

007.54
1748

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

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 29

Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник

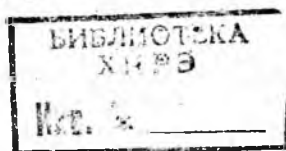
Основан в 1968 г.

XИУРЕ Problemy byonyky



B-2578-2

2578-2



КС

ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «ВИША ШКОЛА»
1982

Проблемы бионики: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 29. — Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1982. 130+6 с.

Сборник содержит результаты исследования и математического моделирования различных сторон интеллектуальной деятельности. Освещены проблемы синтаксиса и семантики словообразования, обмена информацией с ЭВМ на естественном языке. Разрабатывается аппарат и методы формального описания работы органов чувств и вегетативных систем человека. Затронут вопрос программного обеспечения модели вкусового анализатора.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1981 г.

Для научных работников и инженеров, занимающихся бионическими исследованиями с привлечением средств и методов кибернетики и вычислительной техники.

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

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

Редакция естественнонаучной литературы

Н. Г. САРНАВСКИЙ, канд. техн. наук, Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО,
д-р техн. наук, В. В. ШЛЯХОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРЕДИКАТА ДИФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

Предикат дифункциональности имеет интересные приложения при математическом моделировании работы органов чувств. Он также играет важную роль в теории идентификации динамических систем методом сравнения. В статье изучаются некоторые свойства предиката дифункциональности.

Пусть $T(x, y)$ — предикат, заданный на декартовом квадрате множества A .

Определение 1. $T(x, y)$ — дифункционален (квазитранзитивен) тогда и только тогда, когда он обладает свойством: из равенств $T(x, y) = 1$, $T(z, y) = 1$, $T(z, t) = 1$ следует, что $T(x, t) = 1$.

Теорема 1. $T(x, y)$ — дифункционален тогда и только тогда, когда существуют множество B и два отображения $f_1: A \rightarrow B$, $f_2: A \rightarrow B$ такие, что

$$T(x, y) = D_B(f_1(x), f_2(y)),$$

где D_B — предикат равенства на $B \times B$.

Доказательство. I. Достаточность очевидна. II. *Необходимость.* Пусть

$$E_0 = \{x \in A / T(x, y) = 0, \forall y \in A\}, \quad A_1 = A \setminus E_0;$$

$$E'_0 = \{y \in A / T(x, y) = 0, \forall x \in A\}, \quad A_2 = A \setminus E'_0;$$

$$A_x = \{y \in A / T(x, y) = 1\}, \quad A_y = \{x \in A / T(x, y) = 1\};$$

$E = \{E_0, A_y\}$ — множество различных классов A_y плюс E_0 и соответственно $E' = \{E'_0, A_x\}$.

Отметим некоторые свойства введенных множеств.

1. Если $E_0 = A$, то $E'_0 = A$, и наоборот. В этом случае утверждение теоремы вытекает сразу, поскольку $B = \{0, 1\}$, $f_1: A \rightarrow 0$, $f_2: A \rightarrow 1$, и тогда $T(x, y) = D_B(f_1(x), f_2(y))$.

Следовательно, в дальнейшем будем считать, что $E_0 \neq A$ и $E'_0 \neq A$.

2. Если $x_1 \neq x_2$, то либо $A_{x_1} = A_{x_2}$, либо $A_{x_1} \cap A_{x_2} = \Phi$.

3. E и E' — равномощны.

Первое свойство очевидно, второе вытекает из дифункциональности предиката $T(x, y)$, поскольку если $A_{x_1} \cap A_{x_2} \neq \Phi$, то су-

существует $y_1 \in A_{x_1} \cap A_{x_2}$, и для любого $y \in A_{x_1}$ выполняется следующее: $T(x_2, y_1) = 1$, $T(x_1, y_1) = 1$, $T(x_1, y) = 1$. Значит, $T(x_2, y) = 1$ и $y \in A_{x_2}$; а $A_{x_1} \subset A_{x_2}$. Точно так же можно доказать, что $A_{x_2} \subset A_{x_1}$. В итоге $A_{x_1} = A_{x_2}$. Это утверждение верно и для классов A_y .

Третье свойство вытекает из того, что существует взаимно-однозначное отображение между E и E' . Строится оно следующим образом: $\varphi: E \rightarrow E'$, $\varphi(E_0) = E'_0$, $\varphi(A_y) = A_x$, если $T(x, y) = 1$. Нетрудно убедиться в корректности этого определения и в том, что отображение взаимно-однозначно.

Из этих свойств следует, что E и E' — два равномогущих разбиения множества A , поэтому в качестве B можно взять одно из них, например E' плюс E_0 , т. е. $B = \{A_x, E_0, E'_0\}$. Теперь $f_2: A \rightarrow B$ строим так:

$$f_2(y) = \begin{cases} E'_0, & \text{если } y \in E'_0; \\ A_x, & \text{если } y \in A_x \subset A_2, \end{cases}$$

а $f_1: A \rightarrow B$ — так:

$$f_1(x) = \begin{cases} E_0, & \text{если } x \in E_0; \\ \varphi(A_y), & \text{если } x \in A_y \subset A_1. \end{cases}$$

Тогда $T(x, y) = D_B(f_1(x), f_2(y))$.

Проверим последнее равенство. Пусть $T(x, y) = 1$, то $x \in A_1$, $y \in A_2$ и существуют A_x и A_y такие, что $y \in A_x$, $x \in A_y$. Значит,

$$f_1(x) = \varphi(A_y) = A_x = f_2(y), \text{ т. е. } T(x, y) = D_B(f_1(x), f_2(y)).$$

Если

$$T(x, y) = 0, \text{ то } x \notin A_y, y \notin A_x \text{ и } \varphi(A_y) \neq A_x,$$

следовательно,

$$f_1(x) \neq f_2(y) \text{ и } D_B(f_1(x), f_2(y)) = 0.$$

Утверждение теоремы доказано.

Определение 2. Назовем предикат $T(x, y)$, заданный на декартовом квадрате произвольного множества A , перестановочно-дифункциональным, если существуют множества B и C и отображения $f: A \xrightarrow{na} B$, $\varphi: B \rightarrow C$ такие, что

$$T(x, y) = D_C(\varphi f(x), \varphi f(y)),$$

где f — отображение «на», φ — взаимно-однозначно, а D_C — предикат равенства на множестве $L \times L$, $L = B \cup C$.

Рассмотрим $T(x, y)$, заданный на $A \times A$.

Определение 3. H назовем левым разбиением множества A , если его элементами являются следующие классы эквивалентности: $x_1 \sim x_2$ тогда и только тогда когда $T(x_1, y) \equiv T(x_2, y)^*$.

* $T(x_1, y) \equiv T(x_2, y)$ означает равенство при любом значении « y ».

Определение 4. H_n назовем *правым разбиением множества A* , если его элементами являются следующие классы эквивалентности: $y_1 \sim y_2$ тогда и только тогда, когда $T(x, y_1) \equiv T(x, y_2)$.

Свойства $T(x, y)$: 1) если $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 1$, тогда $T(z, x_1) \equiv T(z, x_2)$; 2) если $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 1$, тогда $T(y_1, t) \equiv T(y_2, t)$; 3) если $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 1$, тогда $T(z, x_1) \equiv T(z, x_2)$ и $T(x_1, z) \equiv T(x_2, z)$; 4) если $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 1$, тогда $T(y_1, t) \equiv T(y_2, t)$ и $T(t, y_1) \equiv T(t, y_2)$.

Лемма 1. Если $T(x, y)$ дифункционален, то H_n и H_n — равносущны.

Доказательство. Пусть $A_n = \{x \in A / T(x, y) \equiv 0\}$. Заметим, что если $x_1, x_2 \in A_n$, то $x_1 \sim x_2$, поэтому $A_n \in H_n$. Аналогично $A_n = \{y \in A / T(x, y) \equiv 0\}$ и $A_n \in H_n$.

Построим теперь отображение $\theta: H_n \rightarrow H_n$ следующим образом:

$$\theta(X) = \begin{cases} A_n, & \text{если } X = A_n; \\ Y, & \text{если } X \neq A_n \text{ и для любых } x \in X, y \in Y; \\ & T(x, y) = 1. \end{cases}$$

Ясно, что определение корректно.

Пусть $X_1 \neq X_2$, однако $\theta(X_1) = \theta(X_2) = Y$, тогда для любых $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$ и $y \in Y$ $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 1$. Поскольку $X_1 \neq X_2$, то существует z такое, что $T(x_1, z) \neq T(x_2, z)$. Одно из них должно равняться 1, например $T(x_1, z) = 1$, но тогда из дифункциональности следует, что $T(x_2, z) = 1$ — противоречие. Значит, $X_1 = X_2$.

Очевидно также, для любого X существует $Y = \theta(X)$, и наоборот. Из корректности определения и из доказанных нами свойств следует взаимно-однозначность θ . Таким образом, утверждение леммы доказано.

Лемма 2. Пусть $X \neq A_n, Y \neq A_n$ и $X \cap Y = \Phi$, тогда, если $T(x, y)$ обладает свойствами 1, 2, $X = Y$.

Доказательство. Возьмем $x^* \in X \cap Y$ и любой $x \in X$. Тогда, поскольку $X \neq A_n$, то существует y такой, что $T(x, y) = T(x^*, y) = 1$ и из свойства 1 следует, что $T(z, x) = T(z, x^*)$, т. е. x и x^* лежат в одном правом классе Y . Получаем $X \subset Y$. Обратное включение доказывается аналогично при помощи свойства 2. Лемма доказана.

Лемма 3. Пусть $X \neq A_n (Y \neq A_n)$ и $X \cap A_n \neq \Phi (Y \cap A_n \neq \Phi)$. Тогда, если предикат $T(x, y)$ обладает свойствами 1, 2, $X \subset A_n \times X (Y \subset A_n)$.

Доказательство. Возьмем $\forall x \in X$ и $x^* \in X \cap A_n$. Тогда существует y такое, что $T(x^*, y) = T(x, y) = 1$ (поскольку $X \neq A_n$). Из свойства 1 следует, что x^* и x лежат в одном правом классе, но $x^* \in A_n$, значит, $x \in A_n$. Следовательно, $X \subset A_n$. Для правых классов доказательство аналогично. Лемма доказана.

Разбиение на левые классы обозначим через H_n , т. е. $H_n = \{A_n, X_1, X_2, \dots\}$. Соответственно через $H_n = \{A_n, Y_1, Y_2, \dots\}$ разбиение на правые классы.

Замечание. Будем считать, что классов счетное число, поскольку в континуальном случае ничего не меняется.

Из леммы 3 следует, что существует подпоследовательность X_{r_1}, X_{r_2}, \dots таких, что $A_n \setminus A_n = \bigcup_{i=1}^{\infty} X_{r_i}$. Аналогично $A_n \setminus A_n = \bigcup_{i=1}^{\infty} Y_{r_i}$. А из леммы 2 вытекает, что на множестве $A \setminus (A_n \cup A_n)$ разбиения H_n и H_n совпадают, обозначим эти общие классы через z_1, z_2, \dots . Теперь построим новое разбиение множества A следующим образом:

$$H = \{A_n \cap A_n, X_{r_1}, X_{r_2}, \dots, Y_{r_1}, Y_{r_2}, \dots, z_1, z_2, \dots\}.$$

Совершенно очевидно, что это — разбиение.

Теорема 2. $T(x, y)$ — дифункционален и обладает свойствами 1, 2 тогда и только тогда, когда он перестановочно-дифункционален.

Доказательство. 1. Достаточность очевидна. 2. *Необходимость.*

В качестве B возьмем H , т. е. $B = H$. Каждому элементу A поставим в соответствие его класс. Это будет отображение $f: A \rightarrow B$. Теперь отобразим классы $(A_n \cap A_n), Y_{r_1}, Y_{r_2}, \dots$ в какое-то множество M взаимно-однозначным отображением λ . Оставшиеся классы X_1, X_2, \dots отобразим в классы Y_1, Y_2, \dots отображением $\theta(X)$, построенным в лемме 1. Из этой же леммы вытекает, что оно будет взаимно-однозначным. Теперь в качестве $C = M \cup \left(\bigcup_{i=1}^{\infty} Y_i \right)$.

Тогда

$$\varphi((A_n \cap A_n)) = \lambda((A_n \cap A_n)); \varphi(Y_{r_i}) = \lambda(Y_{r_i}); \varphi(X_i) = \theta(X_i).$$

Ясно, что это взаимно-однозначное отображение из B в C . Возьмем $L = B \cup C$, тогда

$$T(x, y) = D_L(\varphi f(x), f(y)).$$

Докажем эту формулу. Пусть $T(x, y) = 1$ и $f(x) = X_i, f(y) = Y_j$. Тогда $\varphi(X_i) = Y_j$, это следует из построения φ . Пусть $T(x, y) = 0$ и $f(x) = X_i, f(y) = Y_j$. Предположим, что $\varphi(X_i) = Y_j$. Но в этом случае $T(x, y) = 1$ по построению φ — противоречие, значит, $\varphi(X_i) \neq Y_j$. Утверждение теоремы доказано.

Теорема 3. $T(x, y)$ обладает свойствами 3, 4 тогда и только тогда, когда он перестановочно-дифункционален.

Теорема эта доказывается аналогично с незначительными изменениями.

Рассмотрим теперь вопрос о перестановочно-дифункциональности предиката $T(x, y)$. Когда классы эквивалентности заданы, то $f: A \xrightarrow{\text{на}} B$ фиксировано. В этом случае условие дифункциональности уже не играет решающей роли.

Сформулируем необходимые и достаточные условия перестановочно-дифункциональности предиката $T(x, y)$ при заданных классах эквивалентности. Эти условия обладают еще и тем свойством, что из них вытекает просто дифункциональность предиката $T(x, y)$; но если хотя бы одно из них заменить дифункциональностью, они уже не будут достаточными. В этом смысле они оптимальны.

Итак, пусть $E(x_1, x_2) = D_B(f(x_1), f(x_2))$ ($f: A \xrightarrow{na} B$ — фиксировано).

Теорема 4. $T(x, y)$ — перестановочно-дифункционален (с заданными классами) тогда и только тогда, когда он обладает следующими свойствами: 1) если $T(x_1, y) = T(x_2, y) = 1$, то $E(x_1, x_2) = 1$; 2) если $T(x, y_1) = T(x, y_2) = 1$, то $E(y_1, y_2) = 1$; 3) если $T(x_1, y) = E(x_1, x_2) = 1$, то $T(x_2, y) = 1$; 4) если $T(x, y_1) = E(y_1, y_2) = 1$, то $T(x, y_2) = 1$.

Доказательство. I. Необходимость очевидна. II. Достаточность.

Рассмотрим классы $A_b = \{a \in A / f(a) = b\}$. Так как $f: A \xrightarrow{na} B$, то множество $P = \{A_b\}$ является разбиением множества A . Пусть $x^* \in A_{b_1}$, $y^* \in A_{b_2}$, и любые $x \in A_{b_1}$, $y \in A_{b_2}$.

Лемма. $T(x^*, y^*) = T(x, y)$.

Пусть $T(x^*, y^*) = 1$. Тогда, поскольку $x \in A_{b_1}$, то $E(x^*, x) = 1$ и из свойства 3 вытекает, что $T(x, y^*) = 1$. С другой стороны, $y^* \in A_{b_2}$, значит, $E(y^*, y) = 1$ и из свойства 4 вытекает, что $T(x, y) = 1$. Лемма доказана.

Это говорит о том, что значения предиката $T(x, y)$ постоянны на классах A_b и определяются любым представителем класса.

Теперь рассмотрим два множества:

$$E_1 = \{x \in A / T(x, y) = 0 \text{ для } \forall y \in A\};$$

$$E_2 = \{y \in A / T(x, y) = 0 \text{ для } \forall x \in A\}.$$

Если $E_1 \cap A_b \neq \Phi$, то $A_b \subset E_1$ для любого $b \in A_1$. Аналогично, если $E_2 \cap A_b \neq \Phi$, то $A_b \subset E_2$. Это вытекает из леммы. Таким образом, существует набор классов (обозначим его через M_1) A_b , объединение которых равно $A \setminus E_1$. Набор классов, объединение которых равно E_1 , обозначим через M'_1 . Для $E_2: M_2, M'_2$.

Построим теперь отображение $\psi: P \rightarrow C$ по следующему правилу: $\psi(A_b) = A_{b'}$, если $A_b \in M_1$ и $A_{b'} \in M_2$, причем такие, что существуют $x \in A_b, y \in A_{b'}$, для которых $T(x, y) = 1$. Если $A_b \in M'_1$, то переведем его в какой элемент a множества K равномощного M'_1 , так как K равномощно M'_1 , то этот перевод можно сделать взаимно-однозначно. Докажем, что ψ , ограниченное на M_1 , взаимно-однозначно переводит M_1 в M_2 . Этим самым мы докажем и корректность определения ψ .

Рассмотрим два любых $A_{b_1}, A_{b_2} \in M_1$. Пусть $\psi(A_{b_1}) = \psi(A_{b_2}) = A_{b'}$, тогда $\exists x_1 \in A_{b_1}, x_2 \in A_{b_2}, y \in A_{b'}$ такие, что $T(x_1, y) = T(x_2,$

$y) = 1$. Но по свойству 1 следует, что $E(x_1, x_2) = 1$. Значит, $A_{b_1} = A_{b_2}$.

Рассмотрим два любых $A_{b_1}, A_{b_2} \in M_2$. Пусть $\psi(A_b) = A_{b_1}$ и $\psi(A_b) = A_{b_2}$. Тогда $\exists x \in A_b, y_1 \in A_{b_1}$ и $y_2 \in A_{b_2}$ такие, что

$$T(x, y_1) = T(x, y_2) = 1, \quad E(y_1, y_2) = 1$$

(по свойству 2), и аналогично предыдущему $A_{b_1} = A_{b_2}$. Значит, отображение $\psi: P \rightarrow C = M_2 \cup K$ взаимно-однозначное. Между P и B существует взаимно-однозначное отображение $\theta: B \rightarrow P, \theta(b) = A_b$. Теперь определим $\varphi: B \rightarrow C$. Таким образом, $\varphi = \psi\theta$, тогда очевидно, что $T(x, y) = D_L(\varphi f(x), \varphi f(y))$, где $L = B \cup C$. Проверяется это точно так же, как в теореме 2.

Покажем теперь, что найденные условия оптимальны. Для этого приведем примеры предикатов, которые дифункциональны, обладают какими-то тремя свойствами, но не обладают четвертым и поэтому не перестановочно-дифункциональны с заданными классами эквивалентности.

Пусть $A = \{1 \div 12\}, B = \{B_1, B_2\}, f: A \xrightarrow{на} B$. Таким образом, $f_1(1) = \dots = f_1(7) = B_1, f_1(8) = \dots = f_1(12) = B_2$. I. Предикат $T(x, y)$ задан на классах $K = \{1, 2, 3, 4\}, L = \{5, 6, 7\}$ и $M = \{8, 9, 10, 11, 12\}$ так:

T	K	L	M
K	0	0	0
L	0	0	0
M	0	1	0

Тогда $T(x, y)$ обладает свойствами 1, 2, 3 и дифункционален, но не обладает свойством 4, поскольку $T(8, 6) = 1, E(6, 1) = 1$, но $T(8, 1) = 0$. Значит, $T(x, y)$ не перестановочно-дифункционален с заданными классами эквивалентности.

Е сли изменить

T	K	L	M
K	0	0	0
L	0	0	1
M	0	0	0

то у $T(x, y)$ остаются дифункциональность и свойства 1, 2, 4, кроме 3, так как $T(5, 10) = 1, E(5, 2) = 1$, но $T(2, 10) = 0$. $T(x, y)$ не будет перестановочно-дифункциональным.

II. Если в качестве $B = \{B_1, B_2, B_3\}$ и $f: A \xrightarrow{на} B$ такое, что

$$f(1) = \dots = f(5) = B_1, \quad f(6) = \dots = f(9) = B_2 \text{ и} \\ f(10) = f(11) = f(12) = B_3,$$

то $T(x, y)$ можно задать на таких классах: $K = \{1, 2, 3, 4, 5\}, L = \{6, 7, \dots, 12\}$, причем так, что

$$T(K, L) = 1, \quad T(L, K) = T(K, K) = T(L, L) = 0.$$

Тогда $T(x, y)$ — дифункционален, обладает свойствами 1, 3, 4, но не 2, так как $T(1, 6) = T(1, 12) = 1$, но $E(6, 12) = 0$. Значит, $T(x, y)$ не перестановочно-дифункционален с заданными классами.

Если теперь $T(K, L) = T(K, K) = T(L, L) = 0$, а $T(L, K) = 1$, то останутся у $T(x, y)$ дифункциональность, свойства 2, 3, 4, но не 1, поскольку $T(7, 1) = T(11, 1) = 1$, а $E(7, 11) = 0$. Следовательно, $T(x, y)$ не перестановочно-дифункционален с заданными классами.

Построенные четыре предиката свидетельствуют об оптимальности найденных нами условий. Отметим, что первые два предиката разбивают A на более мелкие классы, чем отображение f , поэтому не выполняется одно из вторых двух условий; вторые два предиката разбивают A на более крупные классы, чем f , поэтому не выполняется одно из первых двух условий.

Список литературы: 1. Мальцев А. И. Алгебраические системы. — М.: Наука, 1970. — 240 с. 2. Курош А. Г. Теория групп. Изд. 3-е, дополненное. — М.: Наука, 1967. — 300 с. 3. Мальцев А. И. Некоторые вопросы теории классов моделей. — Тр. 4-го Всесоюз. мат. съезда. — Л., 1963, с. 169—198.

Поступила в редколлегию 17.03.81.

УДК 510.62

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, **С. И. МАЛЕНЧЕНКО**

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРАММАТИЧЕСКИХ КАТЕГОРИЙ ПО СМЫСЛОВЫМ ОТТЕНКАМ МОРФЕМ

В грамматике русского словоизменения большое развитие получило учение о словоизменяемых категориях (род, число, падеж, время и др.) [1, с. 465—483, 583—646]. Эти категории необходимы при математическом моделировании словоизменяемых процессов [2]. Совершенно иное положение сложилось в области грамматики русского словообразования. Систематическое учение о словообразовательных категориях отсутствует, о них имеются лишь разрозненные и отрывочные данные [1, с. 133—142]. Чтобы получить возможность беспрепятственного математического моделирования словообразовательных процессов, необходимо прежде сформировать словообразовательные категории. В этой статье описывается метод формирования грамматических категорий (в том числе словообразовательных).

Любая грамматическая категория представляет собой переменную, заданную на некотором множестве смысловых оттенков. Например, категория рода имеет три смысловых оттенка: мужской, женский и средний. Поэтому, чтобы сформировать грамматическую категорию, достаточно указать для нее множество смысловых оттенков, на которое она распространяется. Множество это не может быть выбрано произвольным образом, оно должно удовлетворять определенным требованиям. Четкая формулировка этих требований позволит указать метод формирования грамматических категорий.

Смысловые оттенки относятся к отдельным морфемам, при этом одни и те же морфемы в различных словах (правильнее было бы сказать — текстах) могут характеризоваться различными наборами смысловых оттенков. Так, окончание *ой* словоформы *дорогой* в тексте *дорогой брат* характеризуется набором смысловых оттенков <именительный, мужской>, а в тексте *дорогой сестре* — набором <дательный, женский>. Текст, окружающий морфему и однозначно характеризующий набор относящихся к ней смысловых оттенков, назовем *текстовой ситуацией*. В нашем примере текстовыми ситуациями будут служить тексты *дорог... брат*, *дорог... сестре*. Набор смысловых оттенков, однозначно определяющий соответствующую ему морфему в данной текстовой ситуации, назовем *полным*. Две текстовые ситуации, которые характеризуются одинаковыми полными наборами смысловых оттенков, будем считать тождественными.

Введем множество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ всех морфем, для которых требуется сформировать грамматические категории. Введем также множество $B = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$ всех интересующих нас текстовых ситуаций с морфемами из множества A . Наконец, введем множество $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ всех смысловых оттенков, применимых к морфемам из множества A , включенным в текстовые ситуации, взятые из множества B . Рассмотрим предикат $P(x, y)$, где $x \in C$, $y \in B$, равный единице, когда оттенок x присущ морфеме, находящейся в текстовой ситуации y , и равный нулю в противном случае.

Образуем предикат $Q(x_1, x_2)$, где $x_1, x_2 \in C$, равный

$$Q(x_1, x_2) = D(x_1, x_2) \vee \neg \exists y (P(x_1, y) \wedge P(x_2, y)). \quad (1)$$

Здесь D — предикат равенства на C^2 , определяемый следующими условиями:

$$D(x_1, x_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_1 = x_2, \\ 0, & \text{если } x_1 \neq x_2. \end{cases} \quad (2)$$

Предикат $Q(x_1, x_2)$ обращается в единицу, если оттенки x_1 и x_2 совпадают или же не существует ни одной текстовой ситуации, которой были бы одновременно присущи смысловые оттенки x_1 и x_2 . В противном случае $Q(x_1, x_2) = 0$.

Очевидно, что два различных значения одной и той же грамматической категории не могут быть одновременно присущи какой бы то ни было ситуации. Например, в тексте *дорогой сестре* окончанию *ой* присущ дательный падеж, а винительный — не присущ. Поэтому если существует хотя бы одна текстовая ситуация y , которой одновременно присущи два различных оттенка x_1 и x_2 , то эти оттенки принадлежат различным категориям. Мы видим, что если $Q(x_1, x_2) = 1$, то смысловые оттенки x_1, x_2 принадлежат одной грамматической категории, если же $Q(x_1, x_2) = 0$, то оттенки x_1, x_2 должны быть отнесены

к различным категориям. Таким образом, предикат Q в скрытом виде содержит искомые грамматические категории.

