатора для машинной диагностики. — Проблемы бионики, 1970, вып. 5, с. 74—78. 2. Ловицкий В. А., Марченко Ю. С. Система диагностики и прогнозирования заболеваний по данным патологии вкусового анализатора человека. — Проблемы бионики, 1972, вып. 9, с. 46—47.

Поступила в редколлегию 08.04.81.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шабанов-Кушнаренко Ю. П.</i> О моделировании слова и преобразовании его форм	3
<i>Бондаренко М. Ф., Буркова Н. М., Шаронова Н. В.</i> Математическое описание суффиксального словообразования глаголов	8
<i>Дедиков Э. А., Чен Р. Н.</i> Организация корректирующего машинного словаря имен с помощью аддитивной функции хеширования	14
<i>Сарнавский Н. Г., Шляхов В. В.</i> Предикат бинарных отношений	20
<i>Домнин Ф. А., Поворознюк А. И.</i> Применение аппроксимирующих степенных полиномов для оценки состояния подготовки группы операторов	25
<i>Баринов А. К., Какурин Н. Я.</i> Многозначные управляющие автоматы с гибкой логикой	29
<i>Богданов Н. И.</i> Проблемная коммуникация (гомеостатическое структурирование информации)	33
<i>Лискин В. М., Тоница В. С.</i> Применение методов геометрической логики для повышения эффективности обработки визуальной информации в задачах обучения	39
<i>Бондаренко М. Ф.</i> Математическая модель словоизменения имен числительных	46
<i>Дима З. В., Осыка А. Ф.</i> Математическая модель спряжения невозвратных глаголов русского языка	53
<i>Сарнавский Н. Г., Шляхов В. В.</i> Распознавание $n$ -арных отношений	58
<i>Кривуля Г. Ф., Кузнецов А. Н.</i> Распознавание сигналов в системах контроля и диагностики	64
<i>Шабанов-Кушнаренко Ю. П.</i> О моделировании элементарных операций вычислительных машин средствами теории интеллекта	68
<i>Колотенко Г. А., Ахмедов Т. И.</i> К вопросу о моделировании иерархических систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга человека	73
<i>Василенко Ю. А., Коссей И. П.</i> Алгоритм поиска всех тупиковых тестов с малыми требованиями к памяти	81
<i>Домнин Ф. А., Поворознюк А. И.</i> Обработка результатов физиологических исследований применением модифицированного МГУА	84
<i>Ананин В. Ф.</i> Биорегуляция пупилломоторной системы человека	88
<i>Чернухин Ю. В., Галуев Г. А.</i> Об одном алгоритме самоорганизации нейронной сети	99
<i>Скоробогатова Н. В.</i> Информационная обеспеченность при изучении миграции семей	106
<i>Мащенко Т. Г.</i> Релаксационные алгоритмы обработки биоинформации	110
<i>Вахид Ахмад, Воронов В. Г., Кордюмов А. И., Дербунювич Л. В.</i> Принятие диагностического решения при инфаркте миокарда	112
<i>Качко Е. Г., Марченко Ю. С.</i> Система программирования данных исследования вкусового анализатора. <i>Сообщение I</i>	118