Опишем алгоритм формирования категорий по известному предикату $Q(x_1, x_2)$. Алгоритм будем сопровождать примером. Предикат $Q(x_1, x_2)$ задан так. Для каждого значения x_1 находим класс всех x_2 таких, что $Q(x_1, x_2) = 1$. Имеем: для $x_1 = 1$ — класс $\{1, 3\}$, для $x_1 = 2$ — класс $\{2, 4, 5\}$, для $x_1 = 3$ — класс $\{1, 3\}$, для $x_1 = 4$ — класс $\{2, 4\}$, для $x_1 = 5$ — класс $\{2, 5\}$. Предикат Q симметричен, поэтому его левые и правые классы совпадают. Полученные классы графически представлены на рис. 1.

$x_2 \backslash x_1$	1	2	3	4	5
1	1	0	1	0	0
2	0	1	0	1	1
3	1	0	1	0	0
4	0	1	0	1	0
5	0	1	0	0	1

Исключая «лишние» оттенки, добиваемся превращения предиката Q , который есть предикат толерантности [3, с. 78] (как рефлексивный и симметричный), в предикат эквивалентности. Для этого нужно исключить минимальное число оттенков, при котором система множеств превращается в разбиение. Исключение «лишних» оттенков можно осуществить многими различными способами, при этом получаются различные разбиения множества оттенков. В нашем примере получаются два варианта разбиения множества оттенков. Одно из них (рис. 2, а) получается в результате исключения оттенка 5, второе (рис. 2, б) — в результате исключения оттенка 4.

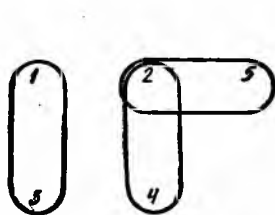


Рис. 1

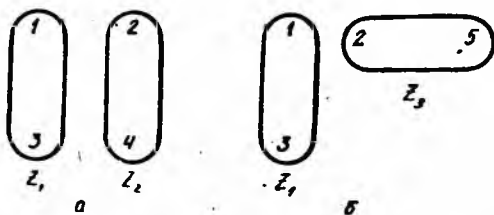


Рис. 2

В соответствии с полученным результатом получаем два набора категорий $\langle z_1, z_2 \rangle$ и $\langle z_1, z_3 \rangle$. Категория z_1 имеет значения 1, 3, категория z_2 — значения 2, 4, категория z_3 — значения 2, 5. В нашем примере наборы категорий получились совершенно равноценными, поэтому можно с равным успехом принять любой из них. Однако в общем случае наборы категорий могут получиться неравноценными, например: они могут отличаться общим числом различных оттенков, числом категорий, числом оттенков в категориях, более или менее равномерным распределением оттенков в смысле их числа по категори-

ям. В этом случае может возникнуть вопрос о выборе оптимального набора категорий. Появление «лишних» оттенков связано с тем, что первоначальный выбор оттенков случаен и вполне может обладать избыточностью. Можно также поставить вопрос о «недостающих» оттенках, введение которых позволило бы отыскать еще более оптимальный вариант набора категорий или же расширить множество тестовых ситуаций, охватываемых грамматическими категориями. Нельзя формировать категории, содержащие по одному оттенку, поскольку переменная, представляющая такую категорию, превращается в константу и по самому смыслу понятия категории не может являться ею.

В более сложных случаях, чем тот, который был рассмотрен в примере, необходим специальный метод последовательного исключения оттенков. Один из возможных методов таков. Исключаем любой оттенок, который охватывается более чем одним множеством, однако нежелательно производить такие исключения, которые приводят к одноэлементным множествам. Так, в нашем примере следует воздержаться от исключения оттенка 2, поскольку при этом появляются множества {4} и {5}. Если же появление одноэлементных множеств неизбежно, то на следующем шаге исключаем все элементы, входящие в одноэлементные множества. Процесс повторяется до тех пор, пока не останется ни одного элемента, охватываемого более чем одним множеством. В результате получаем разбиение множества всех оставшихся оттенков на классы эквивалентности. Исключая оттенки во всевозможных различных порядках, получаем все разбиения множества оттенков. Им соответствуют всевозможные наборы грамматических категорий.

Список литературы: 1. Русская грамматика, т. 1. — М.: Наука, 1980. — 816 с. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Применение метода нуля-органа в лингвистике. — Проблемы бионики, 1978, вып. 21, с. 3—15. 3. Шрейдер Ю. А. Равенство, сходства, порядок. — М.: Наука, 1971. — 76 с.

Поступила в редколлегию 17.03.81.

УДК 510.62

А. Ф. ОСЫКА, канд. техн. наук, *Н. М. БУРКОВА*, *Н. В. ШАРОНОВА*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТИРОВАННЫХ СУФФИКСОВ ГЛАГОЛОВ РУССКОГО ЯЗЫКА

В статье описывается, один из вариантов математической модели суффиксального словообразования глаголов. При построении модели используется алгебра конечных предикатов, описанная в [1] и с успехом примененная при описании процессов словоизменения [2], а также словообразования [3, 4]. В работе [1] введено понятие смысла текста и указано, что смысл —

это набор промежуточных переменных, связывающих воедино отдельные части текста. Здесь в роли фрагмента текста выступает глагольный суффикс, а в роли его смысла — набор грамматических и семантических признаков. Эти признаки связывают между собой буквы суффикса, с их помощью осуществляется связь суффикса с остальными частями слова (т. е. с основой и постфиксом).

По аналогии с описанием процессов словоизменения [2] вводим следующие фиксированные переменные признаки: $\xi_1 = c$ (тип грамматических преобразований со значением «словообразование»); $\xi_2 = c$ (способ словообразования со значением «суффиксальный»); $\xi_3 = \Gamma$ (часть речи мотивированного слова со значением «глагол»). Введение этих признаков позволяет нам выделить все глагольные суффиксы, участвующие в словообразовательных процессах, когда

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
и	р	о	в	а	—
—	—	о	в	а	—
—	—	—	в	а	—
—	—	е	в	а	—
—	—	и	в	а	—
—	—	ы	в	а	—
—	—	—	—	а	—
—	—	а	н	у	—
—	—	—	н	у	—
—	—	и	ч	а	—
—	—	—	к	а	—
—	—	—	—	и	—
—	—	—	—	е	—

конечным звеном является глагол. Все эти суффиксы представлены в таблице. Фрагментирование глагольных суффиксов проведено по аналогии с [4]. Регистр состоит из трех двухбуквенных фрагментов.

Далее вводятся переменные признаки — x_1 — признак происхождения основы со значениями: и — иностранная, р — русская основа $x_1^p \vee x_1^i = 1$; x_2 — тип спряжения со значениями: а — первое спряжение; б — второе спряжение $x_2^a \vee x_2^b = 1$; x_3 — признак части речи мотивирующего слова со значениями: с — имя существительное, п — имя прилагательное, м — местоимение, г — глагол, $x_3^c \vee x_3^p \vee x_3^m \vee x_3^g = 1$; x_4 — признак продуктивности суффикса со значениями: п — продуктивный, н — не продуктивный $x_4^p \vee x_4^n = 1$; x_5 — признак влияния предшествующего суффикса со значениями: а — первый тип влияния, б — второй тип влияния (к первому типу влияния относятся суффиксы *аг, ан, арь, ик*, ко второму — все остальные суффиксы $x_5^a \vee x_5^b = 1$; x_6 — признак последней буквы основы со значениями: а, б, в, г, д, е, ж, з, и, к, л, м, н, о, п, р, с, т, у, ф, х, ц, ч, ъ, ы, ь, э, ю, я

$$\begin{aligned}
 & x_6^a \vee x_6^b \vee x_6^c \vee x_6^d \vee x_6^e \vee x_6^f \vee x_6^g \vee x_6^h \vee x_6^i \vee x_6^j \vee x_6^k \vee x_6^l \vee x_6^m \vee x_6^n \vee x_6^o \vee x_6^p \vee x_6^q \vee x_6^r \vee x_6^s \vee x_6^t \vee x_6^u \vee x_6^v \vee x_6^w \vee x_6^x \vee x_6^y \vee x_6^z \vee x_6^aa \vee x_6^ab \vee x_6^ac \vee x_6^ad \vee x_6^ae \vee x_6^af \vee x_6^ag \vee x_6^ah \vee x_6^ai \vee x_6^aj \vee x_6^ak \vee x_6^al \vee x_6^am \vee x_6^an \vee x_6^ao \vee x_6^ap \vee x_6^aq \vee x_6^ar \vee x_6^as \vee x_6^at \vee x_6^au \vee x_6^av \vee x_6^aw \vee x_6^ax \vee x_6^ay \vee x_6^az = 1;
 \end{aligned}$$

x_7 — признак словообразовательной семантики со значениями: а — приобретать признаки того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом (*сиротеть*); б — действовать с помощью того, что названо мотивирующим словом (*костылять*); наделять кого- или что-л. тем, что названо мотивирующим словом (*синить*); г — резко совершать действие (*дергануть*); д — однократно совершать действие (*дернуть*); е — многократно совершать действие (*разменивать*); ж — все остальные значения (сюда относятся следующие значения: совершать действие, свойственное тому, кто назван мотивирующим словом (*бродяжничать*); проявлять свойство, названное мотивирующим словом (*малодушничать*); совершать действие, обычно производимое во время того, что названо мотивирующим словом (*зимовать*); совершать действия, обычно производимые в (на) том, что названо мотивирующим словом (*курортничать*); добывать, получать то, что названо мотивирующим словом (*барышничать*); сочинять, говорить то, что названо мотивирующим словом (*прибаутничать*); помещать кого- или что-л. в (на) то, что названо мотивирующим словом (*складировать*); создавать то, что названо мотивирующим словом (*планировать*); совершать действие, свойственное тому, кто имеет признак, названный мотивирующим словом (*жадничать*); удалять, отделять то, что названо мотивирующим словом, лишать того, что названо мотивирующим словом (*потрошить*):

$$x_7^a \vee x_7^b \vee x_7^c \vee x_7^d \vee x_7^e \vee x_7^f \vee x_7^g = 1;$$

x_8 — признак ударности последней буквы суффикса со значениями: у — ударная, б — безударная: $x_8^y \vee x_8^b = 1$; x_9 — признак мягкости последней буквы основы со значениями: м — мягкая, т — твердая: $x_9^m \vee x_9^t = 1$.

Задача состоит в том, чтобы описать деривационное отношение

$$L(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, S) = 1,$$

где S — буква суффикса. В силу полноты набора $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_9)$ это уравнение задает функцию $S = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_9)$. Она будет описана, если ее представить в явном виде:

$S^\sigma = F_\sigma(x_1, x_2, x_3, \dots, x_9)$, где $\sigma \in \{и, ы, р, о, в, а, е, н, ч, к, у\}$.

Рассмотрим первую букву суффикса. Область ее изменения зададим уравнением $s_1^и \vee s_1^- = 1$. Буква «и» будет первой буквой суффикса, если образуется глагол от иностранной основы и последняя буква суффикса безударная. Если же глагол образуется от иностранной основы в ударной последней буквой суффикса, то первой буквой суффикса будет «—».

Уравнения алгебры конечных предикатов будут иметь следующий вид:

$$s_1^и = x_1^и x_8^0; \quad s_1^- = x_1^и x_8^y \vee x_1^p.$$

Рассмотрим вторую букву суффикса s_2 , область изменения зададим следующим уравнением $s_2^p \vee s_2^- = 1$.

Если образуется глагол от иностранной основы и последняя буква суффикса безударная, то второй буквой суффикса будет буква «р». Буква «—» появится в случае, если глагол образуется от русской основы или от иностранной основы и последняя буква суффикса находится под ударением:

$$s_2^p = x_1^u x_8^6; \quad s_2^- = x_1^p \vee x_1^u x_8^y.$$

Для третьей буквы суффикса S_3 область изменения зададим уравнением

$$s_3^o \vee s_3^e \vee s_3^u \vee s_3^m \vee s_3^a \vee s_3^- = 1.$$

Если глагол первого спряжения образован при помощи продуктивного суффикса от русской основы имени существительного, имеющей второй тип влияния предшествующего суффикса, от русской основы имени прилагательного со значением признака словообразовательной семантики «наделять кого-л. или что-л. тем, что названо мотивирующим словом», или «все остальные значения» с типом влияния предшествующего суффикса вторым и если последняя буква основы б, в, г, д, з, к, л, м, н, п, р, с; т; ф, или если глагол образован от иностранной основы, то третьей буквой суффикса будет «о».

Уравнение имеет вид

$$s_3^o = x_1^u \vee \alpha (x_3^c x_5^6 \vee x_3^u (x_7^b \vee x_7^k x_5^6)) (P_1 \vee P_3 \vee x_6^f),$$

где

$$\alpha = x_1^u x_2^a x_4^u;$$

$$P_1 = x_6^b \vee x_6^v \vee x_6^d \vee x_6^z \vee x_6^k \vee x_6^m \vee x_6^u \vee x_6^p \vee x_6^c \vee x_6^t;$$

$$P_3 = x_6^r \vee x_6^s \vee x_6^f.$$

Третьей буквой суффикса будет «е», если образуется глагол первого спряжения с помощью продуктивного суффикса от русской основы имени существительного со вторым типом влияния предшествующего суффикса или от русской основы имени прилагательного со значениями признака словообразовательной семантики «наделять кого-л. или что-л. тем, что названо мотивирующим словом», или «все остальные значения» с типом влияния предшествующего суффикса вторым и если последняя буква основы а, е, ж, о, у, ч, щ, ш, я или мягкая б, в, д, л, м, з, н, п, р, т.

Уравнение будет иметь следующий вид:

$$s_3^e = \alpha (x_3^c x_5^6 \vee x_3^u (x_7^b \vee x_7^k x_5^6)) (P_2 \vee P_4 \vee P_5 \vee P_6 \vee P_7 \vee x_6^o),$$

где

$$P_2 = x_6^a \vee x_6^e \vee x_6^j; \quad P_4 = x_6^z \vee x_6^d \vee x_6^m \vee x_6^n;$$

$$P_5 = (x_6^3 \vee x_6^{\pi} \vee x_6^{\eta} \vee x_6^{\rho}) x_9^{\mu}; \quad P_6 = (x_6^{\mu} \vee x_6^{\pi}) x_9^{\mu};$$

$$P_7 = (x_6^{\delta} \vee x_6^{\eta} \vee x_6^{\pi} \vee x_6^{\tau}) x_9^{\mu}.$$

Если образуется глагол первого спряжения от русской основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «многократно совершать действие» и последняя буква основы г, ж, к, о, х, ч, ш, щ или мягкая з, л, н, с, р, или если глагол образуется с помощью продуктивного суффикса от русской основы имени существительного или имени прилагательного, имеющих I тип влияния предшествующего суффикса то третьей буквой суффикса будет «и».

Уравнение алгебры конечных предикатов имеет вид

$$s_3^{\mu} = \alpha (x_3^{\gamma} x_7^{\epsilon} (P_3 \vee P_4 \vee P_5 \vee x_6^{\delta} \vee x_6^{\epsilon}) \vee x_5^{\alpha} (x_3^{\epsilon} \vee x_3^{\pi} x_7^{\mu})).$$

Если образуется глагол первого спряжения от русской основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «многократно совершать действие» и с последней буквой основы б, в, д, з, л, м, н, п, р, с, т, третьей буквой суффикса будет «ы»:

$$s_3^{\mu} = \alpha x_3^{\gamma} x_7^{\epsilon} P_1.$$

Буква «—» будет третьей буквой суффикса, если образуется глагол первого спряжения от русской основы имени существительного при помощи непродуктивного суффикса или от имени прилагательного при помощи непродуктивного суффикса, или с помощью продуктивного суффикса и со значением признака словообразовательной семантики «приобретать признаки того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом», или от русской основы местоимения, или от глагола со значением признака словообразовательной семантики «однократно совершать действие» или «многократно совершать действие», если последняя буква основы а, е, и, ы, у, или если образуется глагол второго спряжения.

Уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$s_3^{\tau} = \beta (x_3^{\pi} \vee x_3^{\epsilon}) \vee \alpha (x_3^{\pi} x_7^{\alpha} \vee x_3^{\mu} \vee x_3^{\gamma} (x_7^{\pi} \vee x_7^{\epsilon} (P_2 \vee x_6^{\mu} \vee \vee x_6^{\eta}))) \vee x_1^{\rho} x_2^{\delta}, \text{ где } \beta = x_1^{\rho} x_2^{\alpha} x_4^{\eta}.$$

Если образуется глагол первого спряжения от русской основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «редко совершать действие», то третьей буквой суффикса будет «а»:

$$s_3^{\alpha} = \alpha x_3^{\gamma} x_7^{\gamma}.$$

Рассмотрим четвертую букву суффикса. Область изменения зададим уравнением

$$s_4^{\mu} \vee s_4^{\eta} \vee S_4^{\gamma} \vee s_4^{\pi} \vee S_4^{\tau} = 1.$$

Если образуется глагол первого спряжения с помощью продуктивного суффикса от русской основы имени существительного со вторым типом влияния предшествующего суффикса или от русской основы имени прилагательного со значением признака словообразовательной семантики «наделять кого- или что-л. тем, что названо мотивирующим словом» или «все остальные признаки» со вторым типом влияния предшествующего суффикса или от русской основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «многократно совершать действие», если глагол образован от иностранной основы, то четвертой буквой суффикса будет «в».

Уравнение алгебры конечных предикатов:

$$s_4^в = \alpha (x_3^с x_5^б \vee x_3^n (x_7^в \vee x_7^* x_5^б) \vee x_3^r x_7^е) \vee x_1^n.$$

Буква «к» будет четвертой в суффиксе, если образуется глагол от русской основы местоимения, если последняя буква основы — гласная (хрюкать):

$$s_4^к = x_1^p x_3^m P_9, \text{ где } P_9 = x_6^а \vee x_6^я \vee x_6^е \vee x_6^н \vee x_6^м \vee x_6^ю.$$

Если образуется глагол первого спряжения с помощью продуктивного суффикса от русской основы имени существительного или имени прилагательного со значением признака словообразовательной семантики «все остальные значения» и тип влияния предшествующего суффикса — первый, то четвертой буквой суффикса будет «ч»:

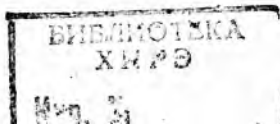
$$s_4^ч = \alpha x_5^а (x_3^с \vee x_3^n x_7^е).$$

Буква «н» — если образуется глагол первого спряжения от русской основы имени прилагательного с помощью непродуктивного суффикса, со значением признака словообразовательной семантики «приобретать признаки того, кто (что) назван (о) мотивирующим словом и последняя буква суффикса безударная или если глагол образуется от основы глагола со значениями признака словообразовательной семантики «редко совершать действие» или «однократно совершать действие».

Уравнение имеет вид

$$s_4^н = \beta x_3^n x_5^б x_7^а \vee x_1^p x_3^r (x_7^е \vee x_7^н).$$

Четвертой буквой суффикса будет «_», если образуется глагол второго спряжения или первого спряжения от русской основы имени существительного с помощью непродуктивного суффикса или от основы имени прилагательного с помощью продуктивного суффикса и со значением признака словообразовательной семантики «приобретать признаки того, кто (что) назван (о) мотивирующим словом» или с помощью непродуктивного суффикса со значением признака словообразовательной семантики «наделять кого- или что-л. признаками того, кто (что) назван (о) мотивирующим словом» или «приобретать признаки того, кто (что) назван (о) мотивирующим словом»



с ударной последней буквой суффикса, или от основы местоимения, если последняя буква основы согласная:

$$s_4^- = \alpha (x_3^п x_7^а \vee x_3^м P_{10}) \vee \beta (x_3^с \vee x_3^п) (x_7^в \vee x_7^а x_8^у) \vee x_1^р x_2^о,$$

где

$$P_{10} = x_6^б \vee x_6^в \vee x_6^г \vee x_6^д \vee x_6^ж \vee x_6^з \vee x_6^к \vee x_6^л \vee \\ \vee x_6^м \vee x_6^н \vee x_6^п \vee x_6^р \vee x_6^с \vee x_6^т \vee x_6^ф.$$

Область изменения пятой буквы суффикса

$$s_5^а \vee s_5^у \vee s_5^н \vee s_5^е = 1.$$

Буква «а» пятой в суффиксе будет тогда, когда образуется глагол первого спряжения от иностранной основы или от русской основы имени существительного при помощи продуктивного суффикса или непродуктивного суффикса со значением признака словообразовательной семантики «наделять кого- или что-л. признаками того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом» или «приобретать признаки того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом» и последняя буква суффикса находится под ударением, или если глагол образуется от основы местоимения или от основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «множественно совершать действие».

Уравнение алгебры конечных предикатов будет иметь вид

$$s_5^а = \alpha (x_3^с \vee x_3^п (x_7^в \vee x_7^ж)) \vee x_3^м \vee x_3^р x_7^е) \vee \\ \vee \beta (x_3^с (x_7^в \vee x_7^б) \vee x_3^п (x_7^в \vee x_7^а x_8^у)) \vee x_1^н.$$

Если образуется глагол первого спряжения от русской основы имени прилагательного с помощью непродуктивного суффикса со значением признака словообразовательной семантики «приобретать признаки того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом» и последняя буква суффикса безударна или если глагол образуется от основы глагола со значением признака словообразовательной семантики «резко совершать действие», то пятой буквой суффикса будет «у»:

$$s_5^у = \beta x_3^п x_7^а x_8^б \vee x_1^р x_3^г (x_7^в \vee x_7^н).$$

Буква «и» — если образуется глагол второго спряжения от русской основы:

$$s_5^и = x_1^р x_2^б.$$

Если глагол первого спряжения образуется от русской основы имени существительного с помощью непродуктивного суффикса или от основы имени прилагательного с помощью продуктивного суффикса со значением признака словообразовательной семантики «приобретать признаки того, кто (что) назван(о) мотивирующим словом», то пятой буквой будет «е»:

$$s_5^е = \beta x_3^с x_7^а \vee \alpha x_3^п x_7^з.$$

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Об алгебре конечных предикатов. — Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 12—15. 2. Математическое описание процесса склонения имен прилагательных / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, М. Ф. Бондаренко, В. М. Бондарев, З. Ю. Шабанова. — Проблемы бионики, 1980, вып. 24, с. 28—32. 3. Бондаренко М. Ф., Шаронова Н. В. О математическом описании процессов словообразования. — Проблемы бионики, 1981, вып. 27, с. 83—89. 4. Бондаренко М. Ф., Буркова Н. М., Шаронова Н. В. Математическое описание суффиксального словообразования глаголов. — Проблемы бионики, 1982, вып. 28, с. 8—13.

Поступила в редколлегию 02.03.81.

УДК 510.62

Э. М. БУЗНИЦКАЯ, канд. техн. наук, З. В. ДИМА, В. А. ЧИКИНА

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУФФИКСАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И СЛОВОИЗМЕНЕНИЯ ПРИЧАСТИЙ РУССКОГО ЯЗЫКА

Нашей целью было построение математической модели словоизменения атрибутивных (т. е. неспрягаемых) форм глагола — причастий русского языка.

Атрибутивная форма глагола вместе с его предикативными (личными формами и инфинитивом) образует глагольную парадигму. Причастия являются глагольно-именной формой, вмещающей в себе признаки глагола и имени прилагательного. Подобно глаголу причастия располагают категориями залога (действительный, страдательный), вида (совершенный, несовершенный) и времени (настоящее, прошедшее). От глагола с помощью специальных суффиксов могут быть образованы четыре причастные формы — две формы настоящего времени и две формы прошедшего времени: *слышать* — *слышащий*, *слышимый*, *слышавший*, *слышанный*.

Атрибутивные формы обладают неглагольным словоизменением, образуя падежные формы по адъективному склонению. Они изменяются по родам и числам, а страдательные причастия образуют краткие формы. Таким образом, с одной стороны, причастия входят в систему спряжения глагола, с другой — в систему словоизменения прилагательных [1].

Под математической моделью словоизменения причастий будем понимать определенным образом построенные две морфологические функции $Y=f(X)$ и $Z=\varphi(X)$, характеризующие зависимость текстов Y и Z от смысла X . Под смыслом X понимаем некоторый набор признаков, выраженный многокомпонентным вектором $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где n — число компонентов вектора. В качестве текста Y выберем окончание (флексийный морф), текста Z — формообразующий суффикс (суффиксальный словоизменятельный морф): $Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$, $Z=(z_1, z_2, \dots, z_k)$, где m и k — число компонентов векторов Y и Z соответственно.

Полагаем, что окончания и формообразующие суффиксы причастий состоят не более чем из трех букв, поэтому $Y = (y_1, y_2, y_3)$, $Z = (z_1, z_2, z_3)$. Здесь $y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ — буквы, стоящие на первом, втором, третьем местах окончания и суффикса соответственно. Буквы нумеруются слева направо. Переменные Y и Z определены на множестве букв русского алфавита.

Процессы формирования суффиксов и окончаний происходят последовательно. Под смыслом X понимаем следующий набор признаков: залог (переменная x_1) со значениями — действительный (д), страдательный (с); вид (переменная x_2) со значениями — совершенный (с), несовершенный (н); время (переменная x_3) со значениями — настоящее (н), прошедшее (п); полнота (переменная x_4) со значениями — полное (п), краткое (к); тип спряжения (переменная x_5) со значениями — 1, 2; тип влияния основы неопределенной формы (переменная x_6) со значениями — 1 (причастия от глаголов на *-ать (-ять) I* (подкласс А) и III продуктивный класс 1-я и 8-я непродуктивные группы), 2 (причастия от глаголов на *-ить IV* класса непродуктивных групп и глаголов с основой на согласный 4-й и 5-й непродуктивных групп), 3 (причастия от глаголов на *-нуть II* класса и ряда непродуктивных групп с конечным гласным корня перед *-ть, -ти* неопределенной формы) [2, с. 510, 511]; вариант словоформы (переменная x_7) со значениями — архаичная (а), современная (с); постановка знака над буквой е (переменная x_8) со значениями — ставить (с), не ставить (н); ударность основы (переменная x_9) со значениями — ударная (у), безударная (б); последняя буква основы настоящего времени (переменная x_{10}) и прошедшего времени (переменная x_{11}) со значениями, определенными на множестве букв русского алфавита; падеж (переменная x_{12}) со значениями — именительный (и), родительный (р), дательный (д), винительный (в), творительный (т), предложный (п); число (переменная x_{13}) со значениями — единственное (е), множественное (м); род (переменная x_{14}) со значениями — мужской (м), женский (ж), средний (с); одушевленность (переменная x_{15}) со значениями одушевленное (о), неодушевленное (н).

Формообразующие суффиксы причастий сведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
z_1	у	ю	я	я	в	—	я	е	о	—	е	ѐ	—	—	е	ѐ
z_2	щ	щ	щ	щ	ш	ш	м	м	м	н	н	н	т	н	н	н
z_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	н	н	н	—	—	—	—

В случае отсутствия одной или двух букв суффикса их места заполняются пробелами. Для удобства математического описания некоторые суффиксы сдвинуты на одну позицию вправо.

Приведем функцию $S = \xi(x_5, x_6, x_7, x_9, x_{10}, x_{11})$ для формообразующих суффиксов причастий [3]:

$$\begin{aligned} S^1 &= x_5^1(p_2 \vee p_4) p_5 x_6^1 x_7^c x_9^y; & S^2 &= x_5^1(p_1 \vee p_3) p_5 x_6^3 x_7^c x_9^y; \\ S^3 &= x_5^2 p_3 p_5 x_6^2 x_7^c; & S^4 &= x_5^2(p_1 \vee p_2 \vee p_4) p_5 x_6^2 x_7^c; \\ S^5 &= x_5^2 p_3 p_5 x_6^1 x_7^c; & S^6 &= x_5^2(p_1 \vee p_2 \vee p_4) p_5 x_6^1 x_7^c; \\ S^7 &= x_5^1(p_1 \vee p_3) p_5 x_6^1 x_7^c x_9^y; & S^8 &= x_5^1(p_1 \vee p_3) p_5 x_6^2 x_7^c x_9^y; \\ S^9 &= x_5^1(p_1 \vee p_3) (p_5 x_7^a \vee p_6) x_6^2 x_9^b; & S^{10} &= x_5^1(p_1 \vee p_3) p_6 x_6^2 x_9^y; \\ S^{11} &= x_5^1(p_1 \vee p_3) p_6 x_6^3 x_9^y; & S^{12} &= x_5^1(p_2 \vee p_4) p_5 x_6^3 x_7^c x_9^y, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} p_1 &= x_{10}^b \vee x_{10}^r \vee x_{10}^f \vee x_{10}^n \vee x_{10}^a \vee x_{10}^k \vee x_{10}^m \vee x_{10}^s \vee x_{10}^l \vee x_{10}^p \vee x_{10}^c \vee \\ &\vee x_{10}^t \vee x_{10}^d \vee x_{10}^o \vee x_{10}^i \vee x_{10}^j; & p_2 &= x_{10}^n; & p_3 &= x_{10}^m \vee x_{10}^l \vee x_{10}^k \vee x_{10}^j; \\ p_4 &= x_{10}^a \vee x_{10}^e \vee x_{10}^i \vee x_{10}^n \vee x_{10}^h \vee x_{10}^o \vee x_{10}^y \vee x_{10}^m \vee x_{10}^b \vee x_{10}^3 \vee \\ &\vee x_{10}^u \vee x_{10}^s; & p_5 &= x_{11}^n \vee x_{11}^e \vee x_{11}^i \vee x_{11}^j \vee x_{11}^h \vee x_{11}^o \vee \\ &\vee x_{11}^y \vee x_{11}^m \vee x_{11}^b \vee x_{11}^3 \vee x_{11}^o \vee x_{11}^i \vee x_{11}^j; & p_6 &= x_{11}^b \vee x_{11}^l \vee x_{11}^r \vee x_{11}^n \vee \\ &\vee x_{11}^a \vee x_{11}^k \vee x_{11}^m \vee x_{11}^i \vee x_{11}^n \vee x_{11}^j \vee x_{11}^p \vee x_{11}^o \vee x_{11}^t \vee x_{11}^d \vee \\ &\vee x_{11}^x \vee x_{11}^u \vee x_{11}^j. \end{aligned} \quad (2)$$

Приведем функцию $t = \eta(x_1, x_2, x_3, x_4)$:

$$\begin{aligned} t^1 &= x_1^r x_2^h x_3^h; & t^2 &= x_1^r x_3^h; & t^3 &= x_1^c x_2^h x_3^h; \\ t^4 &= x_1^c x_3^h x_4^h; & t^5 &= x_1^c x_3^h x_4^k. \end{aligned} \quad (3)$$

Функцию $Z = \varphi(S^1, S^2, \dots, S^{12}; t^1, t^2, \dots, t^5)$ для определения букв формообразующего суффикса запишем так:

$$\begin{aligned} z_1^o &= (S^1 \vee S^{12}) t^1; & z_1^y &= (S^2 \vee S^7 \vee S^8 \vee S^9 \vee S^{10} \vee S^{11}) t^1; \\ z_1^a &= (S^3 \vee S^5) t^1; & z_1^h &= (S^4 \vee S^6) t^1; & z_1^n &= (S^1 \vee \\ &\vee S^2 \vee \dots \vee S^8 \vee S^{12}) t^2; & z_1^i &= (S^1 \vee S^2 \vee S^7 \vee S^{10} \vee S^{11} \vee S^{12}) t^3 \vee \\ &\vee (S^3 \vee S^4 \vee S^9 \vee S^{10}) (t^4 \vee t^5) x_9^h \vee S^8 (t^4 \vee t^5); & z_1^j &= (S^3 \vee \\ &\vee S^4 \vee S^5 \vee S^6) t^3; & z_1^o &= (S^8 \vee S^9) t^3; & z_1^e &= (S^3 \vee S^4 \vee S^9 \vee \\ &\vee S^{10}) (t^4 \vee t^5) x_9^c; & z_1^r &= (S^9 \vee S^{10} \vee S^{11}) t^2 \vee (S^1 \vee S^2 \vee \\ &\vee S^5 \vee S^6 \vee S^7 \vee S^{11} \vee S^{12}) (t^4 \vee t^5); & z_2^m &= \beta t^1; \end{aligned}$$

$$z_2^m = \beta_1 t^2; z_2^M = \beta_1 t^3; z_2^H = \beta_2 (t^4 \vee t^5);$$

$$z_2^T = (S^2 \vee S^{11} \vee S^{12}) (t^4 \vee t^5); z_3^H = \beta_2 t^4;$$

$$z_3^M = \beta_1 (t^1 \vee t^2 \vee t^3 \vee t^5) \vee (S^2 \vee S^{11} \vee S^{12}) t^4, \quad (4)$$

где $\beta_1 = (S^1 \vee S^2 \vee \dots \vee S^{12})$; $\beta_2 = (S^1 \vee S^3 \vee S^4 \vee \dots \vee S^{10})$.

Перейдем к построению математической модели словоизменения причастий. За каждой буквой окончания фиксируется определенная позиция, что отражает табл. 2.

Таблица 2

№ пп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
ω_1	е	о	е	о	и	ы	и	ы	и	ы	и	ы	е	о	е	о	е	о	е	о	а	у	ы	ц	а	о	ы		
ω_2	г	г	м	м	й	й	м	м	е	е	х	х	м	м	й	й	ю	ю	е	е	я	ю	м	м					
ω_3	о	о	у	у			и	и																					

Влияние текста формализуется функцией $t' = \eta(x_4, x_7, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15})$, которая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 t^6 &= x_4^p (x_{12}^H \vee x_{12}^B x_{15}^H) x_{13}^e x_{14}^M; & t^7 &= x_4^p x_{13}^e [(x_{12}^p \vee x_{12}^B x_{15}^o) x_{14}^M \vee x_{12}^p x_{14}^c]; \\
 t^8 &= x_4^p x_{12}^p x_{13}^e (x_{14}^M \vee x_{14}^c); & t^9 &= x_4^p [x_{12}^T (x_{14}^M \vee x_{14}^c) x_{13}^e \vee x_{12}^p x_{13}^M]; \\
 t^{10} &= x_4^p x_{12}^p x_{13}^e (x_{14}^M \vee x_{14}^c); & t^{11} &= x_4^p x_{12}^p x_{13}^e x_{14}^M; & t^{12} &= x_4^p (x_{12}^p \vee x_{12}^T \vee \\
 & \vee x_{12}^B \vee x_{12}^T x_{13}^c) x_{13}^e x_{14}^M; & t^{13} &= x_4^p x_{12}^B x_{13}^e x_{14}^M; & t^{14} &= x_4^p x_{12}^T x_{13}^e x_{14}^M; \\
 t^{15} &= x_4^p (x_{12}^p \vee x_{12}^B) x_{13}^e x_{14}^M; & t^{16} &= x_4^p (x_{12}^H \vee x_{12}^B x_{15}^H) x_{13}^M; \\
 t^{17} &= x_4^p (x_{12}^p \vee x_{12}^B x_{15}^o \vee x_{12}^T) x_{13}^M; & t^{18} &= x_4^p x_{12}^T x_{13}^M; & t^{19} &= x_4^p x_{13}^e x_{14}^M; \\
 t^{20} &= x_4^p x_{13}^e x_{14}^M; & t^{21} &= x_4^p x_{13}^e x_{14}^M; & t^{22} &= x_4^p x_{13}^M.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Основа влияет на окончание только последней буквой (исключая знак пробела) формообразующего суффикса, поэтому для описания этого влияния достаточно использовать следующие выражения $p_1 = x_{10}^M \vee x_{10}^H \vee x_{10}^T$; $p_3 = x_{10}^M \vee x_{10}^H$. Здесь признак соответствует последней согласной формообразующего суффикса.

Опишем условия появления букв окончаний, т. е. функцию $Y = f(x_4, x_7, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15})$:

$$\begin{aligned}
 Y_1^e &= (t^7 \vee t^8 \vee t^{10} \vee t^{12} \vee t^{14} \vee t^{15}) p_3; & y_1^H &= p_3 (t^6 \vee t^9 \vee t^{16} \vee \\
 & \vee t^{17} \vee t^{18}); & y_1^M &= p_1 (t^6 \vee t^9 \vee t^{16} \vee t^{17} \vee t^{18}); & y_1^o &= p_1 (t^7 \vee \\
 & \vee t^8 \vee t^{10} \vee t^{12} \vee t^{14} \vee t^{15}); & y_1^a &= (p_1 \vee p_3) t^{11} \vee t^{20}; & y_1^y &= (p_1 \vee \\
 & \vee p_3) t^{13}; & y_1^B &= t^{22}; & y_1^M &= t^{19}; & y_2^H &= t^6 \vee t^{12}; & y_2^T &= t^7; & y_2^M &= t^8 \vee
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{t^9} \sqrt{t^{10}} \sqrt{t^{13}}; y_2^{\pi} = t^{11}; y_2^{\circ} = t^{13} \sqrt{t^{14}}; y_2^e = t^{15} \sqrt{t^{16}}; y_2^x = t^{17}; \\ y_3^- = t^6 \sqrt{t^9} \sqrt{t^{10}} \sqrt{t^{11}} \sqrt{t^{12}} \sqrt{\dots} \sqrt{t^{17}}; y_3^{\circ} = t^7; \\ y_3^y = t^8; y_3^{\pi} = t^{18}. \end{aligned} \quad (6).$$

Таким образом, имея глагольную основу и соответствующий ей достаточный набор переменных признаков, можно однозначно отыскать формообразующий суффикс и окончание.

Пример 1. Причастие задано основой прошедшего времени *чита*. Необходимо определить формообразующий суффикс Z и окончание $У$ полного действительного причастия прошедшего времени, женского рода, единственного числа, родительного падежа. Исходя из условия задачи, имеем $x_1^{\pi}, x_3^{\pi}, x_4^{\pi}, x_5^1, x_6^1, x_7^e, x_9^y, x_{11}^a, x_{12}^p, x_{13}^e, x_{14}^*$. Определить $z_1, z_2, z_3, y_1, y_2, y_3$.

Решение. Функция $t = \eta(x_1, x_2, x_3, x_4)$ принимает значение t^2 (3), а функция $S = \xi(x_5, x_6, x_7, x_9, x_{10}, x_{11}) - S^7$ (1), формообразующий суффикс Z (4) — $z_1 = в, z_2 = ш, z_3 = -$.

Функция $t' = \eta(x_4, x_7, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15})$ принимает значение t^2 (5), $x_{10} = ш$, тогда окончание — $y_1 = е, y_2 = й, y_3 = -$ (6). Таким образом, полученная словоформа — *читавшей*.

Список литературы: 1. *Русская грамматика*. Т. 1.—М.: Просвещение, 1980.—783 с. 2. *Виноградов В. В.* Грамматика русского языка.—М.: Изд-во АН СССР, 1960.—719 с. 3. *Математическое описание процесса склонения прилагательных* / Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, М. Ф. Бондаренко, В. М. Бондарев, З. Ю. Шабанова-Кушнаренок.—Проблемы бионики, 1980, вып. 24. с. 22—27.

Поступила в редколлегию 02.03.81.

УДК 510.62

О. В. ЛАЗАРЕНКО

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ИМЕННОГО ПРИСТАВОЧНОГО СЛОВООБРАЗОВАНИЯ

Основной целью математического описания языка является описание всех языковых процессов в виде формализованных правил, по которым ЭВМ могла бы произвести обработку текстовой информации. В рамках данной всеобъемлющей задачи выделяется ряд подзадач, решение которых в конечном счете и позволит создать действующую модель языка. Это математическое описание морфологического, словообразовательного, синтаксического и лексического уровней языка.

Данная статья посвящена проблемам описания процессов словообразования путем префиксации. Используя опыт описания системы словоизменения средствами алгебры конечных

предикатов [1] и исходя из принципиальной возможности построения математической модели словообразования [2], мы попытались описать средствами данного математического аппарата именное приставочное словообразование на материале временных и пространственных приставок.

Важной особенностью словообразования является наличие большого числа, нереализованных возможностей этой системы. Таким образом, основная задача изучения словообразования — выяснение того, что допускается системой [3]. Еще Ф. де Соссюр [4] писал, что «импровизируемое мною слово уже существует в потенции языка..., а его осуществление в речи есть факт незначительный по сравнению с самой возможностью его образования». Поэтому при описании процессов словообразования необходимо учитывать не только производные слова, имеющиеся в словаре, но и потенциально возможные производные.

Предложенная ниже модель является попыткой описания системы приставочного словообразования с учетом ее потенциальных возможностей.

В рамках данной постановки задачи процесс приставочного словообразования сводится к формированию приставки P производного слова Y в зависимости от производящей основы X и набора признаков Z , по которым производное слово Y однозначно выводится из слова X . Признаки Z определяются влиянием на слово Y мотивирующего слова X и текста T , в который входит слово Y , а зависимость производного слова от производящей основы и текста описывается функцией $Y=f(X, T)$ [2].

Наборы признаков, однозначно характеризующих влияние слова X и текста T на приставку, были введены нами в работе [2]. Там же было введено деривационное отношение, связывающее между собой мотивирующее слово X , мотивированное слово Y и набор признаков Z , для которых было справедливо следующее утверждение: если X , Y и Z находятся в деривационном отношении, т. е. $L(X, Y, Z)=1$, то всевозможные независимые друг от друга связи между X , Y и Z запишутся в виде уравнений алгебры конечных предикатов $L_1=1, L_2=1, \dots, L_n=1$, где n — число связей между X , Y , Z , а сама модель запишется в виде $L=L_1L_2\dots L_n$.

В данной статье математически описывается формирование временных и пространственных приставок в именах существительных и прилагательных. Поскольку процессы образования имен существительных и прилагательных с помощью приставок оказались идентичными, это послужило основанием для объединения их в один класс. Для того чтобы ограничить задачу описания приставочного словообразования рамками временных и пространственных именных приставок, были введены признаки ξ_1 — ξ_4 : ξ_1 — вид морфемы со значением «п» — приставка, «н» — неприставка; ξ_2 — вид приставки со значением «р» — русская, «и» — иностранная; ξ_3 — тип приставки со значением

«и» — именная, «г» — глагольная; ξ_4 — класс приставки со значением «п» — пространственно-временная, «н» — непространственно-временная.

Зафиксировав значения $\xi_1 = п$, $\xi_2 = р$, $\xi_3 = и$, $\xi_4 = п$, мы тем самым сузили область описания.

Для математического описания пространственных и временных именных приставок необходимы следующие признаки из числа введенных ранее признаков для приставочного словообразования в целом [2]: x_1 — признак первой буквы основы; x_5 — признак семантического класса основы; x_6 — признак употребительности приставки; t_1 — пространственный семантический признак приставки; t_2 — временной семантический признак приставки.

Области изменения этих переменных задаются следующими уравнениями:

$$x_1^a \vee x_1^b \vee \dots \vee x_1^r \vee x_1^s \vee x_1^n = 1; \quad x_5^1 \vee x_5^2 \vee \dots \vee x_5^{10} \vee x_5^{11} \vee x_5^{12} = 1; \\ x_6^y \vee x_6^n = 1; \quad t_1^1 \vee t_1^2 \vee \dots \vee t_1^{10} \vee t_1^{11} = 1; \\ t_2^1 \vee t_2^2 \vee t_2^3 \vee t_2^4 = 1.$$

Значения переменной x_5 соответственно обозначают: «части живых организмов и растений», «природные образования», «конкретные существительные, связанные с жизнью и работой человека», «географические названия гор и водоемов», «существительные, обозначающие определенную общность (рабочую, политическую, научную и т. д.)», «предопределяющая совокупность», «конкретные временные понятия», «важные события, ставшие точкой отсчета времени», «великие люди эпохи», «абстрактные временные понятия», «временные понятия, относящиеся к прошлому». В двенадцатый класс вошла небольшая группа слов, мотивированных глаголами и прилагательными. Аналогично значения переменной t_1 обозначают соответственно расположение «выше чего-либо», «на чем-либо», «ниже чего-либо», «впереди чего-либо», «позади чего-либо», «вдоль чего-либо», «в непосредственной близости от чего-либо», «вокруг чего-либо», «за пределами чего-либо», «в пределах чего-либо», «между чем-либо». Значения переменной t_2 обозначают «предшествование», «непосредственное предшествование», «следование», «предварительность».

Теперь, задав на множестве введенных нами признаков необходимые отношения, опишем правила образования производных слов с помощью временных и пространственных приставок. Как указывалось выше, процесс приставочного словообразования сводится к формированию приставки $P = p_n p_{n-1} \dots p_1$ производного слова Y в зависимости от производящей основы и набора грамматических и семантических признаков. Символы p_i обозначают соответствующие буквы приставки, причем первой считаем букву, присоединяющуюся к основе.

На нечетных местах стоят гласные буквы приставки, на четных — согласные. В случае, когда приставка заканчивается на согласный, p_1 считаем равным — или $\bar{\bar{}}$, в зависимости от первой буквы производящей основы. При наличии двух или нескольких стоящих рядом согласных в приставке считаем, что соответствующие нечетные $p = \bar{\bar{}}$.

Использование в качестве математического аппарата алгебры конечных предикатов предполагает побуквенное описание формируемого фрагмента (окончания, суффикса, префикса и т. д.) [1]. Поэтому приводимые ниже словесные формулировки правил носят достаточно условный характер и служат главным образом для пояснения приведенных математических описаний.

Для первой буквы приставки функция зависимости однозначно описывается следующими системами условий:

если мотивирующее слово начинается на $e, \bar{e}, \bar{y}, \bar{y}$, а приставка оканчивается на согласный, то на первом месте формируемой приставки пишется $\bar{\bar{}}$:

$$(x_1^e \vee x_1^{\bar{e}} \vee x_1^{\bar{y}} \vee x_1^{\bar{y}}) (p_2^{\bar{d}} \vee p_2^{\bar{z}}) \supset p_1^{\bar{\bar{}}}; \quad (1)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «предшествование» или «следование», но является неупотребительной, или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение вдоль чего-либо» или «расположение вокруг чего-либо», то на первом месте формируемой приставки запишется буква o :

$$q_2 (t_2^1 \vee t_2^3 x_6^{\bar{h}}) \vee q_1 (t_1^6 \vee t_1^8) \supset p_1^o; \quad (2)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение на чем-либо» или «расположение позади чего-либо» или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{11} , а приставка означает «предшествование», то на первом месте формируемой приставки запишется буква a :

$$q_1 (t_1^5 \vee t_1^2) \vee x_5^{11} t_2^1 \supset p_1^a; \quad (3)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение в непосредственной близости от чего-либо» или же мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на первом месте формируемой приставки запишется буква i :

$$q_1 t_1^7 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_1^i; \quad (4)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение за пределами чего-либо» или мотивирующее слово относится к семантическим классам $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следование» и

является употребительной, то на первом месте формируемой приставки запишется буква е:

$$(q_1 \vee x_5^5) t_1^9 \vee q_2 t_2^3 x_6^y \supset p_1^e. \quad (5)$$

Для второй буквы приставки имеем следующую систему условий: если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставки означают «расположение выше чего-либо», «расположение ниже чего-либо» или «расположение впереди чего-либо», или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, x_5^{10} , а приставка означает «непосредственное предшествование», или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{12} , а приставка означает «предварительность», или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «предшествование, то на втором месте формируемой приставки запишется буква д:

$$q_1 (t_1^1 \vee t_1^3 \vee t_1^4) \vee (q_2 \vee x_5^{10}) t_2^2 \vee x_5^{12} t_2^4 \vee q_2 t_2^1 \supset p_2^d; \quad (6);$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение между чем-либо», то на втором месте формируемой приставки запишется буква ж: $(q_1 \vee x_5^5) t_1^{11} \supset p_2^j$ (7);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение позади чего-либо» или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{11} , а приставка означает «предшествование», то на втором месте формируемой приставки запишется буква з: $q_1 t_1^5 \vee x_5^{11} t_2^1 \supset p_2^z$ (8);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение вдоль чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следование» и является неупотребительной, то на втором месте формируемой приставки запишется буква п: $q_1 t_1^6 \vee q_2 t_2^3 x_6^n \supset p_2^p$ (9);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение на чем-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов: $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение за пределами чего-либо», то на втором месте формируемой приставки запишется буква н: $q_1 t_1^2 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^9 \supset p_2^n$ (10);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение в непосредственной близости от чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а при-

Ставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на втором месте формируемой приставки запишется буква р:

$$q_1 t_1^7 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_2^p; \quad (11)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение вокруг чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следование» и является употребительной, то на втором месте формируемой приставки запишется буква л: $q_1 t_1^8 \vee q_2 t_2^3 x_5^y \supset p_2^a$ (12).

Третья буква приставки характеризуется следующей системой условий:

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение ниже чего-либо» или «расположение вокруг чего-либо» или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{11} , а приставка означает «предшествование», то на третьем месте формируемой приставки запишется буква о:

$$q_1 (t_1^3 \vee t_1^8) \vee x_5^{11} t_2^1 \supset p_3^o; \quad (13)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение впереди чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, x_5^{10} , а приставка означает «непосредственное предшествование», или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{12} , а приставка означает «предварительность», или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение между чем-либо», то на третьем месте формируемой приставки запишется буква е:

$$q_1 t_1^4 \vee (q_2 \vee x_5^{10}) t_2^2 \vee x_5^{12} t_2^4 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^{11} \supset p_3^e. \quad (14)$$

Для четвертой буквы приставки имеем:

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение ниже чего-либо» или «расположение в непосредственной близости от чего-либо» или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{11} , а приставка означает «предшествование», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква п:

$$q_1 (t_1^3 \vee t_1^7) \vee x_5^{11} t_2^1 \supset p_4^p; \quad (15)$$

если мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^1 , x_5^2 , x_5^3 или x_5^4 , а приставка означает «расположение выше чего-либо», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква н: $q_1 t_1^1 \supset p_4^n$ (16);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение

между чем-либо», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква м:

$$(q_1 \vee x_5^5) t_1^{11} \supset p_4^m; \quad (17)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение за пределами чего-либо», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква в: $(q_1 \vee x_5^5) t_1^9 \supset p_4^b$ (18);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следование» и является употребительной, то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква с: $q_2 t_2^3 x_6^y \supset p_4^c$ (19);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение вокруг чего-либо», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква к: $q_1 t_1^8 \supset p_4^k$ (20);

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на четвертом месте формируемой приставки запишется буква т: $(q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_4^t$ (21).

Для пятой буквы приставки:

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение вокруг чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следование» и является употребительной, то на пятом месте запишется буква о:

$$q_1 t_1^4 \vee q_2 t_2^3 x_6^y \supset p_5^o; \quad (22)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на пятом месте запишется буква у:

$$(q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_5^y. \quad (23)$$

Для шестой буквы:

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на шестом месте запишется буква н:

$$(q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_6^n; \quad (24)$$

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^4$, а приставка означает «расположение впереди чего-либо» или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, x_5^{10} , а приставка означает «непосредственное предшествование», или мотивирующее слово относится к семантическому классу x_5^{12} , а приставка означает «предварительность», или мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^7 - x_5^9$, а приставка означает «следова-

ние» и является употребительной, то на шестом месте запишется буква п:

$$q_1 t_1^4 \vee (q_2 \vee x_5^{10}) t_2^2 \vee x_5^{12} t_2^4 \vee q_2 t_2^3 x_6^y \supset p_6^n. \quad (25)$$

Для седьмой буквы:

если мотивирующее слово относится к одному из семантических классов $x_5^1 - x_5^5$, а приставка означает «расположение в пределах чего-либо», то на седьмом месте запишется буква в:

$$(q_1 \vee x_5^5) t_1^{10} \supset p_7^n. \quad (26)$$

В формулах (1)–(26) были приняты следующие сокращения:

$$q_1 = x_5^1 \vee x_5^2 \vee x_5^3 \vee x_5^4; \quad q_2 = x_5^7 \vee x_5^8 \vee x_5^9.$$

Решая полученные уравнения, мы можем сформировать необходимую приставку из числа пространственных и временных именных префиксов. Рассмотрим это на примере формирования пространственной приставки *на-*.

Пусть задан корень *колен-*, принадлежащий семантическому классу x_5^1 , и семантический признак приставки со значением «расположения на чем-либо», т. е. признак t_1^2 . Чтобы сформировать нужную приставку, отыскиваем уравнения, в которых фигурируют заданные переменные. Это уравнения (3) и (10). Преобразуем их в соответствии с законами выражения связей друг через друга и подставим в них имеющиеся данные:

$$\begin{aligned} (q_1 (t_1^5 \vee t_1^2) \vee x_5^{11} t_2) \supset p_1^a &= \overline{(q_1 (t_1^5 \vee t_1^2) \vee x_5^{11} t_2)} \vee p_1^a = \\ &= q_1 (t_1^5 \vee t_1^2) (t_1^{11} t_2) \vee p_1^a = (\overline{q_1} \vee \overline{(t_1^5 \vee t_1^2)}) (\overline{x_5^{11}} \vee \overline{t_2}) \vee p_1^a = \\ &= (\overline{x_5^1} \overline{x_5^2} \overline{x_5^3} \overline{x_5^4} \vee \overline{t_1^5} \overline{t_1^2}) (\overline{x_5^{11}} \vee \overline{t_2}) \vee p_1^a = (\overline{1} \overline{x_5^2} \overline{x_5^3} \overline{x_5^4} \vee \overline{t_1^5} \times \\ &\times \overline{1}) (\overline{x_5^{11}} \vee \overline{t_2}) \vee p_1^a = (0 \vee 0) (\overline{x_5^{11}} \vee \overline{t_2}) \vee p_1^a = 0 \vee p_1^a = p_1^a, \end{aligned}$$

т. е. получаем $p_1 = a$.

Аналогично решаем уравнение (10):

$$\begin{aligned} q_1 t_1^2 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^9 \supset p_2^n &= \overline{(q_1 t_1^2 \vee (q_1 \vee x_5^5) t_1^9)} \vee p_2^n = \\ &= q_1 t_1^2 (q_1 \vee x_5^5) t_1^9 \vee p_2^n = (\overline{q_1} \vee \overline{t_1^2}) ((\overline{q_1} \vee \overline{x_5^5}) \vee \overline{t_1^9}) \vee p_2^n = \\ &= (\overline{q_1} \vee \overline{t_1^2}) (\overline{q_1} \overline{x_5^5} \vee \overline{t_1^9}) \vee p_2^n = (\overline{1} \overline{x_5^2} \overline{x_5^3} \overline{x_5^4} \vee \overline{1}) (\overline{1} \overline{x_5^2} \overline{x_5^3} \times \\ &\times \overline{x_5^4} \overline{x_5^5} \vee \overline{t_1^9}) \vee p_2^n = 0 \overline{t_1^9} \vee p_2^n = p_2^n, \text{ т. е. } p_2 = n. \end{aligned}$$

Таким образом мы сформировали искомую приставку *на-*.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Бондаренко М. Ф. Математическая модель склонения полных непряжательных имен прилагательных. — Науч. и техн. информация, 1979, № 6, сер. 2, с. 9–14. 2. Бондаренко М. Ф., Лазаренко О. В. Об одном подходе к математическому описанию приставочного словообразования. — АСУ и приборы автоматки, 1981, вып. 58, с. 11–12. 3. Улуханов И. С. О закономерностях сочетаемости словообразовательных морфем. — Русский язык Грамматические исследования. — М.: Наука, 1967, с. 166–204. 4. Де Соссюр Ф. Курс общей лингвистики. — М.: Изд-во иностр. лит., 1933. — 165 с.

Поступила в редколлегию 17.02.81.

ОБ АЛГОРИТМЕ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК ОРФОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО СЛОВАРЯ

Для всех информационных систем характерен факт отказа от выполнения запроса, если какое-то имя запроса не найдено в словаре системы. В силу того что такие ситуации считаются нерегулярными, а стало быть, и не первостепенной важности в разрешении, то они просто отмечаются в диагностических сообщениях и пользователю предлагается повторить запрос после нахождения и исправления ошибки.

Одними из частых ошибок, зачастую досадных, допущенных не в связи с незнанием того или иного языка информационной системы, являются ошибки орфографического типа (ОР-типа). Такие ошибки возникают из-за неправильной работы на клавиатуре перфорационных устройств, ошибочного написания слова, нечеткого написания определенного символа и т. д., что приводит к повторному отладочному вводу и обработке исходного текста запроса в ЭВМ и увеличению количества «отладочных прогонов» программы и др. Известно, что более 80% всех орфографических ошибок возникают из-за искажения одного или нескольких символов в слове, принадлежащем запросу пользователя или исходной программе [1].

Поэтому решение вопроса автоматического исправления ошибок ОР-типа в лексических единицах входных языков информационных систем представляет важный этап в создании эффективного интерфейса человека и вычислительной системы.

Решение поставленной проблемы предусматривает следующие этапы. 1. Классификация ошибок ОР-типа в языках взаимодействия человека и ЭВМ. 2. Определение мер формального удобства строк символов. 3. Выделение окрестности правдоподобных слов и установление ее границ. 4. Контекстное выделение корректирующего слова.

В результате исследования ошибок орфографии во входных запросах информационных систем, совершаемых пользователями, выяснилось, что ошибки ОР-типа относятся к одному из следующих классов: 1) неправильное написание одного символа в слове; 2) пропуск одного символа; 3) включение одного лишнего символа; 4) перестановка двух соседних символов; 5) наличие более одного или одновременно нескольких ошибок из классов 1—4.

Эти ошибки можно разделить на две группы: одноместные — 1, 2, 3 и многоместные — 4, 5.

Определение. Ошибку в ОР-типа назовем одноместной, если для ее исправления необходимо произвести замену одного

символа в слове одним из следующих способов: а) $\delta_1: \gamma_i \rightarrow$
 б) $\delta_2: \gamma_i \rightarrow \langle _ \rangle$; в) $\delta_3: \gamma_i \rightarrow \langle \| \rangle$.

Здесь $\gamma_i, \gamma_j \in T$ — символы алфавита T ; $\langle _ \rangle$ — символ «пробел», т. е. вместо символа γ_i ничего в слово не добавляется; $\langle \| \rangle$ — знак операции конкатенации или приклеивания двух и более цепочек символов друг к другу так, чтобы между символами не оставалось пробелов.

Для полноты операций δ над множеством T необходимо включить в их состав следующую: г) $\delta_4: A \rightarrow B$ — сравнить A и B на равенство. Данная операция выполняется обязательно перед выполнением каждой из а) — в) операций, потому что прежде чем производить замену, необходимо найти слово, отличающееся от исходного на один символ в одной позиции.

Исправление любой одноместной ошибки и ошибки перестановки двух соседних символов требует предварительного отбора из машинного словаря того подмножества слов, среди которых присутствует корректирующее слово. Для выбора такого подмножества слов применяется метод установления формального подобия между входным словом и словами корректирующего словаря, который позволяет с наименьшими затратами выделить окрестность правдоподобных слов [2].

При определении мер подобия желательно выбрать такую, чтобы можно было использовать без больших затрат для сравнения конечных строк символов, чтобы затрачиваемое время на определение подобия было соизмеримо с временем поиска в корректирующем словаре.

В данной статье предлагается мера подобия, которая позволяет «рассеивать» в хеш-таблице [2] формально подобные имена в подобласти памяти, границы которых известны.

В соответствии со свойствами аддитивной функции адресации [2] и установленными ограничениями на класс ошибок ОР типа, возможных исправить численную меру подобия между строками символов, можно определить количество несовпавших символов. При этом границы окрестности O_{i, S^0} слов, подобных исходному, будут определяться значениями максимальной — $P_{\gamma_i \max}$ и минимальной — $P_{\gamma_i \min}$ частоты символов следующим образом:

$$O_{i, S^0} = [\text{Адр}(A) + kP_{\gamma_i \max}; \text{Адр}(A) - kP_{\gamma_i \max}]$$

$$l_A - 1 < l_i < l_A + 1, i = 1, 2, \dots$$

Здесь k — поправочный коэффициент на целочисленность значения адреса; l_A — длина входного слова A в символах S^0 — множество имен корректирующего словаря; $\text{Адр}(A)$ — адрес входного имени A , вычисленный в соответствии с аддитивной функцией хеширования; O_{i, S^0} — окрестность сло

из S^0 , подобных входному A с мерой подобия $\mu_{(A, S^0)}^1$ (индекс 1 означает одноместность ошибки).

Такое определение границ окрестности слов, подобных входному, основано на том, что совершение ошибки ОР-типа возможно на любом символе алфавита T : на символе с максимальным значением частоты или минимальным, при этом в процессе поиска справедливо следующее условие:

$$\text{Адр}(A) + kP_{\gamma, \text{max}} \leq |TS_{\text{max}}|; \text{Адр}(A) - kP_{\gamma, \text{max}} \geq |TS_{\text{min}}|,$$

где $|TS_{\text{max}}|$ и $|TS_{\text{min}}|$ — значения адресов первой и последней записей файла рассевивания, т. е. головных записей хеш-таблицы. Ограничение на длину строки символов связано с одноместностью ошибки, т. е. может быть включен один лишний символ или пропущен один символ относительно правильного слова.

Среди слов определенной окрестности $O_{\mu_{(A, S^0)}^1}$ выбираются все слова, отличающиеся от входного одним символом в одной позиции.

Определение. Слова A и B подобны с мерой $\mu_{(A, B)}^{t=1}$, если а) $a_i \neq b_j$ и $a_1 = b_1, a_2 = b_2, \dots, a_{i-1} = b_{j-1}, \dots, a_n = b_m, a_i \in A, b_j \in B$ при $n = m, i = j$, т. е. в одном из слов допущена ошибка типа 1 — замена символа (здесь $t = 1$ — количество несовпавших символов); б) $|l_A - l_B| = 1$ и $A \cap B = a_i$, причем $A' = \langle a_1, a_2, \dots, a_{i-1} \rangle \parallel \langle a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n \rangle = \langle a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n \rangle$ и $A' = B$ аналогично $\bar{A} \cap B = b_j$, т. е. в одном из слов допущена ошибка типа 2 или 3 — лишний или пропущенный символ.

Заданная мера обладает следующими свойствами: $\mu_{(A, A)}^t = 0$ — свойство рефлексивности, т. е. любое слово подобно себе с $\mu^t = 0$; $\mu_{(A, B)}^t = \mu_{(B, A)}^t$ — свойство симметричности; если $\mu_{(A, B)}^t = \mu_{(B, C)}^t$, то равенство $\mu_{(A, B)}^t = \mu_{(B, C)}^t \neq \mu_{(A, C)}^t$ может не выполняться — свойство антитранзитивности, например, если $A = \text{авс}, B = \text{свд}, C = \text{есд}$, то $\mu_{(A, B)}^2 = \mu_{(B, C)}^2$, но $\mu_{(A, B)}^2 = \mu_{(B, C)}^2 \neq \mu_{(A, C)}^3$.

В связи с последним свойством меру $\mu_{(A, S^0)}^t$ можно назвать отношением толерантности на множестве S^0 [3]. В общем случае отношение толерантности может быть справедливо для всех слов русского языка с одним-единственным ограничением на t . Этого свойства недостаточно для выделения из окрестности подобных слов корректирующего слова, т. е. слова, являющегося правильным относительно входного.

Выбор корректирующего слова можно произвести на основании контекста запроса, который может содержать в зависимости от свойств информационной системы от одного до n поисковых образов документов или фраз формального языка.

Пусть $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ — множество документов технико-экономической информации, обрабатываемых в информационной системе, а отображение $\varphi: D \rightarrow 2E$, где $2E$ — множество всех подмножеств множества E -имен словаря S^0 , является переводом

каждого документа $d_i \in D$ в его поисковый образ $\varphi(d_i)$, $i = 1, m$. Тогда запрос может содержать информацию о множестве $\varphi(d_i)$ и будет представляться в виде $z \rightarrow z(\varphi(d_i), z)$, где z — множество формальных условий, накладываемых информационной системой на язык запросов; $\varphi(d_i)$ — множество поисковых образов документов.

Определение. Назовем совокупность поисковых образов $\varphi(d_1, d_2, \dots, d_n)$, представленных в одном запросе, контекстом запроса z .

Определение. Корректирующей функцией Q назовем отображение $Q: \tilde{S}^0 \rightarrow 2^D \cup 2^z$, где \tilde{S}^0 — множество слов, подобных входному с мерой $\mu_{(A, S^0)}^1$, $\tilde{S}^0 \in O_{\mu_{(A, S^0)}^1}$; $2^D, 2^z$ — соответственно множество всех подмножеств множества D (документов) и z (запросов) при условии, что 1) $\varphi(d_i) \cap z \neq \emptyset$ и 2) $\varphi(d_i) \cap \tilde{S}^0 \neq \emptyset$.

Условия 1, 2 являются необходимыми условиями существования корректирующего слова в выбранной окрестности подобных слов $O_{\mu_{(A, S^0)}^1}$. Условие 1 говорит о том, что в запросе должно содержаться хотя бы одно имя, присутствующее в A_{d_i} -множестве имен документов или в Aa_{d_i} -множестве имен атрибутов поискового образа документа $\varphi(d_i)$. Условие 2 определяет непустоту множества подобных слов \tilde{S}^0 относительно A_{d_i} или $Aa_{d_i} \in \varphi(d_i)$.

Построение корректирующей модели. Пусть дано множество $U = 2^D$ подмножеств документов D . Подмножество D_j , $j = 1, 2, \dots, |U|$ назовем запрашиваемым классом документов, каждый из которых задан некоторой информацией $I_0(\varphi(D_j))$, $D_j = \bigcup_{i=1}^j d_i$. Аналогично дано описание словарной части запроса $z_i^{c^n}: I(S_i^{c^n}) = I(A_{d_i}, Aa_{d_i})$ и описание корректирующего множества $I(\tilde{S}^0)$.

Задача исправления ошибочного входного слова $A \in z_i^{c^n}$ состоит в том, чтобы по информации $I_0(\varphi(D_j))$ о запрашиваемых классах документов и описанию $I(z_i^{c^n})$ определить существование предиката $P_{D_j}(A^0)$ или отношения $A^0 \in \varphi(D_j)$, т. е. выбрать из \tilde{S}^0 одно-единственное (или группу смысловых синонимов) слово A^0 , являющееся корректировочным для входного A .

Требуется построить алгоритм AL , реализующий поставленную задачу при одновременном выполнении условий 1, 2 такой, что $AL \varphi(d_i) \cap z_i^{c^n} \cup \varphi(d_i) \cap \tilde{S}^0 = \varphi(d_i) \cap (z_i^{c^n} \cup \tilde{S}^0) = \{\alpha\} \cup \{\beta\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $A^0 \in \tilde{S}^0$, где $\{\alpha\}$ — подмножество слов словар-

ной части запроса с ошибочным словом; $\{\beta\}$ — подмножество из элементов множеств A_{d_i} , Aa_{d_i} , z_i^{cl} , \tilde{S}^0 , не участвующие в поиске ответа на запрос.

Реализацию алгоритма можно произвести вычислением некоторого расстояния между элементами подмножества \tilde{S}^0 и контекстом запроса. Под контекстом запроса будем понимать объединение словарного состава запроса z_i^{cl} и множества имен $\{A_{d_i}, Aa_{d_i}\}$ поискового образа документов $\varphi(d_i): K_T = z_i^{cl} \cup \{A_{d_i}, Aa_{d_i}\}$, где K_T — контекст запроса.

Тогда под расстоянием ρ_{ϵ_i} между контекстом и подмножеством \tilde{S}^0 будем понимать то количество словарных единиц из \tilde{S}^0 , которое увеличивает его избыточность. Пределом избыточности является состояние контекста $K_T = z_i^{cl} \cup \varphi(d_i)$, при котором подмножество $\tilde{S}^0 = \emptyset$, т. е. пусто.

Вычисление расстояния ρ_{ϵ_i} между множествами K_T и \tilde{S}^0 представляет собой операцию, при которой элементы $A_i \in K_T$ и $A_j \in \tilde{S}^0$ считаются вершинами графа и соединяются дугами, если $A_i = A_j$ и подсчет числа дуг дает значение ρ_{ϵ_i} . При этом в графе дуги не должны пересекаться и одна вершина должна быть связана с другими не более, чем одной дугой.

Алгоритм. Исправление ошибок ОР-типа по контексту с применением метода корректирующего словаря. Данный алгоритм использует словарную информацию запроса z_i^{cl} и поисковые образы тех документов $\varphi(d_i)$, которые указаны в запросе.

Шаг 1. Подготовка контекста K_T путем объединения словарной части запроса z_i^{cl} и множества $\{A_{d_i}, Aa_{d_i}\} \in \varphi(d_i)$, $\rho_{\epsilon_i} \leftarrow 0$.

Шаг 2. Построение матрицы расстояний ρ_{ϵ_i} , ее заполнение с помощью \tilde{S}^0 .

Шаг 3. Подсчет количества ненулевых элементов матрицы, т. е. вычисление ρ_{ϵ_i} .

Шаг 4. Значения элементов $A_j \in \tilde{S}^0$, для которых элемент матрицы $a_{ij} = 1$ включить в словарную часть запроса z_i^{cl} , произведя замену A_i на A_j .

Шаг 5. Выдать скорректированную словарную часть запроса z_i^{cl} .

Данный алгоритм является очень быстрым, так как время поиска расстояния пропорционально $(\{A_{d_i}, Aa_{d_i}\} \cup z_i^{cl}) \times \tilde{S}^0$. Задача поиска и корректировки орфографических ошибок с помощью метода корректирующего словаря такова, что вся матрица расстояний ρ_{ϵ_i} для каждого запроса одновременно полностью помещается в оперативной памяти. Поэтому время исправления ошибки ОР-типа соизмеримо с общим временем распознавания запроса.

Список литературы: 1. *Morgan R. L. Spelling Correction in Systems Programs.*—*Comm. of the ACM, 1970, 13, № 2, p. 90—94.* 2. *Дедиков Э. А., Чен Р. Н.* Организация корректирующего машинного словаря имен с помощью аддитивной функции хеширования.—*АСУ и приборы автоматки, 1970, вып. 27, с. 31—34.* 3. *Шрейдер Ю. А.* Равенство, сходство, порядок.—*М.: Наука 1971.—255 с.*

Поступила в редколлегию 13.12.80

УДК 62.506.2

Е. А. СОЛОВЬЕВА, О. А. ЖУКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ ЛЕКСИЧЕСКОЙ СЕМАНТИКИ РУССКОГО ГЛАГОЛА

Известно много фактов, подтверждающих, что тексту на естественном языке (ЕЯ) можно поставить в соответствие некоторый смысл и, наоборот, определенный смысл выразить в виде текста. Один и тот же смысл с любой степенью точности выражается средствами различных языков (если этих средств достаточно), например при переводе с одного ЕЯ на другой. Преобразованием смысла в текст и обратно различными людьми и одним и тем же человеком в разное время могут существенно отличаться; будем рассматривать преобразования, соответствующие нормам языка.

Для разработки действующих моделей ЕЯ, в частности русского, целесообразно описывать отношение «смысл↔текст» [1] на различных уровнях. Формализация этого отношения включает задачи изучения трех взаимосвязанных систем: 1) множества текстов, т. е. текстов, построенных в соответствии с нормами грамматики языка; 2) множества смыслов; 3) преобразования смысловых элементов в текстовые для данного языка и наоборот.

Решение задачи 3 необходимо для автоматической обработки текстов (АОТ), что считается центральной задачей лингвистики [1], кибернетики и других наук. Задача 1 детально рассмотрена в грамматике русского языка [2,3 и др.] (обычно неотделимо от остальных задач), хотя до сих пор «грамматический строй языка плохо изучен» [4], особенно с точки зрения его формализации. Наиболее сложной и менее изученной представляется задача 2 — исследование семантических элементов, их структуры, взаимосвязей, процессов взаимодействия, выбор языка для описания элементов семантики. Задача 2 является базовой для решения задачи 3, а также имеет самостоятельное значение и необходима при изучении любых ЕЯ.

Известно [5 и др.], что смысл выражается средствами текста избыточно (существует и менее распространенная обратная тенденция семантической компрессии). Так, текст считается

семантически связанным, если в лексических значениях синтаксически связанных слов смысловые компоненты повторяются. Более того, человек обычно выбирает то осмысление предложения, при котором повторяемость семантических элементов достигает максимума. Это позволяет сделать вывод о том, что формализованная запись смысла может быть более экономной, чем его запись на ЕЯ.

Таким образом, для описания отношения $L(X, Y)$, где X включает компоненты смысла, Y — фрагменты текста, необходимо изучение X и Y . Задача исследования компонентов X с целью последующего моделирования $L(X, Y)$ на уровне лексической семантики и является основной задачей данной работы. Будем придерживаться постановки задачи, предложенной в [11], со следующими ограничениями.

1) Под фрагментами текста понимаются любые конструкции текста, а не общепринятые в лингвистике (словоформы, морфемы и т. п.). Видимо, в первую очередь следует описывать не любые отношения $L(X, Y)$, а наиболее практически важные, выбирая при этом в качестве фрагментов текста не произвольные буквенные цепочки, а конкретные лингвистические объекты.

2) Поддерживая принцип однозначной зависимости текста от смысла, следует учитывать, что полный набор признаков для однозначного выбора текста может включать и внеязыковые признаки. Кроме того, принцип однозначности может заведомо не выполняться при рассмотрении частной задачи, например фрагментов лексической семантики. Так, известно значение синонимии в лексике языка («зреть» и «спеть» о фруктах и т. п.) [5].

Смысл слова имеет сложную внутреннюю организацию, причем не менее сложную, чем организация предложения [5]. Значения слов (словосочетаний) формируются из образующих их частей не только по простым законам суммирования, но и по более сложным (например, согласования, повторяемости, зачеркивания) [5 и др.]. Отмечается, что больший теоретический интерес представляет изучение не семантики конкретных лексем, а более общих лексических признаков [6].

Рассмотрим задачу изучения фрагментов лексической семантики на примере лексико-словообразовательных признаков (ЛСП) глаголов русского языка, мотивированных глаголами. Если в области морфологии языка имеется сравнительно устойчивая система грамматических категорий и их значений [2, 3], то в области лексической семантики, несмотря на определенные успехи [2, 3, 5, 7, 8, и др.], нет общепринятой и достаточно четкой классификации ЛСП и лексико-словообразовательных значений (ЛСЗ).

Наиболее полно система ЛСП описана в русской грамматике [2] (РГ), поэтому будем опираться в основном на это опи-

сание. Ввиду того что система ЛСП в РГ не является формальной, были проведены детальные исследования ЛПС, отдельные результаты которых приведены ниже.

Мы не ставили пока целью введение терминологии типа «категория», «значение» и т. д. при описании ЛСП, хотя терминология РГ не всегда годится из-за недостаточной формализованности. Так, частные словообразовательные значения определяются как более узкие по сравнению с общими словообразовательными значениями и не описываются в РГ.

В таблице представлена разработанная нами иерархическая классификация ЛСП по признаку значения словообразовательного типа «направление действия в пространстве [2, с. 395]. Проанализируем кратко полученные в ней результаты.

№	ЛСЗ	Валентность ЛСЗ	Примечания	
			1	2
1	2	3	4	5
1	Приближение	ТК, Р		Движение
		ТК, Ц	С	
			С, 0	
		ТК*, 0		Не движение
2	Удаление	ТН	Р	Движение
			С, 0	
		ТК	С	
			С, 0	
		ТН*	Световое явление	
		ТН*, 0	Другие значения	
3	Из разных мест в одно	ТН ^{л***} , ТК, С ^л		
		ТН ^л , ТК, О ^л		
4	Из одного места в разные	ТН, ТК ^л , С ^л		
		ТН, ТК ^л , О ^л		
5	Из одного места в другое	ТН, ТК		
6	Друг к другу	ТН**, ТК**		
7	Вверх	По вертикали		К
		По любому пути	Кратно	К
			Некратно	К
8	Вниз	К		
9	Вперед	К		

10	Разнонаправленность действия		К		
11	Внутри		0		
12	Наружу	Пересекая границы	0		
		Безотносительно к пересечению границ	0		
13	Под		0, К		
14	Мимо		0		
15	Сквозь		0		
16	За		0		
17	Между		0		
18	Вокруг	Полностью	Изнутри	0	Движение
			Снаружи	0	Не движение
			Не полностью	0	
		Не полностью	0	Движение	
19	На поверхность	Покрывать ее	0, ТК		
			0, ТК		
19	На поверхность	Покрывать ее	Сплошь	0, ТК	
20	С поверхности		0, ТН		

* — функцию начальной конечной точки выполняет только предмет;

** — функцию начальной конечной точки выполняет только субъект;

*** — верхний индекс свидетельствует о реализации нескольких валентностей данного типа.

В примечании 1 указываются, где это необходимо, валентности мотивирующего глагола, в примечании 2 — его значение, которое влияет на классификацию. Другие значения в примечании 2 относятся к глаголам не движения и не световых явлений.

Ряд значений ЛСП, которые РГ относит к рассматриваемому типу, на наш взгляд, к нему не относится:

а) значение «доведение действия до определенного предела в пространстве» обозначает предел действия, а не его направление (Унни, например, относит это значение к типу, характеризующему «как бы обстоятельство меры» [9, с. 16]);

б) значения «дополнительное увеличение размеров предмета» и «очищение, удаление всех остатков» определяют не направление действия в пространстве, а изменение объекта;

в) значение «умещение на определенном пространстве» характеризует местонахождение предмета безотносительно к направлению его движения в это место.

На основании перечисленных аргументов четыре рассмотренных значения не были включены в классификацию.

В то же время ЛСЗ направления действия в пространстве: «из разных мест в одно», «из одного места в другое», «вниз», «вперед», «внутри предмета», «под предмет», «сквозь предмет», «за предмет», «между предметами», «с поверхности», «разнонаправленность действия», «друг к другу» взяты нами из РГ без изменений.

Рассмотрим значение ЛСП № 1 (таблица) («приближение»). В РГ выделены значения: «приближение, присоединение к чему-либо», которые выражают лексико-словообразовательными формантами (ЛСФ) *под-* (например, *подойти*) и *при-* (*прилипнуть*); «прибытие или доставка» (*при-*: *прийти*, *от-*: *отвезти*). Анализ приведенных значений показывает, что они имеют общее значение — «приближение», выраженное приведенными ЛСФ. Дополнительные значения, приведенные в РГ, обеспечиваются реализацией различных валентностей * ЛСЗ, определенным значением глагола, к которому присоединяется ЛСФ, либо различными валентностями глагола. Под реализацией валентности понимаем наличие той или иной валентности из валентностей, возможных у данного ЛСП.

Например, значение из РГ «присоединение» реализуется, если мотивирующий глагол не относится к глаголам движения (*строить*→*подстроить*, *крутить*→*прикрутить*). Значение «прибытие» обеспечивается реализацией валентности «достижение цели», наличием валентности «субъект» (при этом нет валентности «объект») у мотивирующего глагола, причем последний должен быть глаголом движения (*идти*→*прийти*).

Значение «доставка» обеспечивается реализацией тех же факторов, что и «прибытие», плюс наличие валентности мотивирующего глагола «объект», которой нет в ЛСЗ «прибытие» (*везти*→*привезти*).

Таким образом, выделено «в чистом виде» ЛСЗ «приближение» и показано, что перечисленные выше значения из РГ являются не самостоятельными значениями ЛСП направления действия в пространстве, а получены с учетом влияния приведенных факторов.

Рассмотрим значение ЛСП № 2 «удаление». РГ выделяет значения: «удаление от чего-либо на определенное расстояние, отделение» (*от-*: *отойти*, *от---**и₄-*: *отсадить*, *от---**ива-*: *отблескивать*): «убытие, удаление» (*у-*: *увезти*, *уйти*). Перечисленные значения имеют общий семантический компонент — «удале-

* Под валентностями понимаются «семантически обязательные участники ситуаций, описываемых глаголами» [5, с. 125].

ние», который выделен как самостоятельное ЛСЗ. Остальные значения из РГ содержат комбинацию значения «удаление» и ряда других факторов, аналогичных описанным выше для значения «приближение».

Рассмотрим значение «на поверхность» [2, с. 395], которое уточняется в различных местах РГ. В [2, с. 360, 383] вводится «дополнительный семантический компонент» (ДСК — гермин РГ [2, с. 391]) «покрыть (ся)» [2, с. 371] — ДСК «покрыть(ся) сплошь». Таким образом, выделено ЛСЗ «на поверхность» с возможными ДСК «покрыть (ся)» и «покрыть (ся) сплошь».

В РГ выделено ЛСЗ «вверх». ДСК «по вертикали» неявно вводится в РГ [2, с. 367] («направить (ся) снизу вверх»). На с. 357, 358 [2] неявно вводится ДСК «по любому направлению» («поднять(ся) вверх, наверх»). В работе [7] вводится ДСК «кратность» и «некратность» для ЛСЗ «вверх» с ДСК «по любому направлению». В результате выделено ЛСЗ «вверх», ДСК первого уровня: «по вертикали», «по любому пути» и ДСК второго уровня: «кратно», «некратно».

Рассмотрим введенные в РГ ЛСЗ № 12 «на р у ж у п р е д м е т а». ДСК, «пересекая границу предмета», «безотносительно к пересечению границы предмета» вводятся в работе [7].

В РГ введены значения: «вокруг, на все стороны предмета» *о-: окутать, об-: обжарить, об-и-: обсадить*); «мимо предмета» (*о-: оплыть, об-: обойти, про-: проехать*). Исследования показали, что значение «мимо предмета» выражает только ЛСФ *про-*, остальные ЛСФ выражают ЛСЗ «вокруг предмета». Сделан вывод, что значение «мимо предмета», приписываемое ЛСФ *о-*, *об-*, можно представить как соединение ЛСЗ «вокруг предмета» и ДСК первого уровня «не полностью».

Значение «продвинуться вокруг предмета» [2, с. 363] не является самостоятельным, а проявляется, если ЛСФ с ЛСЗ «вокруг предмета» и ДСК «полностью» присоединяется к глаголу со значением движения. Аналогично значение «на все стороны чего-нибудь» возникает в случае, когда мотивирующими являются глаголы «не движения» (*пухнуть→опухнуть, жарить→обжарить, хватить→обхватить*). ДСК второго уровня «изнутри» и «снаружи», характеризующие направление воздействия, выделены в соответствии с работой [7] для выполнения принципа однозначности ЛСЗ-ям ЛСФ-ов.

При выделении ЛСЗ и особенно ДСК мы стремились к тому, чтобы каждое значение по возможности имело единственное формальное выражение. Этого удалось добиться практически во всех случаях, за исключением следующих:

синонимичных ЛСФ *под-* и *при-* при выражении значения приближения, соответствующего «присоединению» в РГ (*подстроить, пристроить*); 2) значение ЛСФ префиксально-суффиксальных глаголов с суффиксом «-и₄», синонимичных значениям ЛСФ, состоящих из соответствующих приставок. Например,

ЛСФ глаголов *вывесить* (вы- — и₄-) и *вывести* (вы-) синонимичны по лексическим значениям [2] и выбор одного из них при синтезе будет определяться не ЛСЗ, а другими (морфологическими) признаками.

Результаты исследований показали, что можно выделить как минимум две основные группы ЛСП: лексические и ситуативные (валентности). Набор валентностей, выделенных для рассматриваемого ЛСП, приведен ниже. Окончательное решение вопроса о наборе валентностей связано с классификациями по ЛСП степени интенсивности, характера совершения действия во времени и другим.

Тип валентности	Содержание валентности
С	Субъект
О	Объект
ТК	Конечная точка
ТН	Начальная точка
К	Заданное направление (направление оси координат)
Р	Некоторое расстояние

Изучены также вопросы формального выражения ЛСЗ в виде ЛСФ, что необходимо для разработки математических моделей. Модель отношения $L(X, Y)$ для рассматриваемого фрагмента лексической семантики глаголов построена на языке алгебры конечных предикатов [9].

Полученные результаты используются в дальнейших исследованиях, а также при моделировании лексико-грамматических отношений на базе моделей морфологической обработки [10].

Список литературы: 1. *Мельчук И. А.* Опыт теории лингвистических моделей «смысл-текст». Семантика, синтаксис.— М.: Наука, 1974.— 170 с. 2. *Русская грамматика*, т. I.— М.: Наука, 1980.— 210 с. 3. *Грамматика современного русского литературного языка*.— М.: Наука, 1970.— 210 с. 4. *Виноградов В. В.* Русский язык (грамматическое учение о слове).— М.: Высшая школа, 1972.— 80 с. 5. *Апресян Ю. Д.* Лексическая семантика (Синонимические средства языка).— М.: Наука, 1970.— 120 с. 6. *Фрумкина Р. М.* Об отношениях между методами и объектами изучения в современной семантике (в связи с изучением семантики цветообозначения).— М.: Наука, 1970.— 96 с. 7. *Образование употребительных слов русского языка* / Под ред. Л. Н. Засориной.— М.: Русский язык, 1979.— 136 с. 8. *Унни К. П. С.* Словообразовательные значения глагольных приставок современного русского языка. Автореф. дис. ... канд. фил. наук.— М.: 1974.— 24 с. 9. *Ша-*

банов-Кушнарченко Ю. П. О теории интеллекта.— Проблемы бионики, 1979, вып. 23, с. 6—10. Соловьева Е. А., Жуков О. А. Математическая модель обработки глаголов типа 13.— Проблемы бионики, 1980, вып. 25, с. 18—21.
11. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О математическом описании естественного языка.— Проблемы бионики, 1981, вып. 27, с. 9—13.

Поступила в редколлегию 17.03.81.

УДК 631.3.01

Б. Н. СУДАКОВ

О ФОРМАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ЯЗЫКА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ С ЭВМ

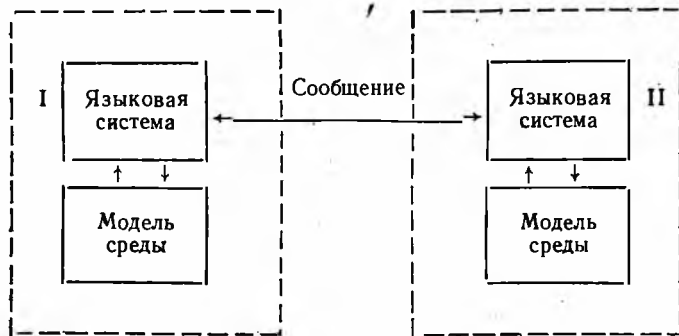
В связи с широким внедрением АСУ в народное хозяйство проблема организации общения человека и ЭВМ на языке, близком к естественному, становится все более актуальной. Это объясняется, в первую очередь, стремлением приближения к машине «широкого пользователя», создания ему возможностей общения без знания языков программирования.

Опыт исследований по созданию систем, «понимающих» естественный язык (ЕЯ), показывает, что при попытке формализации ЕЯ в его полном объеме возникают большие трудности, связанные со сложностью формального представления языковых выражений и ограниченными возможностями современных ЭВМ по обработке текстов.

Вместе с тем большинство АСУ функционирует в рамках ограниченной предметной области, что дает возможность с учетом ее специфики использовать для взаимодействия с ЭВМ естественный язык, синтаксис, семантика и лексика которого ограничены. Это позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы обработки текстов при приемлемых требованиях к ресурсу ЭВМ, реализующей систему «понимания» языка, и осуществлять взаимодействие с машиной привычным для человека способом.

В статье рассматривается возможный подход к созданию формализованной модели такого языка взаимодействия (ЯВ) для АСУ динамическими объектами (управление погрузочно-разгрузочными работами в порту, воздушным движением и т. п.).

Общение на естественном языке как процесс преобразования «ТЕКСТ ↔ СМЫСЛ». Рассмотрим процесс использования ЕЯ человеком как средства коммуникации. С этой целью изобразим взаимодействующие партнеры I и II, каждый из которых обладает языковой системой и совокупностью знаний о внешней среде — моделью среды:



Пусть они обмениваются сообщениями на ЕЯ. Согласно существующим представлениям о мыслительной деятельности человека [1] процесс понимания сводится к интерпретации сообщения партнера в собственной языковой системе, соотнесении его с моделью среды с последующей выработкой ответного сообщения. При этом считается, что естественный язык представляет собой сложную многоуровневую структуру, в которой языками крайних уровней являются язык сообщений и внутренний язык представлений человека. На внутреннем языке человек представляет смысл информации, использует его структуры для постановки целей и формирования стратегий их достижения. Язык сообщений служит для общения: смысл, представленный на внутреннем языке, переводится на язык сообщений и обратно, поверхностные структуры языка сообщений позволяют формировать структуры внутреннего языка.

Представим язык как множество текстов над некоторым словарем. Учитывая сказанное, каждый текст будем рассматривать в двух аспектах: в плане выражения (поверхностная структура текста, именуемая в дальнейшем для краткости текстом) и в плане содержания (семантика текста — смысл), а достижение взаимопонимания взаимодействующих партнеров будем трактовать как переход от текста к смыслу и обратно. Для реализации модели языка на ЭВМ необходимо формально описать отмеченные уровни и процесс перехода «ТЕКСТ ↔ СМЫСЛ».

Семантический уровень. Каждый текст языка взаимодействия может быть рассмотрен как определенным образом связанная совокупность суждений. Обращая внимание на смысловую сторону суждений, выделим в них, во-первых, то, о чем нечто утверждается. Это некоторые объекты внешней среды. Во-вторых, естественно выделить то, что утверждается в суждении — предикат суждения или отношение на множестве объектов среды. Ниже в качестве примера приведен текст, в котором выделены упомянутые компоненты:

Грузовое
судно
швартуется
к
причалу
А

предикат
объект
предикат

объект

Исходя из этого представляется естественным использовать в качестве формальной основы для описания уровня смыслов ЯВ язык исчисления предикатов первого порядка. Его достоинствами являются относительная простота формальной структуры, наличие фундаментальной теоретической основы, возможность построения процедуры, позволяющей осуществлять автоматический логический вывод, широкие описательные возможности, близость к естественному языку. Основной его недостаток — невозможность формирования метаясуждений и трудность описания динамических процессов реального мира. Поскольку АСУ рассматриваемого типа функционирует в условиях изменяющейся внешней среды, пользователь должен иметь

возможность для выражения модальности высказываний и описания событий, развивающихся во времени. Такие тексты, как известно, невозможно выразить средствами языка исчисления предикатов первого порядка.

Указанные ограничения могут быть преодолены за счет расширения классического исчисления предикатов путем перехода к множеству предметных областей и введения по определению операторов модально-временной логики [3]. Основным выражением такого проблемно-ориентированного языка (ПОЯ) является правильно построенная формула (ППФ):

$$QF(x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, \dots, x_n^{a_n}),$$

где $F(x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, \dots, x_n^{a_n})$ — предложение ПОЯ, не содержащее кванторов; Q — префикс, т. е. совокупность n кванторов всеобщности (\forall) и существования (\exists), каждый из которых связывает одну из переменных $x_i^{a_i}$, $i = \overline{1, n}$; $\{a_i\}$ — имена предметных областей.

Средства, позволяющие выражать модальности суждений, нашли свое воплощение в операторах языка: $M \uparrow p$ — «возможно в будущем p », $M \downarrow p$ — «возможно было p », $L \uparrow p$ — «необходимо будет p », $L \downarrow p$ — «необходимо было p », $M_t \uparrow p$ — «в некоторый момент времени p будет истинно», $M_t \downarrow p$ — «в некоторый момент времени p было истинно», $L_t \uparrow p$ — « p всегда будет истинно», $L_t \downarrow p$ — « p всегда было истинно». Здесь p — ППФ ПОЯ, а каждый из операторов определен в терминах языка многосортного исчисления предикатов. За счет комбинации ППФ, содержащих указанные операторы, могут быть описаны динамические процессы, протекающие в системе управления. Примеры представления таких процессов средствами ПОЯ, а также описание модально-временных операторов приведены в [3].

Поверхностный уровень. Практически все способы, используемые в настоящее время для формального задания поверхностного уровня естественного языка, могут быть представлены описанием с помощью систем составляющих; описанием с использованием деревьев синтаксического подчинения.

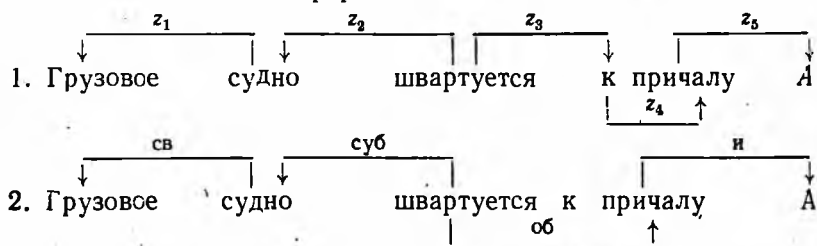
Первый способ описания языка тесно связан с представлением цепочек слов посредством грамматик, непосредственно оставляющих [2]. С его помощью удобно описываются словоочетания, но игнорируется ориентация связей между словами экста (т. е. не различаются главные и зависимые элементы). При втором способе с цепочкой слов текста x связывается разложенное дерево синтаксического подчинения

$\{X, \rightarrow, Z, \psi\}$, где X — множество точек (слов) в цепочке x ; \rightarrow — бинарное отношение на X , при котором граф $\{X, \rightarrow\}$ является деревом; Z — конечное множество меток; ψ — отображение множества дуг дерева $\{X, \rightarrow\}$ в Z .

При таком подходе цепочка слов x разбивается на пары z_i
 $i \rightarrow x_k$ (x_j, x_k — точки цепочки), связанные отношением подчине-

ния z_i , тип которого зависит от синтаксических функций, выполняемых в предложении точками x_j, x_k . Изображение синтаксических связей с помощью отношений синтаксического подчинения в основном совпадает с принятыми представлениями о грамматической структуре предложения.

Вследствие этого любые предложения русского языка могут быть представлены древесной структурой. Следует отметить, что установление направленных связей между словами предложения (в частности, между предикатом и его аргументами) дает практически готовый материал для формирования семантической структуры фразы и делает естественным процесс перехода от текста к смыслу. По этой причине в рассматриваемом случае более целесообразным является применение второго способа для задания поверхностной структуры языка. Ниже в качестве примера показан переход от текста к смыслу при использовании отмеченных формализмов:



3. $\exists x_{\text{судно}} \exists y_{\text{причал}}$ швартуется ($x_{\text{судно}}, y_{\text{причал}}$) & и ($y_{\text{причал}} А$) & грузовой ($x_{\text{судно}}$)

Здесь $z_i, i = \overline{1,5}$ поверхностно-синтаксические отношения; суб, об — падежные отношения между предикатом и его аргументами; св, и — глубинно-синтаксические отношения «иметь свойство» и «иметь имя» соответственно; ШВАРТУЕТСЯ, ГРУЗОВОЙ, И в предложении 3 — имена предикатов. Поскольку использование только синтаксических средств не позволяет сопоставить тексту его семантическую структуру, введен промежуточный глубинно-синтаксический уровень (предложение 2), учитывающий семантику слов и словосочетаний и позволяющий однозначно сопоставить тексту его смысл.

В соответствии с рассмотренными принципами разработана формализованная модель, ориентированная на описание простых распространенных предложений русского языка в форме вопросов, директив и декларативных предложений, состоящих из предиката — сказуемого и именных групп, выступающих в роли подлежащего, определения, дополнения и обстоятельств. Формирование сложных высказываний осуществляется за счет комбинации простых, связанных синтаксическими связками. Формы предложений определяются соответствующими операторами.

Модель реализована в лингвистическом процессоре (транслатор ЯВ на ПОЯ) для вопросно-ответной системы, описанной в [4]. Программа написана на языке PL/I и занимает порядка 120 К байт.

Список литературы: 1. *Поспелов Д. А., Пушкин В. Н.* Мышление и автоматы.— М.: Сов. радио, 1972.— 224 с. 2. *Гладкий А. В.* Формальные грамматики и языки.— М.: Наука, 1973.— 386 с. 3. *Ярушек В. Е.* О формализованной модели для планирования действий управляемых объектов в динамической среде.— См. статью в настоящем сборнике. 4. *Рось А. А., Судачков Б. Н.* Языковое обеспечение вопросно-ответных систем.— Проблемы бюрократии, 1980, вып. 24, с. 16—22.

Поступила в редколлегию 25.02.81.

УДК 681.327.12

С. Ф. КАЦАЛАП, канд. техн. наук

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ОБЪЕКТОВ

При построении распознающих устройств, сортировальных автоматов, промышленных роботов важное место занимает разработка систем, способных, подобно зрительному анализатору, обнаруживать объекты, подвергнутые действию группы аффинных преобразований (сдвиг, поворот, изменение масштаба, линейные растяжения и др.). Среди известных систем значительный интерес вызывают системы, использующие дифференциальные методы обработки сигналов, позволяющие обнаруживать объект, который частично заслоняется другими предметами. Однако существующие дифференциальные методы построения такого рода систем разработаны только для некоторых аффинных преобразований плоского объекта. Поэтому нашей целью является обобщение ранее полученных результатов для полной группы аффинных преобразований.

Семейство кривых, отличающихся параметрами $a_1, a_2, a_3, v_1, v_2, v_3$ полной группы аффинных преобразований, в общем виде может быть представлено уравнением

$$a_1x + a_2y + a_3 = f(b_1x + b_2y + b_3), \quad (1)$$

где f — определяет геометрическую форму искомого плоского объекта. Необходимо найти дифференциальное уравнение, общим решением которого является выражение (1), где параметры преобразования — произвольные константы.

Введем обозначения: $u = a_1x + a_2y + a_3; v = b_1x + b_2y + b_3$ (2).

Дифференцируя (2) дважды, имеем $u'' = a_2y''$, $v'' = b_2y''$ (3). Решая (3) относительно a_2 и b_2 , дифференцируя полученное выражение, имеем $u''y'' - u'y'' = 0; v''y'' - v'y'' = 0, y'' \neq 0$ (4).

Для систем уравнений (4) найдем производные выражения (1) с учетом (2): $u' = f'(v)v'$, $u'' = f''(v)v'^2 + f'(v)v''$; $u''' = f'''(v) \times v'^3 + 3f''(v)v'v'' + f'(v)v'''$ (5). Решая совместно (5) и (4), имеем $f'''(v)v'^3 + 3f''(v)v'v'' - f''(v)v'v'' = 0$ (6).

Для упрощения (6) введем обозначения

$$y_1 = \frac{y''}{y'}, \quad \frac{f'''(v)}{f''(v)} = f_1(v); \quad f_1(v)v'^3 + 3v'' - v'y_1 = 0. \quad (7)$$

Дифференцируя (7) с учетом, что $v'' = y_1v'$, имеем

$$f_1'(v)v'^3 + f_1(v)2v'v'' + 2v''y_1 - v'y_1' = 0. \quad (8)$$

Решая совместно (7) и (8), исключаем v'' :

$$\left[f_1'(v) - \frac{2}{3}f_1^2(v) \right] v'^3 + \frac{2}{3}y_1^2 - y_1' = 0. \quad (9)$$

Для упрощения последующего анализа введем обозначения:

$$f_2(v) = f_1'(v) - \frac{2}{3}f_1^2(v), \quad y_2 = -\frac{2}{3}y_1^2 + y_1', \quad f_2(v)v'^3 - y_2 = 0. \quad (10)$$

$$\text{Дифференцируя (10), имеем } f_2'(v)v'^3 + f_2(v)2v'v'' - y_2' = 0. \quad (11)$$

Решая совместно (11), (10) и (8), исключаем v'' и v' :

$$\frac{f_2'(v) - \frac{2}{3}f_2(v)f_1(v)}{\frac{3}{f_2^2(v)}} - \frac{y_2' - \frac{2}{3}y_1y_2}{\frac{3}{y_2^2}} = 0. \quad (12)$$

Обозначая

$$\frac{f_2'(v) - \frac{2}{3}f_2(v)f_1(v)}{\frac{3}{f_2^2(v)}} = f_3(v), \quad \frac{y_2' - \frac{2}{3}y_1y_2}{\frac{3}{y_2^2}} = y_3,$$

имеем $f_3(v) - y_3 = 0$ (13). Дифференцируя (13), с учетом (10) получаем

$$\frac{f_3'(v)}{\frac{1}{f_2^2(v)}} - \frac{y_3'}{\frac{1}{y_2^2}} = 0. \quad (14)$$

Решая совместно (14) и (13), получаем искомое дифференциальное уравнение

$$\frac{f_3'[f_3(y_3)]}{\frac{1}{f_2^2[f_3(y_3)]}} - \frac{y_3'}{\frac{1}{y_2^2}} = 0, \quad (15)$$

где f_3^* — функция, обратная f_3 относительно аргумента.

Очевидно, что обратная функция существует в том случае, если $y_3 \neq k$, $k = \text{const}$. Исходя из этого неравенства, найдем функ-

ции, для которых соответствующее дифференциальное уравнение не существует:

$$y_3 = \frac{y_2' - \frac{2}{3} y_1 y_2}{y_2^{\frac{3}{2}}} = k. \quad (16)$$

Подставляя вместо y_2 соответствующие значения из соотношений (10), после несложных преобразований имеем

$$-2y_1 y_1' + y_1'' + \frac{4}{9} y_1^3 = k \left(-\frac{2}{3} y_1^2 + y_1' \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (17)$$

Используя замену переменных $y_1 = z^{-1}$, получаем

$$2z' + 2z'^2 - zz'' + \frac{4}{9} = k \left(-\frac{2}{3} + z' \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (18)$$

Порядок дифференциального уравнения можно снизить, полагая $z' = u(z)$:

$$2u(z) + 2u^2(z) - zu'(z)u(z) + \frac{4}{9} = k \left[-\frac{2}{3} - u(z) \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (19)$$

Интегрируя (13), имеем

$$z = k_1 \frac{u + \frac{2}{3}}{\sqrt{-2u - \frac{2}{3} - k} \sqrt{-u - \frac{2}{3}}} e^{\frac{3k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}} \operatorname{arctg} \frac{4\sqrt{-u - \frac{2}{3} - k}}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}}}, \quad \frac{16}{3} - k^2 > 0;$$

$$z = k_1 \frac{u + \frac{2}{3}}{\sqrt{-2u - \frac{2}{3} - k} \sqrt{-u - \frac{2}{3}}} \times$$

$$\times \left(\frac{4\sqrt{-u - \frac{2}{3} - k} - \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}{4\sqrt{-u - \frac{2}{3} - k} + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} \right)^{\frac{3k}{2\sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}}, \quad k^2 - \frac{16}{3} > 0;$$

$$z = \frac{k_1 \left(u + \frac{2}{3} \right)}{\sqrt{-u - \frac{2}{3} - \frac{1}{\sqrt{3}}}} e^{\frac{3}{\left(u + \frac{2}{3} \right) \sqrt{3+1}}}, \quad k = \pm \frac{4}{\sqrt{3}}. \quad (20)$$

Решение (14) можно найти в параметрическом виде. Полагая $-u - \frac{2}{3} = t^2$, находим

$$z' = \frac{k_1 t^2}{\sqrt{2t^2 + \frac{2}{3} - kt}} e^{\frac{3k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}} \operatorname{arctg} \frac{4t-k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}}}, \quad \frac{16}{3} - k^2 > 0;$$

$$z = \frac{k_1 t^2}{\sqrt{2t^2 + \frac{2}{3} - kt}} \left(\frac{4t-k - \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}{4t-k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} \right)^{\frac{3k}{2\sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}}, \quad k^2 - \frac{16}{3} > 0;$$

$$z = \frac{k_1 t^2}{\left(t - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)} e^{-\frac{3}{t\sqrt{3-1}}}, \quad k = \pm \frac{4}{\sqrt{3}}. \quad (21)$$

Учитывая, что $\frac{dz}{dt} = \frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt}$, находим x :

$$x + k_2 = -2k_1 \int \frac{te^{\frac{3k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}} \operatorname{arctg} \frac{4t-k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}}}}{\left(2t^2 + \frac{2}{3} - kt\right)^{\frac{3}{2}}} dt, \quad \frac{16}{3} - k^2 > 0;$$

$$x + k_2 = -16k_1 \int \frac{t}{\left(4t-k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}\right)^2 \sqrt{2t^2 + \frac{2}{3} - kt}} \times \\ \times \left(\frac{4t-k - \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}{4t-k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} \right)^{\frac{3k}{2\sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}} dt, \quad k^2 - \frac{16}{3} > 0;$$

$$x + k^2 = -k_1 \int \frac{e^{-\frac{3}{t\sqrt{3-1}}}}{\left(t - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^3} dt, \quad k = \pm \frac{4}{\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Подставляя в (15) вместо z соответствующее выражение (7) и интегрируя с учетом (16), имеем

$$y + k_5 = -2k_1 \int \frac{2k_1 k_3 + k_4 t}{\left(2t^2 + \frac{2}{3} - kt\right)^{\frac{3}{2}}} e^{\frac{3k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}} \operatorname{arctg} \frac{4t-k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}}} dt,$$

$$\frac{16}{3} - k^2 > 0; y + k_5 = -16k_1 \int \frac{k_4 t + 2k_1 k_3}{(4t - k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}})^2 \sqrt{2t^2 + \frac{2}{3} - tk}} \times$$

$$\times \left(\frac{4t - k - \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}{4t - k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} \right)^{\frac{3k}{2\sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} - 1} dt, k^2 - \frac{16}{3} > 0;$$

$$y + k_5 = -k_1 \int \frac{(k_3 + k_4 t) e^{\frac{3}{t\sqrt{3}-1}}}{\left(t - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^3} dt, k = \pm \frac{4}{\sqrt{3}}. \quad (23)$$

Соотношения (16) и (17) можно интегрировать, используя подстановку для первых равенств $\operatorname{arctg} \frac{4t - k}{\sqrt{\frac{16}{3} - k^2}} = z$, для вторых ра-

венств $\frac{4t - k - \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}}{4t - k + \sqrt{k^2 - \frac{16}{3}}} = z$ и для третьих равенств $-\frac{3}{t\sqrt{3}-1} = z$.

После интегрирования и исключения из параметрических уравнений z с учетом переобозначения констант имеем

$$(c_1 y + c_2 x + c_3)^2 + (y + c_4 x + c_5)^2 = c_6 e^{-6c_1 \operatorname{arctg} \frac{c_1 y + c_2 x + c_3}{y + c_4 x + c_5}}; \quad (24)$$

$$y + c_1 x + c_2 = c_3 (y + c_4 x + c_5)^{c_6}; \quad (25)$$

$$y + c_1 x + c_2 = c_3 e^{\frac{c_4 x + c_3}{y + c_1 x + c_2}}, \quad (26)$$

Таким образом, для кривых (18) и (20) параметры аффинных преобразований не являются независимыми.

Найдем операторы для определения параметров аффинных преобразований. Исключая из выражений (3), (7), (10) v' и v'' , имеем

$$f_1(v) \frac{y_2}{f_2(v)} + 3b_2 y'' - \left[\frac{y_2}{f_2(v)} \right]^{\frac{1}{2}} y_1 = 0. \quad (27)$$

Решая относительно b_2 , получаем

$$b_2 = \frac{\frac{(y_2)^{\frac{1}{2}} y_1}{f_2^{\frac{1}{2}}(v)} - \frac{f_1(v)}{f_2(v)} y_2}{3y''}, \quad v = f_3^*(y_3). \quad (28)$$

Аналогичным образом из выражений (3), (5), (7) определяем a_2 :

$$a_2 = \frac{f''(v)}{f_2(v)} \frac{y_2}{y''} + \frac{f'(v)}{3f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \frac{y^{\frac{1}{2}} y_1}{y''} - \frac{f_1(v) f'(v)}{3f_2(v)} \frac{y_2}{y''}. \quad (29)$$

Дифференцируя выражения для v (2) с учетом (22) и (10), находим b_1 :

$$b_1 = \frac{y^{\frac{1}{2}}}{f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \left(1 - \frac{y_1 y'}{3y''} \right) + \frac{f_1(v)}{f_2(v)} \frac{y_2 y'}{3y''}. \quad (30)$$

Определяем b_3 , учитывая (24) и (22):

$$b_3 = v - \left[\frac{y^{\frac{1}{2}}}{f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \left(1 - \frac{y_1 y'}{3y''} \right) + \frac{f_1(v)}{f_2(v)} \frac{y_2 y'}{3y''} \right] x - \left(\frac{1}{3f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \frac{y^{\frac{1}{2}} y_1}{y''} - \frac{f_1(v)}{f_2(v)} \frac{y_2}{3y''} \right) y. \quad (31)$$

Дифференцируя выражения для u (2) с учетом (5) и (10), находим

$$a_1 = \frac{f'(v)}{\frac{1}{f_2^{\frac{1}{2}}(v)}} y^{\frac{1}{2}} - \frac{f''(v)}{f_2(v)} \frac{y_2 y'}{y''} - \frac{f'(v)}{3f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \frac{y^{\frac{1}{2}} y_1 y'}{y''} + \frac{f_1(0) f'(v)}{3f_2(v)} \frac{y_2 y'}{y''}. \quad (32)$$

Определяем a_3 , учитывая (26) и (23):

$$a_3 = f(v) - \frac{f''(v) y^{\frac{1}{2}}}{f_2^{\frac{1}{2}}(v)} \left(x - \frac{y_1 y' x}{3y''} + \frac{y_1 y}{3y''} \right) - \frac{f'(v)}{f_2(v)} \frac{y_2}{y''} (y - y' x) + \frac{f_1(v) f'(v)}{3f_2(v)} \frac{y_2}{y''} (y - y' x). \quad (33)$$

Таким образом, в работе найдены операторы, которые позволяют сравнивать кривые, отличающиеся аффинной группой преобразований и определяют параметры этих преобразований.

Г. Ф. КРИВУЛЯ, канд. техн. наук, Н. И. ПИЛИПЕНКО, канд. мед. наук,
Л. К. ШТЕЦ, В. Я. СЕРДЮЧЕНКО, канд. техн. наук

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЧКИ

Решение задач диагностики определенного объекта (органа) может быть осуществлено в результате анализа множества состояний его в периоды нормального функционирования и отказов (заболеваний). Такой анализ можно выполнить теоретически по диагностической модели. В результате исследования модели мы получаем возможность сформулировать условия нормального функционирования объекта, т. е. разделить множество всех состояний на два подмножества: «норма» и «болен», оценить степень работоспособности органа и установить признаки возникшего заболевания.

Диагностическая интерпретация результатов радионейрографии — метода исследования почек по выведению ими из крови меченых веществ — значительно затруднена из-за влияния на процесс формирования радионейрограмм (РНГ) одновременно многих физиологических и анатомических факторов: количества нефронов в почке и степени их альтерации, скорости прохода молекул тест-вещества через нефроны и полую систему, изменения концентрации тест-вещества в крови сосудов почек и околопочечных тканей, объемной скорости тока мочи, объема поллой системы почки, а также кровоснабжения почек. Характер эффекта ряда этих факторов все еще не ясен, а для некоторых и вовсе не обсуждался в литературе. В то же время важность получения количественных оценок физиологических параметров почек из данных радионейрографии очевидна.

Для повышения диагностической информативности радионейрографии предпринимаются усилия к созданию модели кинетики гиппурана — вещества, наиболее часто используемого для радионейрографии, — во всем организме или почке [3, 4—8, 11, 13]. Однако существование многих подходов к оценке характера обмена гиппурана между средами организма после его внутривенного введения и разнообразие математических моделей этих процессов может служить свидетельством неудовлетворенности достигнутыми результатами. В большинстве предложенных математических моделей, по нашему мнению, имеется излишняя формализация или необоснованные в достаточной мере упрощения моделируемых процессов, в итоге получаемые результаты оказываются неадекватны затрачиваемому труду.

Физиологические основы кинетики гиппурана в почке. Представляется плодотворным рассматривать почку как популяцию нефронов, интегральной характеристикой каждого из которых может служить время прохода (транзита) молекул гиппурана через них [12]. В такой модели распределение времен транзита — одновременно и распределение нефронов в популяции по их физиологическим параметрам. Предлагается находить распределение времен транзита из так называемых импульсных РНГ, т. е. ренограмм, которые можно зарегистрировать при прямом быстром («импульсном») введении гиппурана в артерию почки, аппроксимируя такие кривые, как интеграл от функции распределения структур почки по времени транзита через них гиппурана. Дифференцирование этих кривых дает распределение частот. Импульсные же кривые можно получить из результатов ренографии методом развертки функции [10, 12].

Существенным недостатком такого подхода к анализу РНГ является его непригодность для изучения влияния на форму РНГ.

как почечных, так и внепочечных факторов. Кроме того, в такой модели не учитывается роль полый системы почки, влияние которой на формирование РНГ несомненно. На рис. 1 (кривая А) представлена РНГ, записанная у больного после введения гиппурана в артерию почки. На этой кривой можно выделить три участка: (t_0-t_1) — проход гиппурана через самые «короткие» нефроны; (t_1-t_2) — проход гиппурана через всю популяцию нефронов, причем момент t_2 показывает время максимального транзита молекул через нефроны с наибольшей задержкой в них вещества; (t_2-t_h) — выход гиппурана из полый системы

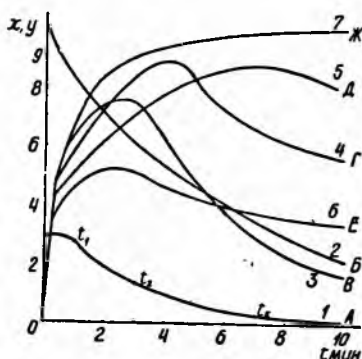


Рис. 1

ного транзита молекул через нефроны с наибольшей задержкой в них вещества; (t_2-t_h) — выход гиппурана из полый системы

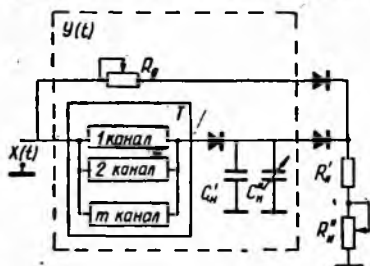


Рис. 2

почки. Третий, участок этой ренограммы $(t_2 - t_h)$ представляет собой экспоненту, которая описывает разведение тест-вещества в полый камере постоянным потоком жидкости. Константа наклона этой кривой φ есть отношение объемной скорости жидкости в камере к объему камеры (W/V) .

Таким образом, почку можно представить как систему, состоящую из двух подсистем: популяции нефронов (ПН) и полости лоханки (ПЛ). Описать количественно распределение нефронов в ПН можно тремя параметрами: t_1 — минимальное время прохода молекул; t_m — среднее (модальное) время прохода молекул, т. е. время прохода по нефронам с наиболее часто встречающимися в данной почке характеристиками; t_2 — максимальное время прохода молекул по нефронам. Вторая подсистема ПЛ может характеризоваться константой разведения φ , которая оценивается непосредственно из результатов исследования:

$$\varphi = (\ln A_t - \ln A_i) / (t_i - t_1),$$

где A_i , A_t — амплитуды ренограммы соответственно в моменты времени t_i и t_t , причем $t_t > t_i > t_2$. Экстраполируя экспоненциальный участок с коэффициентом φ ($A_t = A_i e^{-\varphi(t-t_i)}$) влево от t_i , находим момент t_2 как точку, в которой экспериментальная кривая отклоняется от экспоненты. Момент t_1 может быть найден с помощью первой производной от реальной ренограммы (до t_1 первая производная

водная $y'(t) = 0$). Определенные трудности может представлять оценка t_m . В этой точке обращается в нуль только третья производная, вычисление которой резко усиливает влияние статистического «шума», наблюдающегося при измерении радиоактивности.

Как отмечалось выше, «импульсную» РНГ можно получить из результатов ренографии, выполненной после внутривенного введения гиппурана. Но такой анализ не допускает возможности судить о характере ответа почки на введение гиппурана при изменении в некоторых пределах экстраренальных факторов (в первую очередь гемодинамики исследуемой почки и функции контрлатеральной почки) и характеристик самой почки. Решение этой задачи и ставилось целью создания описываемой модели почки.

Результаты анализа кинетики гиппурана после его прямого введения в почечную артерию позволяют рассматривать почку как преобразователь входной величины $x(t)$, которая вводится в объект преднамеренно, в выходную величину $y(t)$, регистрируемую датчиками в дискретные моменты времени $t_i = t_1, t_2, t_3 \dots, t_k$.

В общем виде $y(t) = Bx(t)$, где B — оператор, характеризующий преобразования в реальном объекте и модели. Таким образом, для определения параметров диагностической модели необходимо найти оператор B при различных режимах функционирования объекта. Учитывая, что почку мы представили в виде двух подсистем (ПН и ПЛ), процесс моделирования рассмотрим для каждой из этих подсистем.

Моделирование популяции нефронов. Исходя из физиологических принципов работы почки предлагается рассматривать в качестве ее модели электронную схему, осуществляющую преобразование информации, адекватное процессам прохождения молекул тест-вещества через структуры почки (рис. 2). Функция задержки нефронами гиппурана моделируется блоком запаздывания T , состоящим из m параллельно включенных элементов задержки ($y(t)$ — регистрируемая область). Количество каналов задержки модели выбирается исходя из необходимости точности квантования Δx максимального значения x_{\max} входного сигнала:

$$m = x_{\max} / \Delta x + 1.$$

Задержку входного сигнала совокупностью задержек представим в виде следующей системы уравнений: $\Delta y_{i1} = \Delta x_{i1}(t - \tau_1)$; $\Delta y_{i2} = \Delta x_{i2}(t - \tau_2)$; $\Delta y_{im} = \Delta x_{im}(t - \tau_m)$ (2), где τ_m — время задержки одного канала. Количество вещества на входе Δx_{ij} , поступающего в j -й канал в i -й момент времени, определяется коэффициентом k_j , т. е. $\Delta x_{ij} = k_j x_i$. В общем случае коэффициент k_j обратно пропорционален величине задержки τ_j , но с удовлетворительной для практического моделирования точностью можно принять, что $k_1 = k_2 = \dots = k_j = k_m = 1/m$. Процесс запаздывания информации с учетом регистрации выходных значений в дискретные моменты вре-

мени представим в виде пространственно-временной матрицы B размерностью $k \times m$, где k — число дискретных значений текущего времени наблюдения процесса; m — количество каналов моделирования:

$$B = \|\Delta y_{ij}\|, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, k, \\ j = 1, 2, \dots, m. \end{matrix}$$

Суммируя элементы матрицы B по столбцам, получим вектор строку y прохождения вошедшего вещества $x(t)$ через блок за запаздывания в дискретные моменты времени: $y = y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_k$, где $y_i = \sum_{j=1}^m \Delta y_{ij}$. Матрица B отражает временное и пространственное распределение прохождения вещества через блок запаздывания при подаче на его вход сигналов в дискретные моменты времени по определенной функциональной зависимости (например, биэкспонента на рис. 1, кривая B). Матрицу B представим в виде суммы матриц: $B = B_1 + B_2 + \dots + B_i + \dots + B_k$, причем каждая матрица B_i размерностью $k \times m$ характеризует распределение вещества в блоке запаздывания при подаче на его вход сигнала в i -й момент времени с амплитудой x_i . Каждая матрица B_i имеет ненулевые элементы, равные x_i/m . Первым ненулевым столбцом в матрице является столбец с i -м номером, т. е. с номером временного такта, которому соответствует данная матрица. Вынося постоянный множитель x_i/m за пределы матрицы B_i , получим

$$B = \frac{x_1}{m} E_1 + \frac{x_2}{m} E_2 + \dots + \frac{x_i}{m} E_i + \dots + \frac{x_k}{m} E_k.$$

Если входной сигнал имеет постоянную амплитуду x_{const} , то

$$B = \frac{x_{\text{const}}}{m} (E_1 + E_2 + \dots + E_i + \dots + E_k).$$

Каждая из матриц E_i представляет собой булеву матрицу, содержащую нули и единицы и характеризующую распределение входного вещества в блоке запаздывания при подаче его на вход блока в i -й момент времени. Фактически E_i описывает импульсную РНГ на участке до t_2 . Для примера РНГ на рис. 1 (кривая A) с количеством каналов моделирования $m=8$ матрица E_1 имеет вид

$$E_1 = \left\| \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots & k-1 \end{array} \right\|.$$

Матрицы E_i с различными индексами отличаются друг от друга только сдвигом столбцов с ненулевыми элементами на число, равное разности номеров матриц. Для импульсной РНГ на рис. 1 (кривая А)

$$B = \frac{x_{\max}}{m} E_1 = 0,5E_1, \text{ так как } x_{\max} = 4 \text{ и } m = 8.$$

Пространственно-временная матрица B полностью отражает процесс задержки молекул гиппурана нефронами и входного импульса блоком запаздывания T , причем в зависимости от импульсной РНГ и функции входного сигнала получим любое возможное выходное значение сигнала блока запаздывания. Например, при входном сигнале с постоянной амплитудой x_{const} в дискретные моменты времени получим выходную зависимость в виде кривой Ж (рис. 1.). Если амплитуда $x(t)$ убывает, то в зависимости от булевой матрицы E_i (импульсной РНГ) получаем кривые В, Г, Д, Е (рис. 1).

Моделирование процессов протекания молекул гиппурана с жидкостью в полости лоханки. Полость лоханки представляет собой определенную емкость, и для ее моделирования в схему (рис. 2) введена электрическая емкость $C_n = C'_n + C''_n$, имеющая постоянную компоненту C'_n и переменную C''_n . Переменная составляющая емкости введена для учета анатомо-функциональных и патофизиологических особенностей лоханки (индивидуальные и возрастные различия, систоло-диастолические изменения объема, ретенционные дилатации чашечно-лоханочной системы).

Регистрируемые датчиками функциональные зависимости имеют ярко выраженный экспоненциальный спадающий участок (например, участок $(t_2 - t_h)$ на импульсной РНГ — кривая А, рис. 1). В диагностической модели экспоненциальный участок моделируется свободным разрядом емкости C_n на активное сопротивление $R_n = R'_n + R''_n$. Ток разряда $I(t)$ через R_n соответствует объемному току жидкости, а проводимость $D = 1/R_n$ характеризует диурез почки. Переменная составляющая R''_n позволяет учесть влияние на формирование РНГ изменений диуреза. Если $R''_n = 0$, то данная ситуация соответствует состоянию почки с наибольшим диурезом, а при $R''_n \rightarrow \infty$ — анурии. Так как при регистрации радионейрограмм в поле зрения счетчика находится также гиппуран, содержащийся вне нефронов (в сосудах почки и околопочечных тканей, во внесосудистом пространстве) и составляющий так называемый «тканевой фон», в схему модели введена цепочка с переменным делительным сопротивлением — R_g , что позволяет учитывать наличие указанной составляющей в радионейрограмме. Изменение величины R_g меняет долю входного сигнала, поступающую на вход

блока задержки T . При этом доля входного сигнала, поступающая на R_n через R_g , равна

$$x_g(t) = x(t) \frac{R_n}{R_g + R_n}.$$

Уравнение свободного разряда емкости C_n на R_n имеет следующий вид: $y_2 = A(t_2) e^{-\gamma(t-t_2)}$, где t_2 — момент времени РНГ, с которого начинается экспоненциальный участок; $A(t_2)$ — амплитуда выходной зависимости в момент t_2 ; коэффициент затухания $\gamma = 1/R_n C_n$. Момент времени t_2 , амплитуда $A(t_2)$ и коэффициент γ определяются по регистрируемым выходным кривым почки. Например, для кривой A (рис. 1) $t_2 = 3$ мин, $A(t_2) = 1,5$, $\gamma = 0,1$. Подбор величины коэффициента γ на модели осуществляется вариацией C_n^* и R_n^* . Емкость C_n может быть определена в результате рентгеноурографического исследования почки, и затем по известным γ и C_n вычисляем R_n .

Анализ РНГ с использованием диагностической модели почки. С учетом двух подсистем почки процесс прохождения молекул гиппурана с током жидкости в ней моделируется следующими уравнениями:

$$y(t) = \begin{cases} y_1(t) = B(t)x(t) & \text{при } 0 < t \leq t_2, \\ y_2(t) = A(t_2)e^{-\gamma(t-t_2)} & \text{при } t > t_2. \end{cases}$$

При анализе РНГ необходимо учитывать, что выходная функция $y(t)$ регистрируется датчиком на определенной площади (область на рис. 2, обведенная пунктиром).

Рассмотрим возможные выходные функции объекта (рис. 1) и проведем анализ данного семейства РНГ с целью определения параметров диагностической модели. Кривая B соответствует норме, и для нее $C_n^* = C_{n \text{ норм}}^*$ и $R_n^* = R_{n \text{ норм}}^*$. Кривые Γ и D формируются при $C_n = 3C_{n \text{ норм}}$ (дилатация чашечно-лоханочной системы), причем Γ регистрируется при $R_n = R_{n \text{ норм}}$, т. е. при нормальном объемном токе, что в клинической практике может наблюдаться в период после устранения обструкции мочевыводящих путей, а кривая D — при $R_n \cong 2,5 R_{n \text{ норм}}$, соответствующем гидронефрозу. Таким образом, удлинение времени наступления максимального подъема РНГ не всегда равнозначно нарушению экскреторной функции почки (кривая Γ), как это принято считать. При уменьшении доли входного сигнала, подаваемой на вход блока задержки (уменьшение почечного кровотока), и уменьшении проводимости $1/R_n$ (снижение диуреза) формируется кривая E , также имеющая удлинение времени максимума. В клинике аналогичные условия наблюдаются при хронических нефритах.

Все рассмотренные кривые E, B, Γ, D сформированы при подаче на вход модели биэкспоненциального сигнала (кривая B), соответствующего изменению концентрации гиппурана в

крови после его однократной внутривенной инъекции. Меняя численные значения коэффициентов, составляющих входной сигнал экспонент, что соответствует изменению массы тела и проницаемости сосудов и различным функциональным возможностям исследуемой и контрлатеральной почек, можно с использованием модели получить семейство радионейрограмм для одного и того же состояния почки, но различия между которыми будут связаны с экстраренальными факторами. Этим способом легко показать, что появление так называемого экскреторного участка на РНГ, т. е. участка снижения кривой после максимального подъема ее, обусловлено не превалярованием оттока (экскреции), как принято все еще считать, а снижением концентрации гиппурана в притекающей к почке крови. Если обеспечить инфузионное введение гиппурана в кровь, которое давало бы постоянную его концентрацию в крови (постоянный сигнал на входе модели), то радионейрограмма приобретет вид, представленный кривой Ж (рис. 1). Как видно из рисунка, третий сегмент этой кривой не имеет спуска. Важно отметить, что крутизна подъема второго участка зависит от доли, поступающей на блок задержки (нефроны). В реальной почке это соответствует зависимости крутизны этого сегмента от относительного кровотока, рассматриваемой почки.

Выводы. В результате анализа кинетики меченого гиппурана в почке с использованием диагностической модели показано взаимоднозначное соответствие между процессами прохождения молекул гиппурана с током жидкости в почке и прохождения электрического тока в электронной модели. Параметры модели позволяют осуществлять ее настройку на возможное состояние объекта моделирования и исследовать процессы формирования радионейрограмм при различных условиях. Определение численных значений параметров модели наиболее целесообразно осуществлять по импульсной РНГ, которую определяют путем математической операции развертки функции из выходной кривой (РНГ), регистрируемой датчиками радиографа после внутривенного введения гиппурана.

Список литературы: 1. Гинзбург В. С. Модель для анализа радионейрографии с гиппураном-йод-131.— Мед. радиол., 1975, № 5, с. 68—71. 2. Глейзер Ю. Я., Шарыпова Т. Н. Моделирование ренограмм с гиппураном-йод-131.— Мед. радиол., 1975, № 5, с. 77—78. 3. Голигорский С. Д., Френкель В. Х. Клинико-радиологическая интерпретация ренограмм.— Мед. радиол., 1967, № 8, с. 9—14. 4. Ищенко В. П., Ильинская Т. Н., Кравченко Р. П., Марчевский В. Н. Упрощенная математическая обработка данных ренографии.— Мед. радиол., 1972, № 11, с. 28—34. 5. Радиозотопы в диагностике поражений почек у больных диабетом / А. Ф. Маленьченко, Г. Г. Мамаева, В. Г. Спесивцева, В. Х. Френкель.— Минск: Наука и техника, 1974.—136 с. 6. Мирходжаев А. Х., Юнусов Р. А., Попов В. И. Клиническое применение математической модели метаболизма меченого гиппурана в организме.— Мед. радиол., 1968, № 2, с. 54—59. 7. Сивошинский Д. С., Наркевич Б. Я. Интерпретация результатов радионейрограммных исследований функционального состояния органов и систем.— Мед. радиол., 1975, № 5, с. 71—76. 8. De Gracia J. A., Scheibe P. O., Jackson P. E., Joltan J. Z., Fair W. R., Vogel J. M., Blumin L. J. Clinical applications of a kinetic model of hippurate distribution and renal clearance.— J. Nucl. Med., 1974, 15, p. 102—105. 9. Farmelant M. H., Bakos K., Burrows B. A. Physiological determinants of renal tubular passage time.— J. Nucl.

Med., 1969, 10, № 10, p. 641—645. 10. *Kenny R. W., Ackery D. M., Fleming J. S., Goddard B.-A., Grant R. W.* Deconvolution analysis of the scintillation camera renogram.— *Brit. J. Radiology*, 1975, 48, p. 481—486. 11. *Knudsen E., Hojberg K.* Simulation of the radipuran renogram test on analogue computer.— *Int. J. Appl. Rad. Isotopes.*, 1967, 18, p. 639—643. 12. *Reeve J., Crawley J. C. W.* Quantitative radioisotope renography: the derivation of physiological data by deconvolution analysis using a single— injection technique.— *Clin. Sci. Molecul. Med.*, 1974, 47, № 4, p. 317—330. 13. *Woller P., Hennig K.* Моделирование процесса прохождения гиппурана через почки.— *Радиол. диагн.*, 1970, № 3, с. 395—402.

Поступила в редакцию 05.03.81

УДК 612.82.014

Г. А. КОЛОТЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕСА МНОЖЕСТВА СИСТЕМ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ СВЯЗЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ГАУССОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Разработка методов для системного исследования переменных пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга и их реализации в виде бионических устройств является актуальной задачей.

Цель статьи — описать моделирование веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга гауссовым распределением. Это тем более важно, что в настоящее время широко изучаются математические закономерности биоэлектрических колебаний мозга, позволяющие, в частности, выдвинуть гипотезу о целостности алгоритмов волн ЭЭГ [1].

Согласно центральной предельной теореме вероятностей, с ростом числа анализируемых систем синхронных и асинхронных связей головного мозга сумма накопленных систем пространственно-временных связей головного мозга стремится к гауссовому (нормальному) распределению весов.

Для прогнозирования важно, что вес заранее неизвестной индивидуальной системы синхронных и асинхронных связей головного мозга попадет в вероятностный интервал признака вариационного ряда, отображающего системы синхронных и асинхронных связей определенных структур, в соответствии с плотностью распределения вероятностных весов этих систем:

$$p(v_1 < v_i < v_2) \cong \int_{v_1}^{v_2} p(v_i) dv.$$

При графическом изображении функции плотности весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур в интервале соответствующего признака i -го вариационного ряда имеют симметричный холмообразный вид. Вершина его символизирует

математическое ожидание $M(v) = a$, равное центру тяжести систем синхронных и асинхронных связей головного мозга в целом, вокруг которого рассеиваются веса множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Учитывая, что анализируются вероятностные, а не достоверные веса множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, вес любой системы в интервале соответствующего признака вариационного ряда может приближенно алгоритмизироваться формулой:

$$\int_{v_1}^{v_2} \rho(v_i) dv \approx 1.$$

Это означает: чем достовернее плотность распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, тем острее резонансная кривая распределенных весов, величина ближе к единице.

Дифференциальное исчисление позволяет установить, что график гауссова распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур симметричен относительно прямой, восстановленной в центре тяжести весов анализируемой совокупности систем связей. В этом графике ось абсцисс, вдоль которой происходит распределение весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга и производится обмер вероятностного интервала соответствующего признака вариационного ряда, является асимптотой графика. Кривая вероятностного распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга при гауссовом распределении имеет одно экстремальное значение, равное центру тяжести множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур: при $M(v) = a$

$$Y_{\max} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}.$$

Не исключено, что вес индивидуальной системы синхронных и асинхронных связей головного мозга может совпасть с центром тяжести множества индивидуальных систем одинаковых структур.

Кривая вероятностного распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, характеризуемая признаком вариационного ряда, имеет две точки перегиба, симметрично расположенные относительно прямой, восстановленной в центре тяжести весов множества анализируемых систем и находящейся на расстоянии

среднеквадратического отклонения от нее. Ординаты точек перегиба равны

$$Y_{tp} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi e}}$$

Вероятность того, что вес индивидуальной системы синхронных и асинхронных связей головного мозга соответствующим структур примет какое-нибудь значение из интервала (v_1, v_2) признака вариационного ряда, отображающего множества этих систем, равна в аппроксимированном виде определенному интегралу от плотности вероятности, распространенному на этот интервал.

Плотностью вероятности распределения бесконечного множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга является производная ее кривой вероятностного распределения, в идеальном случае стремящаяся к функциональной кривой распределения веса множества индивидуальных систем. В формуле Ньютона — Лейбница несобственный интеграл выразит вероятность того, что любая система синхронных и асинхронных связей головного мозга примет в идеальном случае значение из интервала $(-\infty, +\infty)$. Поэтому при функциональной зависимости распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга вероятность отображает достоверный вес множества систем, что невозможно. В этом случае несобственный интеграл в формуле Ньютона — Лейбница равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(v) dv = 1 \text{ при } \varphi(v) \cong F'(v).$$

Плотности вероятности распределения множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, как производные неубывающих вероятностных распределений в одном из пределов, стремящихся к функциональным зависимостям, являются неотрицательными независимо от возмущений. Поэтому кривые распределения весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга одинаковых структур не могут лежать ниже оси абсцисс.

Если случайный вес системы синхронных или асинхронных связей головного мозга может принимать все значения на числовой оси или все значения на полупрямой, то, как показывает [2], для кривой распределения ее ось абсцисс является асимптотой (соответственно в обе или одну сторону).

Вероятность того, что случайный вес системы синхронных и асинхронных связей головного мозга примет значение между v_1 и v_2 , равна площади криволинейной трапеции. В первом при-

ближении можно считать: вероятность того, что случайный вес наперед неизвестной системы примет любое значение из вероятностного интервала $(v, v + \Delta v)$ признака вариационного ряда, отображающего в графической форме эту систему связей с точностью до бесконечно малых высшего порядка по сравнению с Δv , равна длине интервала этого признака, умноженной на значение плотности вероятности в начальной точке интервала.

Вес множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга распределен по нормальному закону, если плотность вероятностей задана в виде определенного интеграла:

$$p(v_1 < v_i < v_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{v_1}^{v_2} e^{-\frac{(v-a)^2}{2\sigma^2}} dv.$$

Пусть $t = (v - a)/\sigma$. Отсюда $v = a - \sigma t$, $dv = \sigma dt$. Пределами интегрирования по переменной t будут $t_1 = (v_1 - a)/\sigma$ (нижний), $t_2 = (v_2 - a)/\sigma$ (верхний). Тогда

$$p(v_1 < v_i < v_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{v_1}^{v_2} e^{-\frac{(v-a)^2}{2\sigma^2}} dv = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В соответствии со свойствами определенных интегралов

$$\begin{aligned} p(v_1 < v_i < v_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\int_{t_1}^0 e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \int_0^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_1} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \end{aligned}$$

Если $\Phi\left(\frac{v-a}{\sigma}\right)$ — функция Лапласа, то вероятность того, что случайный вес индивидуальной системы синхронных и асинхронных связей головного мозга, соответствующий гауссову распределению, примет значение в интервале (v_1, v_2) признака, равна

$$p(v_1 < v_i < v_2) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{v_2 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{v_1 - a}{\sigma}\right) \right].$$

При этом важно учитывать четность и нечетность, монотонность, предел функции Лапласа.

Приведение распределения веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга к функции Лапласа свидетельствует о том, что в ходе моделирования систем пространственно-временных связей мозга учитывали тот предел, который устремляет распределение систем к достоверности, и не учитывали предел, приводящий к редко случайным распределениям весов множества систем.

Свойства системы распределения связей головного мозга зависят от начальных ν_i и центральных моментов, которые определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \nu_1 &= a, & \mu_1 &= 0, \\ \nu_2 &= a^2 + \sigma, & \mu_2 &= \sigma^2, \\ \nu_3 &= 3a\sigma^2 - a^3, & \mu_3 &= 0, \\ \nu_4 &= a^4 + 6a^2\sigma^2 + 3\sigma^4; & \mu_4 &= 3\sigma^4. \end{aligned}$$

Вес множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур, имеющие гауссово распределение, ярче всего характеризуются математическим ожиданием μ и средним квадратическим отклонением σ , т. е. соответственно начальным моментом первого и центральным второго порядков.

Центр тяжести веса множества систем одинаковых структур не влияет на форму гауссовой кривой и, определяя лишь положение ее максимальной кривой, свидетельствует о смещении центра тяжести этих систем связей без изменения их объема. При постоянном центре тяжести и уменьшении среднего квадратического σ гауссова кривая распределения веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур становится около максимальной ординаты более острой и высокой и лишь на небольшом участке возвышается над осью абсцисс, а потом почти сливается с ней. Это свидетельствует о том, что системы весов синхронных и асинхронных связей одинаковых структур сужаются в объеме, сохраняя центр тяжести постоянным. С возрастанием среднего квадратического отклонения кривая гауссова распределения весов множества систем синхронных связей головного мозга медленнее приближается к оси абсцисс, ее максимальная ордината уменьшается в σ раз, распределение вероятностей становится более равномерным.

Интерпретируя трансформацию веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга одинаковых структур, можно утверждать, что вес систем расширяется в объеме, сохраняя центр тяжести неизменным. Если же будет меняться математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение, то вес множества систем синхронных связей будет пульсировать в объеме и перемещаться в пространстве. Эти свойства оказываются чрезвычайно важными при объективной дифференциальной диагностике переменных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Когда гауссово распределение является симметричным, математическое ожидание и центр вероятностного интервала признака, выражающие экстремум весов множества индивидуальных систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, совпадают и являются центром симметрии.

Коэффициенты асимметрии A_k и эксцесса ϵ_k равны нулю. Это значит: центр вероятностного интервала (v_1, v_2) признака и математическое ожидание $M(v)$ совпадают и равны $1/2$ интервала (v_1, v_2) , т. е. наблюдается симметрия весов относительно центра тяжести весов множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга. Симметричность в данном случае заключается в том, что любые случайные веса индивидуальных систем равны по модулю. Коэффициент вариации веса множества систем равен

$$\omega = \frac{100\sigma}{M(v)} = \frac{100\sigma}{\mu}$$

Относительная ошибка систем синхронных и асинхронных связей головного мозга

$$m = \sigma / \sqrt{n},$$

где n — множество систем мозга

Кибернетический анализ 362 ЭЭГ 40 операторов АСУ при различных функциональных состояниях показывает: веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга иерархических структур легко описываются указанными информационно-статистическими параметрами и, обнаруживая вероятностную направленность гауссова распределения весов, четко дифференцируются. Это убедительно доказывается при кибернетическом анализе множества систем совмещенных синхронных связей головного мозга даже с диффузным характером структур. Исследуем некоторые дифференцируемые системы синхронных связей головного мозга четырех и пятикомпонентных структур [3].

Как известно, признаки вариационных рядов, отображая иерархию множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, достигнув апогея разветвления для признаков, характеризующих множество систем синхронных связей головного мозга тетрадных (четырехкомпонентных) структур, при переходе к признакам вариационного ряда, характеризующего множество систем синхронных связей головного мозга, октавных (пятикомпонентных) структур, моделируясь также гауссовым распределением, начинают сворачиваться.

Множества систем совмещенных синхронных связей головного мозга $H_{1,35}^5$, полученные на уровне анализа 5 мкв, имеют центры тяжести $\sup \mu = 5$ бит, $\inf \mu = 2$ бит, т. е. в среднем $\mu_{ср} = 3-4$ бит, что приблизительно в два раза меньше, чем средний центр тяжести весов множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга $H_{1,35}^4$ тетрадных структур. Это свидетельствует о том, что при одноранговом увеличении диффузности структур двукратно уменьшается интенсивность пространственно-временного синхронизма головного мозга.

Центр тяжести веса множества систем синхронных связей $H_{36,56}^5$ равен: $\sup \mu = 7 - 8$ бит, $\inf \mu = 3 - 4$ бит, для веса множества маркированных систем совмещенных синхронных связей $H_{36,70}^4$ $\mu_{cp} = 11 - 12$ бит. Это соответствует тенденции гауссова распределения множества систем синхронных связей головного мозга локальных структур (двух- и трехкомпонентных составов) и множества подсистем асинхронных связей головного мозга с ростом структуры на один ранг весовая интенсивность проявления множества индивидуальных систем совмещенных синхронных связей головного мозга падает почти в два раза.

Двойной весовой перепад подмножества систем совмещенных синхронных связей $H_{1,35}^5$ и $H_{36,56}^5$, характерный для центров тяжести μ множеств индивидуальных систем совмещенных синхронных связей головного мозга, сохраняется для среднеквадратических отклонений. В среднем σ_{cp} $H_{1,35}^5$ в два раза меньше среднеквадратических отклонений множества систем совмещенных связей $H_{1,35}^4$, для систем совмещенных синхронных связей $H_{36,56}^5$ средние величины среднеквадратических отклонений в полтора — два раза меньше σ_{cp} систем совмещенных синхронных связей $H_{36,70}^4$.

Расхождение подмножества систем совмещенных синхронных связей $H_{1,45}^5$ при аутосуггестии покоя, как правило, ниже, чем при ФС, потому что коэффициент сравнения по среднеквадратическим отклонениям меньше единицы. Наоборот, расхождение весов подмножества систем совмещенных синхронных связей $H_{46,56}^5$ при аутосуггестии покоя выше, чем при ФС 8 Гц. Отношения весов подмножеств систем совмещенных синхронных связей головного мозга октавных структур $H_{1,36}^5$ в период аутосуггестии покоя и фона в полтора — три с половиной раза больше, чем для подмножества систем совмещенных синхронных связей $H_{37,56}^5$ в период аутосуггестии покоя.

Коэффициент сравнения по коэффициентам вариации показывает: билатеральной асимметрии веса множества систем совмещенных синхронных связей головного мозга не наблюдается. Относительные ошибки множества систем совмещенных синхронных связей $H_{1,35}^5$, $H_{36,56}^5$ в среднем отличаются в полтора — два раза.

Кортеж систем совмещенных синхронных связей головного мозга $H_{1,35}^5$ включает подмножество систем совмещенных синхронных связей $H_{1,4}^5$ правой (*D*) стороны, стабильно коммутирующий один из участков головного мозга левой (*s*) стороны. Структуры систем совмещенных синхронных связей $H_{5,16}^5$, $H_{21,26}^5$ включают три участка *D*-стороны, два — *s*-стороны. Структуры $H_{17,20}^5$ состоят из двух компонент *D*-стороны, трех — *s*-стороны. Наконец, H_{35}^5 включает все участки *s*-стороны, коммутируя праволобную зону. Для $H_{1,35}^5$ характерно включение i_d , которая, возможно, является зоной иррадиации биоэнергетических сил разрушения мно-

жества иерархических систем совмещенных синхронных связей головного мозга, инертной зоной, зоной «молчания», зоной, которая обладает пониженной способностью к лабильному пространственно-временному синхронному функционированию головного мозга.

Таким образом, гауссово распределение веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга позволяет прогнозировать психофизиологическое состояние операторов АСУ. При объективной дифференциальной диагностике принцип практической уверенности будет заключаться в том, чтобы, придерживаясь «правила трех сигм», учитывать индивидуальные особенности ЭЭГ выборки и общую направленность веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга.

Список литературы: 1. Соколов А. А., Соколов Я. А. Математические закономерности электрических колебаний мозга.— В кн.: Материалы Первых Лазаревских чтений.— М.: Наука, 1976.— 99 с. 2. Карасев А. И. Основы математической статистики.— Росвузиздат, 1962.— 357 с. 3. Филатов А. Т. К вопросу о принципах саморегуляции психосоматических функций человека.— В кн.: Психическая саморегуляция. Алма-Ата, Госкомитет по печати Совета Министров Казахской ССР, 1974, с. 55—59.

Поступила в редколлегию 12.02.81.

УДК 57:53+612.13

Ю. П. ГОРГО, Ю. Б. РУБЦОВ

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА ПО ПАРАМЕТРАМ ЭКГ

Одним из распространенных методов функциональной диагностики при изучении состояния «человека-оператора» является метод электрокардиографии [1]. Он приобретает особое значение, когда интенсивность умственных, эмоциональных и физических нагрузок на организм человека все возрастает, одновременно увеличивается процент лиц с различными нарушениями сердечного ритма и сердечными патологиями вследствие перенапряжений или стрессовых воздействий [2]. Регистрация ЭКГ при оценке деятельности оператора обладает рядом преимуществ по отношению к другим методикам. Во-первых, этот метод хорошо разработан и описан в литературе, что позволяет сравнивать полученные данные с данными других авторов. Во-вторых, измерения параметров ЭКГ позволяют быстро набирать массив данных от оператора во время работы и затем применять для этого массива статистические и математические методы обработки. В-третьих, сигнал ЭКГ имеет довольно простую форму и легко подвергается автоматической обработке. Все это побудило нас детально исследовать методику электро-

кардиографии для автоматической оценки психофизиологического состояния и качества деятельности оператора.

Нашей целью было создание автоматического комплекса экспресс-оценки степени сосредоточенной работы оператора по параметрам ЭКГ.

Предпосылкой для постановки такого рода задачи служил тот факт, что (как показали наши исследования) на пульсограмме испытуемых отражается степень сосредоточенности их работы. Пульсограммой при этом мы называли кривую колебаний пульса под действием внешних раздражителей, трансформированную в аналоговый вид посредством пульсотактометра. ЭКГ-сигнал от испытуемого поступал на электрокардиоскоп, а с него — на пульсотактометр фирмы «Medicor — Ogion», с выхода которого и производилась запись пульсограммы на самописец. Мы регистрировали только резкие изменения пульса в переменном режиме усиления самописца.

Пульсограмму регистрировали как в состоянии покоя, так и во время обычной и сосредоточенной работы испытуемых с психоанализатором типа ПНН-3. Напряженная (сосредоточенная) работа оператора достигалась словесным внушением, ускорением темпа работы и наказанием за неправильно выполненное действие. Критерием качественной работы оператора служило укорочение времени ответа на поданный раздражитель. Под наблюдением находились 80 здоровых человек одного возраста и в одинаковых условиях работы. Датчики ЭКГ типа ЭПСК-01 накладывались на грудные отведения по Нэбу — Бутченко.

Мы заметили, что характер пульсограммы зависит от степени тренированности нервной и сердечно-сосудистой системы. У испытуемых с нетренированной психоэмоциональной сферой напряжение в работе выражается в стабилизации пульса. На рис. 1 показаны малые изменения пульса при умственно-напряженной работе оператора с ПНН-3 и при сосредоточенной работе по оценке периода времени в 1 мин (1 — начало сосредоточенной работы на ПНН-3; 2 — конец сосредоточенной работы; 3 — начало работы с тестом по оценке 1 мин; 4 — резкое охлаждение правой руки хлорэтилом). Причем во время напряженной работы посторонние физические воздействия не влияют на изменения пульса (рис. 1, пункт 4). Это указывает на своеобразное доминирование напряженной умственной работы по отношению к другим раздражителям. Если сосредоточенность в работе снимается, то сразу же возникают резкие колебания пульсограммы (рис. 1, пункт 1). Отсюда мы сделали заключение, что регистрация пульсограммы является хорошим показателем сосредоточенного состояния человека при умственно напряженной работе или работе, требующей внимания. Мы пришли к мысли, что степень сосредоточенной работы оператора можно оценить по

величине стабилизации пульса, т. е. по уменьшению его вариабельности.

Для автоматизации такой оценки в качестве основного параметра брали $R-R$ интервалы ЭКГ, которые, по мнению многих авторов, являются хорошим показателем эмоционального и психофизиологического состояния здорового человека [3—7]. Построение гистограммы временных значений $R-R$ интервалов ЭКГ с определенным выбранным шагом квантования, по некоторым литературным данным, обеспечивает разнообразный спектр оценок физиологических и психофизиологических состояний человека [8—11].

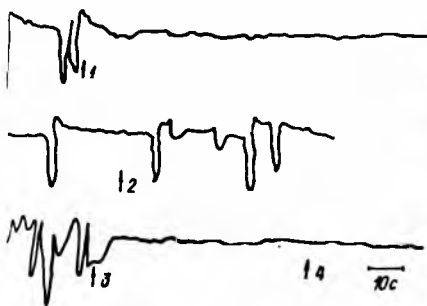


Рис. 1

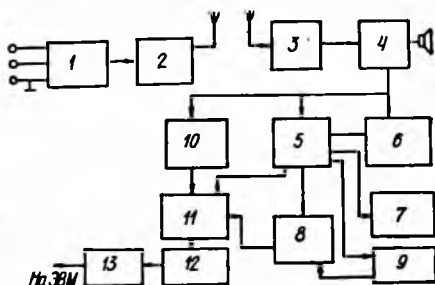


Рис. 2

На основании этих предпосылок был изготовлен комплекс аппаратуры для автоматической регистрации $R-R$ интервалов ЭКГ оператора в движении, построении гистограммы кардиоинтервалов и экспресс-анализа таких гистограмм. Блок-схема комплекса представлена на рис. 2. Он включает в себя следующие устройства: 1 — кардиоселектор с подсоединенными датчиками ЭКГ; 2 — передающий комплекс типа «Сигнал-1»; 3 — приемник типа «Сигнал-3»; 4 — магнитный регистратор; 5 — построитель гистограммы; 6 — осциллограф; 7 — графопостроитель; 8 — анализатор гистограмм; 9 — блок памяти; 10 — ритмометр типа РВМ-101; 11 — согласующее устройство; 12 — транскриптор типа Ф 5033 К с ЦПМ; 13 — перфоратор типа ПЛ-80.

Блок кардиоселектора предназначен для усиления кардиосигнала, снимаемого с помощью нагрудных электродов типа ЭПСК-01, выделения R зубцов и формирования из них частотных посылок — прямоугольных импульсов, модулированных низкой частотой. В ответ на каждый проходящий с выхода усилителя R зубец формирователь выдает прямоугольный импульс амплитудой +19 В и длительностью порядка 360 мс. Благодаря использованию в кардиоблоке схемы стабилизации постоянной составляющей обеспечивается высокая степень подавления

синфазной составляющей входной кардиосигнала. Поэтому кардиоселектор может работать с сильно поляризуемыми электродами, а также с заземленным испытуемым. В приборе происходит подавление T -зубца ЭКГ вследствие того, что длительность сформированного прямоугольного импульса превышает длительность R - T интервала электрокардиограммы. При этом длительность прямоугольного импульса, равная 360 мс, была выбрана по следующим соображениям. Зависимости нормальной длительности электрокардиографической систолы (т. е. интервала $QRST$) от длительности сердечного цикла, пола и возраста представлена формулой Bazett [12]: $QRST = \kappa \sqrt{p}$, где p — длительность сердечного цикла (R - R период); κ — константа, равная для мужчин — 0,37; для женщин — 0,40; для детей — 0,38.

Отсюда следует, что на временном интервале значений R - R периодов от 400 до 1200 мс длительность $QRST$ будет изменяться от 0,23—0,25 с при R - R интервале, равном 400 мс ($ЧСС = 150$ уд/мин), до 0,40—0,44 с при R - R интервале, равном 1200 мс ($ЧСС = 50$ уд/мин). Поэтому мы выбирали длительности прямоугольного импульса, подавляющего T -зубец ЭКГ, таким чтобы он перекрывал возможно большее количество R - T интервалов в изучаемом диапазоне, но не равнялся 0,4 с, так как тогда формируемый прямоугольный импульс будет препятствовать правильному измерению R - R интервала при $ЧСС = 150$ уд/мин. Мы пришли к выводу, что длительность синхронного прямоугольного импульса в 360 мс является в этом случае наиболее оптимальной.

Для беспроводной передачи сформированных прямоугольных импульсов на расстояние была разработана функциональная схема, которая включает в себя телеметрический приемопередающий комплекс типа «Сигнал-1». Сформированный синхроимпульс с выхода кардиоселектора поступает на электронный ключ, который за время действия синхроимпульса включает передатчик на частоте 27, 120 МГц. Переданные импульсы принимаются приемником комплекса и подаются на вход магнитного регистратора (рис. 2).

Магнитный регистратор предназначен для записи сигналов, поступающих от телерадиоприемника на магнитный носитель для последующего хранения и обработки информации. Магнитный регистратор выполнен на базе лентопротяжного механизма магнитофона «Маяк».

После магнитного регистратора прямоугольные импульсы, сформированные из R зубцов электрокардиограммы, поступают на вход оригинального устройства, позволяющего формировать гистограмму R - R интегралов на определенном временном интервале и с заданным шагом квантования. Такое устройство мы называли строителем гистограмм (гистограф) (рис. 2). Он обеспечивает постоянное измерение периодов следования пря-

моугольных импульсов, в диапазоне времени от 400 до 1200 мс, разбитом на дискретные интервалы (шаг квантования) по 50 мс. Предел 1200 мс, соответствующий ЧСС=50 уд/мин, выбран потому, что здоровые люди с такой частотой сердечных сокращений встречаются довольно редко [13]. Вторую границу мы выбрали произвольно. При ее выборе пользовались известными данными [13, 14] о том, что у работников преимущественно умственного труда при умственно-напряженной работе изменения частоты сердечных сокращений не превышают 120—125 уд/мин. А при наложении мышечной нагрузки средней силы у здоровых операторов ЧСС не превышает 140—150 уд/мин [4, 14]. Поэтому второй границей измерения выбраны $R-R$ интервалы, равные 400 мс, соответствующие ЧСС=150 уд/мин. Шаг квантования при построении гистограммы $R-R$ интервалов должен быть, с одной стороны, небольшим, чтобы оценить тонкую структуру гистограммы, а с другой стороны, — достаточно крупным, чтобы гистограмма не была слишком размазанной [15]. Мы считали, что таким условиям удовлетворяет шаг квантования в 50 мс, что согласуется с литературными данными [8]. Однако в построителе гистограмм предусмотрена возможность быстрой перестройки шага квантования как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения. Шаги квантования у нас выбраны одинаковыми и поэтому гистограмма, получаемая на выходе гистографа, располагается в 16 классах (т. е. на промежутке 400—1200 мс с разрядом 50 мс).

Для автоматической записи гистограммы в приборе имеется блок опроса, поочередно регистрирующий величину аналогового в каждом канале в течение 2 с, при этом каждому значению в классе соответствует напряжение в 100 мВ. На выходе блока опроса установлен графопостроитель типа Н 306 (рис. 2). Процесс построения гистограммы контролируется визуально на экране осциллографа.

Блок индикации накапливает сигналы, поступающие на каждый из 16 каналов, и суммирует их. После прохождения 100-го $R-R$ интервала ЭКГ находящаяся в приборе схема накопления производит автоматическую остановку прибора. Массив в 100 данных был выбран по следующим соображениям. Мы считаем, что для оценки функционального состояния оператора в покое или во время работы по ЭКГ необходима регистрация ее в течение 1,5—2 мин, чтобы сделать статистически не достоверными все те технические и физиологические помехи, которые накладываются на электрокардиосигнал. За это время отмечается 90—140 кардиоциклов при средней частоте сокращений сердца 60—70 уд/мин. Мы остановились на регистрации 100 кардиоциклов и регистрируем одинаковый массив данных при разных режимах работы оператора, поскольку в этом случае строятся гистограммы одинаковой площади и удобно производить их анализ.

Автоматический анализ распределения $R-R$ интервалов мы проводили методом сравнения. Для этого было создано устройство, позволяющее запоминать и моделировать гистограмму (блок памяти) (рис. 2). Она представляет собой 16 ползунковых потенциометров, через систему опроса (шаговый искатель) подсоединенных к источнику постоянного стабилизированного напряжения. Выходы с потенциометров подаются на анализатор гистограмм и контролируются цифровым вольтметром.

Последним прибором комплекса является анализатор гистограмм (рис. 2). В основу его работы заложен способ сравнения двух гистограмм одного и того же лица, полученных в состоянии покоя и в рабочем состоянии. При сравнении двух одинаковых по площади гистограмм они могут отличаться: смещением модальных классов, изменением амплитуды модального класса и величиной значимых классов гистограммы. Если амплитуда максимума увеличивается, значит, форма гистограммы станет более вытянутой относительно другой гистограммы и наоборот. А поскольку (как отмечено выше) сужение гистограммы распределения $R-R$ интервалов при выполнении оператором работы свидетельствует о повышении степени сосредоточенности человека, то по изменению величины максимума при сравнении двух гистограмм, зарегистрированных в состоянии покоя и при работе, можно судить о степени мобилизации оператора во время работы. В анализаторе гистограмм это делается автоматически с помощью схем выделения максимума. В устройстве предусмотрена оценка смещения положения модального класса текущей гистограммы, т. е. гистограммы, полученной во время работы, с исходной гистограммой, которая зарегистрирована в состоянии покоя оператора, в сторону учащения или урежения ЧСС.

Кроме того, при анализе гистограммы мы учитывали, находятся ли все $R-R$ интервалы в пределах нормы или наблюдаются отклонения. Если гистограмма укладывалась в пределах нормы, наблюдаются отклонения. Если гистограмма укладывалась в пределы от 600 до 1100 мс, то мы считали ее нормальной. В эти пределы, по мнению некоторых авторов [5, 9, 13], укладываются все кардиоциклы здорового человека без внешних воздействий в состоянии покоя. Поэтому выход гистограммы за эти пределы свидетельствуют об отклонениях ЧСС от нормы в сторону тахикардии или брадикардии. Вся информация о сравнении двух гистограмм выводится на табло и на фишку для дальнейшего анализа. В комплексе предусмотрено также, что выходы с магнитного регистратора, построителя гистограмм и анализатора гистограмм через согласующее устройство соединены с транскриптором и перфоратором для дальнейшего статистического анализа полученных данных на ЭВМ (рис. 2)

Работа с комплексом осуществлялась следующим образом. Электроды, кардиоселектор и передатчик крепились на испытуемом так, чтобы они не мешали выполнению его обычной

деятельности. Гистограмму, полученную в состоянии покоя у каждого испытуемого, мы регистрировали, запоминали и записывали ее. Затем, когда проводились исследования данного испытуемого в рабочем состоянии, его исходная гистограмма набиралась на потенциометрах блока памяти и вводилась в анализатор на вход «исходная гистограмма». А на вход «текущая гистограмма» подавалась гистограмма распределения кардиоциклов, полученных у испытуемого непосредственно во время работы. Такой подход позволил осуществить индивидуальную оценку изменений гистограмм распределения $R-R$ интервалов ЭКГ в зависимости от степени влияния выполняемой работы на оператора. Кроме того, на блоке памяти можно набирать любую смоделированную или усредненную гистограмму и производить с ними сравнительный анализ текущих гистограмм.

Предварительные исследования на 30 испытуемых дали следующие результаты. Мы регистрировали ЭКГ этих испытуемых в норме, когда оператор находился перед тренажером без свершения работы, и при сосредоточенной работе исследуемого в максимально возможном темпе на психоанализаторе ПНН-3. О состоянии сосредоточенности в работе мы судили по уменьшению времени ответной реакции при подаче простого светового раздражителя в сравнении с этим же параметром, полученным при обычной работе оператора без ускорения темпа подачи раздражителей. При этом вся группа испытуемых была разбита на подгруппы: с выраженной степенью сосредоточенности в работе, когда достоверно уменьшается время латентного периода ответной реакции (18 чел.); с выраженной степенью несобранности, когда достоверно увеличивалось время латентного периода (2 чел.), и неясные реакции, когда достоверных изменений в величинах латентных периодов не отмечалось, хотя намечалась явная тенденция к уменьшению этого параметра.

В первой группе испытуемых среднестатистические изменения $R-R$ интервалов ЭКГ были недостоверными с $0,717 \pm 0,005$ до $0,714 \pm 0,004$ с. И в то же время в 14 случаях из 18 (77,8%) отмечалось сужение гистограммы распределения $R-R$ интервалов ЭКГ при сосредоточенной работе по отношению к гистограммам этих же лиц в состоянии нормы. Во второй группе испытуемых среднестатистические изменения интервалов составили $0,49 \pm 0,02$ — $0,53 \pm 0,04$, но в обоих случаях отмечалось расширение гистограммы. В третьей группе испытуемых кардиоциклы в среднем изменились с $0,722 \pm 0,007$ до $0,705 \pm 0,008$ с, но в 7 случаях из 10 отмечалось сужение гистограммы относительно нормы, причем в тех случаях, когда отмечалась тенденция к уменьшению времени ответной реакции на предъявляемый стимул.

На основании этих данных мы пришли к выводу, что сужение гистограммы распределения $R-R$ интервалов ЭКГ при сравнении с нормальными индивидуальными гистограммами может

служить признаком работы оператора в сосредоточенном состоянии, а значит, и качества деятельности.

Список литературы: 1. Лукьянов А. Н., Фролов М. В. Исследование сигналов состояния оператора. — Автометрия, 1966, № 3, с. 27—34. 2. Вайнштейн И. И. Физиологические особенности положительных и отрицательных эмоциональных состояний. — М.: Наука, 1972. — 13 с. 3. Карпман В. Л., Скопикова С. Е. Эмоциональное напряжение и фазовый анализ сократительной деятельности сердца. — В кн.: Нервное напряжение и деятельность сердца. — М.: Наука, 1969. с. 78—103. 4. Лещинская Я. С. Изменения ЭКГ в условиях эмоционального напряжения. — Кардиология, 1974, 14, № 6, с. 32—88. 5. Дембо А. Г., Земцовский Э. В. Электрокардиограмма в ритм сердца здоровых молодых людей. — Физиология человека, 1978, 4, № 3, с. 387—393. 6. Mohr R. K. Suggestions for the harmonic analysis of Point Process Data. — In: Comp. a biomed. Res., 1975, 8, № 1, p. 19—55. 7. Wever R. The circadian multi-oscillator system of man. — In: Int. J. of Chronobiology, 1976, 9, p. 521—530. 8. Баевский Р. М. Некоторые подходы к анализу ритма и силы сердечных сокращений с точки зрения кибернетики. — В кн.: Функциональные особенности сердца при физических нагрузках в возрастном аспекте. — Ставрополь, 1975, с. 27—51. 9. Воскресенский А. Д., Вентцель М. Д. Статистический анализ сердечного ритма и показателей гемодинамики в физиологических исследованиях. — М.: Наука, 1974. — 371 с. 10. Пастухов Р. И., Вихриева М. П. Изменения сердечной деятельности при высоком эмоциональном напряжении (по данным радиотелеметрии). Бюл. эксп. биол. и мед., 1968, № 8, с. 14—16. 11. Савич А. А., Сысоев В. М. Адаптивная перестройка сердечного ритма при эмоциональных реакциях. — В кн.: Адаптивные реакции мозга и их прогнозирование. — Л., 1978, с. 88—97. 12. Коган А. Б. Электрофизиология. — М. Высшая школа. 1969. — 184 с. 13. Кечкер М. И. Нормальная ЭКГ. — М.: Наука, 1970. — 368 с. 14. Медведев В. П. К динамике изменений ЭКГ у работников умственного труда. — Мат. к XI науч. конф. мол. уч. — ЛИУВ, Л., 1971, с. 195—197. 15. Курицкий В. К. Математические методы в физиологии. — Л.: Наука, 1969. — 41 с.

УДК 519.34+536.2

А. И. РОПАВКА

ДВОЙСТВЕННЫЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ В ЗАДАЧАХ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ТИПА

Уравнения математической физики параболического типа [1] применяются при моделировании биологических процессов и систем, описании диффузионных процессов, моделировании стохастических систем и т. д.

Численные решения задач, связанных с этими уравнениями, сопряжены с большими математическими трудностями. В настоящей статье предлагаются двойственные алгоритмы решения подобного рода задач, позволяющие апостериорно судить о точности получаемых результатов. Алгоритмы носят характер экстремальных задач, легко реализуются на ЭВМ и иллюстрируются на примере плоской задачи:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u + f \quad (1); \quad u = g \quad \text{при} \quad (x, y) \in \partial\Omega, \quad t > 0 \quad (2); \quad u = h \quad \text{при} \quad (x, y) \in \Omega, \quad t = 0. \quad (3)$$

Здесь Ω — односвязная, ограниченная область переменных (x, y) . Временная переменная t изменяется в интервале $[0, T]$. Решение задачи (1)—(3) сводится к задаче минимизации функционала $I(u) \rightarrow \inf$ (4), где множество функций u определяется граничными условиями (2)—(3).

Суть метода, сводящего задачу (1)—(3) к решению экстремальной задачи (4), состоит в следующем. Интервал $[0, T]$ разбиваем на n достаточно малых частей и производную $\partial u / \partial t$ заменяем ее конечноразностным аналогом (метод Рунге [1])

$$\sum_{j=1}^p \Delta t_j^p = T; \quad \Delta t_j^p = t_j^p - t_{j-1}^p; \quad (5)$$

$$\frac{u(x, y, t_j^p) - u(x, y, t_{j-1}^p)}{\gamma(x, y, t_j^p) \Delta t_j^p} = \Delta u(x, y, t_j^p) + f(x, y, t_j^p). \quad (6)$$

Считая $u(x, y, t_{j-1}^p) = v$ известной функцией ($u(x, y, 0)$ определяем из начального условия (3)), чтобы найти $u(x, y, t_j^p) = u$, приходим к задаче Дирихле для уравнения эллиптического типа [1]:

$$-\Delta u + \frac{u}{\gamma} = \frac{v}{\gamma} + f; \quad (\tau = \Delta t_j^p). \quad (7)$$

Для решения серии эллиптических задач применим известный вариационный принцип. Необходимо минимизировать функционал

$$I^0(u) = \int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} |\nabla u|^2 + \frac{(u-v)^2}{2\gamma\tau} - uf \right\} d\Omega \quad (8)$$

на соответствующем множестве функций. Стандартный метод Рунге [2] минимизации (8) предполагает аппроксимацию решений u

в виде усеченного ряда $u = \sum_{k=1}^n c_k f_k$ (9).

Центральным вопросом во всяком приближенном методе является вопрос достоверности получаемых результатов. В данном случае это определение того значения числа n , на котором следует оборвать суммирование в представлении (9). Этот вопрос решается нами путем привлечения теории двойственных задач, известных в математическом программировании и выпуклом анализе [3—5].

Двойственный метод состоит в том, что исходную задачу типа \inf заменяем эквивалентной задачей типа $\inf \sup$, а двойственность последней сводится тогда к определению $\sup \inf$ с последующим переходом к задаче типа \sup . Можно показать, что

$$\inf_u I^0(u) = \sup_{\lambda, \mu} I_0(\lambda, \mu), \quad (10)$$

где $I^0(u)$ — функционал (8), а

$$I_0(\lambda, \mu) = -\frac{1}{2} \int_{\Omega} \left\{ \lambda^2 + \mu^2 + \frac{(s-v)^2}{\delta} \right\} d\Omega^*. \quad (11)$$

* Предложена В. И. Калиниченко.

Здесь

$$s = f + \frac{\partial \lambda}{\partial x} + \frac{\partial \mu}{\partial y}, \quad \delta = \frac{1}{\gamma \tau}, \quad (12)$$

причем функции λ и μ никакими условиями на краях не связаны и не обязаны удовлетворять каким-либо уравнениям внутри области, что существенно отличает предлагаемый подход от известных (ортогональных проекций, Трефтца и др.).

Прямая и двойственная задачи однотипны по методу решения и поэтому могут решаться одновременно. Счет прекращается по достижении заданной точности, например, когда

$$I^0 - I_0 < \delta, \quad (13)$$

где δ — заданное число. Если заданная точность достигнута, то это значит, что полученное решение отличается от точного не более чем на $c\sqrt{\delta}$, где c — известная константа (оценка в H_A [2]).

Рассмотрим численный пример. Пусть уравнение

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u + f \quad (14)$$

решается в прямоугольной области $(-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b)$ с четырьмя круговыми врезами в углах прямоугольника с граничными и начальными условиями

$$u = 0 \text{ при } (x, y) \in \partial\Omega, \quad t > 0, \quad u = 0 \text{ при } (x, y) \in \Omega, \quad t = 0. \quad (15)$$

Необходимо найти решение в точке $t=1$ при следующих предположениях: $\gamma = 1, a = b = 1, R = 0,3$ (R — радиус окружностей):

$$f = 0,01 \left[\frac{\omega}{1+t^2} - \arctg(t) \Delta \omega \right],$$

где

$$\omega = (a^2 - x^2)(b^2 - y^2)[R^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2][R^2 - (x+a)^2 - (y-b)^2][R^2 - (x-a)^2 - (y+b)^2][R^2 - (x+a)^2 - (y+b)^2]. \quad (16)$$

Этому случаю соответствует точное решение

$$u_T = \omega \arctg(t) 0,01. \quad (17)$$

Численные результаты приведены ниже при $y = 0, 0, r = 0,1$.

Были получены следующие значения функционалов: $I^0 = -0,038163, I_0 = -0,038167$. Для приближения u, λ и μ удерживалось десять членов ряда (9)

$$u = \omega \sum_{k=1}^{10} a_k P_k, \quad \lambda = \sum_{k=1}^{10} b_k P_k, \quad \mu = \sum_{k=1}^{10} c_k P_k, \quad (18)$$

где P_k — полиномы Чебышева 1-го рода от двух переменных. Численные результаты подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

Список литературы: 1. Смирнов В. И. Курс высшей математики, т. IV.— М.: Физматгиз, 1958.— 812 с. 2. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике.— М.: Наука, 1970.— 512 с. 3. Иоффе А. Д., Тихомиров В. М. Теория экстремальных задач.— М.: Наука, 1974.— 479 с. 4. Гольштейн Е. Г. Теория двойственности в математическом программировании и ее приложения.— М.: Наука, 1971.— 351 с. 5. Экланд И., Темам Р. Выпуклый анализ и вариационные проблемы.— М.: Наука, 1979.— 400 с.

Поступила в редколлегию 17.03.81.

УДК 681.34

В. Б. МИЛОСЕРДОВ

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ТИПА НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

При исследовании различных биологических систем возникает необходимость решения уравнений параболического типа. Получение численных результатов для этих уравнений сопряжено со значительными затратами времени цифровых вычислительных машин.

Решение уравнений параболического типа на аналоговых вычислительных машинах связано со значительными трудностями и низкой точностью вычислений. В связи с этим возникает проблема поиска наиболее эффективных путей реализации вычислительных алгоритмов для решения этого класса задач, дающих необходимую точность при высокой скорости вычислений.

В статье предлагается метод решения уравнений параболического типа с высокой точностью на гибридных вычислительных системах путем сведения их к интегральным уравнениям типа Вольтерра. Покажем эту возможность на частном примере. Рассмотрим сведение уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \Delta u = f \quad (1)$$

к интегральному уравнению типа Вольтерра.

Ограничимся рассмотрением двумерного случая для задачи Неймана [1]. Пусть в области $\Omega [0, T]$ ищется решение уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad (x, y, t) \in \Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} = \Phi(x, y, t); \quad (x, y, t) \in \partial\Omega, \quad (3)$$

$$u = 0; \quad t = 0; \quad (x, y) \in \partial\Omega. \quad (4)$$

Переменные $(x, y) \in \Omega$; $[0, T]$ — интервал изменения временной переменной t ; Ω — заданная область (считаем ее ограниченной); $\partial\Omega$ — граница области Ω ; $\frac{\partial u}{\partial \nu}$ — производная по нормали.

Можно показать, что функция

$$z(x, y, \xi, \eta, t, \tau) = \frac{1}{4\pi(t-\tau)} e^{\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4(t-\tau)}} \quad (5)$$

является решением уравнения (1). Оно называется фундаментальным решением. Решение задачи (2)—(4) ищется в виде

$$u(x, y, t) = \int_0^t d\tau \int_{\partial\Omega} z(x, y, \xi, \eta, t, \tau) \varphi(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta. \quad (6)$$

Функция $u(x, y, t)$, определяемая уравнением (6), называется потенциалом. В теории уравнений с частными производными доказывается, что потенциал является непрерывной в замкнутой области функцией, удовлетворяющей внутри $\Omega_x [0, T]$ однородному уравнению (2), а также нулевому начальному условию (4). Требование, чтобы его производная по нормали равнялась Φ , приводит к интегральному уравнению для плотности φ :

$$\varphi(\xi, \eta, t) = -2 \int_0^t d\tau \int_{\partial\Omega} H(\xi, \eta, \chi, \mu, t, \tau) \varphi(\chi, \mu, \tau) d\chi d\mu + 2\Phi(\xi, \eta, t). \quad (7)$$

Здесь ядро H имеет вид

$$H(x_0, y_0, \xi, \eta, t, \tau) = \frac{\partial z(x, y, \xi, \eta, t, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \cos(\nu, x_0) + \frac{\partial z(x, y, \xi, \eta, t, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=y_0} \cos(\nu, y_0). \quad (8)$$

Точка $(x_0, y_0) \in \partial\Omega$, а ν — означает направление внешней нормали к $\partial\Omega$. Ядро H , входящее в интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода, имеет слабую особенность, поэтому к нему применимы итерационные алгоритмы.

Для итерационных алгоритмов разработан специальный метод реализации их на гибридных вычислительных системах [2], который называется методом слоя. Построим алгоритм решения уравнения (7) с применением метода слоя. Решение интегрального уравнения (7) ищется в виде

$$\varphi_{n+1}(\xi, \eta, t) = 2\Phi(\xi, \eta, t) - 2 \int_0^t d\tau \int_{\partial\Omega} H(\xi, \eta, \chi, \mu) \varphi_n \times (\chi, \mu, \tau) d\chi d\mu, \quad (9)$$

где $H(\xi, \eta, \chi, \mu) = 0 \quad \forall \tau > t$.

Но соотношение (9) можно представить в виде

$$\varphi_{n+1}(\xi, \eta, t) = \varphi_n(\xi, \eta, t) + \Delta\varphi_{n+1}(\xi, \eta, t). \quad (10)$$

Тогда

$$\varphi_{n+1}(\xi, \eta, t) = 2\Phi(\xi, \eta, t) - 2 \int_0^t d\tau \int_{\partial\Omega} H(\xi, \eta, \chi, \mu) [\varphi_{n-1}(\chi, \mu, \tau) +$$

$$+ \Delta \varphi_n(\chi, \mu, \tau)] d\chi d\mu = \varphi_n(\xi, \eta, t) - 2 \int_0^t d\tau \int_{\partial \Omega} H(\xi, \eta, \chi, \mu) \times \\ \times \Delta \varphi_n(\chi, \mu, \tau) d\chi d\mu,$$

г. е.

$$\Delta \varphi_{n+1}(\xi, \eta, t) = -2 \int_0^t d\tau \int_{\partial \Omega} H(\xi, \eta, \chi, \mu) \Delta \varphi_n(\chi, \mu, \tau) d\chi d\mu. \quad (11)$$

Соотношения (10), (11) позволяют применить для решения уравнения (2) метод слоя, реализуемый на ГВС с помощью следующего алгоритма:

1. В аналоговом процессоре (АП) или цифровом процессоре (ЦП) из соотношений (5) и (8) вычисляется ядро уравнения (7) $H(\xi, \eta, \chi, \mu)$.
2. В АП вычисляется начальное приближение $\varphi_1(\xi, \eta, t) = 2\Phi(\xi, \eta, t)$.
3. Индекс итерационного шага n увеличивается на 1.
4. В АП из соотношения (9) вычисляется следующее приближение $\varphi_{n+1} \times$
5. В ЦП проверяется условие

$$\max |\varphi_{n+1}(\xi, \eta, t) - \varphi_n(\xi, \eta, t)| < \varepsilon_A,$$

где ε_A — разрешающая способность АП. Если оно не выполняется, то повторяются шаги 3, 4, 5.

6. В ЦП с высокой точностью производится вычисление $\varphi(\xi, \eta, t)$ из соотношения (9) для двух следующих итерационных шагов с помощью любого численного метода. Вычисляется приращение $\Delta \varphi_{n+3}(\xi, \eta, t)$ из соотношения $\Delta \varphi_{n+3}(\xi, \eta, t) = \varphi_{n+3}(\xi, \eta, t) - \varphi_{n-2}(\xi, \eta, t)$. Приращение масштабируется посредством масштабного коэффициента

$$M = \frac{\varphi_{n+3}(\xi, \eta, t)}{\max \Delta \varphi_{n+3}(\xi, \eta, t)}.$$

7. Индекс итерационного шага $n = n + 3$.
8. В АП вычисляется соотношение (11).
9. В ЦП приращение $\Delta \varphi_{n+1}(\xi, \eta, t)$ демасштабируется и вычисляется соотношение (10).

10. В ЦП проверяется условие $\max |\Delta \varphi_{n+1}(\xi, \eta, t)| < \frac{\varepsilon_A}{M}$. Если оно не выполняется, то $n = n + 1$ и повторяются шаги 8, 9, 10.

11. В ЦП производится проверка достижения решения требуемой точности. Если такая точность достигнута — решение окончено. В противном случае работа алгоритма повторяется, начиная с шага 6.

В заключение следует отметить, что рассмотренный метод применим к остальным краевым задачам для уравнения вида (1) или к его обобщениям. Применение гибридного решения уравнений параболического типа позволяет получать результаты с быстроедействием, близким к быстроедействию аналоговых вычислительных машин, причем время решения будет в основном определяться временем выполнения в цифровом процессоре двух точных итерационных шагов. Точность решения определяется только длиной разрядной сетки цифрового процессора [2].

Список литературы: 1. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. — М.: Гостехиздат, 1957. — 473 с. 2. Трашутин С. И. Гибридное решение интегральных уравнений некоторыми итерационными методами с высокой точностью (см. статью в настоящем сборнике).

Поступила в редколлегию 17.03.81.

ГИБРИДНОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕКОТОРЫМИ ИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Необходимость решения интегральных уравнений часто возникает в различных задачах бионики и связанных с ней областях, например: в задачах восстановления пространственной структуры микроскопических объектов в биологии по их двумерным проекциям, в задачах редукции микрообъектов за аппаратную функцию системы и т. д. [1].

Наиболее целесообразным с точки зрения быстродействия представляется решать интегральные уравнения на гибридных вычислительных системах.

В работе [2] для решения линейного интегрального уравнения Фредгольма, имеющего вид $y(x) = f(x) + \lambda \int_a^b K(x, t)y(t) dt$ (1) был предложен гибридный метод решения, применяемый для метода простой итерации (метод слоя). На каждом шаге итерации приближенное решение уравнения (1), полученное в аналоговом процессоре (АП), передается в цифровой процессор (ЦП), проверяющий условие

$$\max |\Delta y_{n+1}(x)| = \max |y_{n+1}(x) - y_n(x)| \leq \epsilon_A,$$

где ϵ_A — разрешающая способность аналогового процессора. При выполнении этого условия в ЦП одним из численных методов с высокой точностью получают приближенные решения для двух следующих итерационных шагов и соответствующую им величину приращения $\Delta y_n(x)$. После масштабирования $\Delta y_n(x)$ поступает в АП, где вычисляется величина приращения $\Delta y_{n+1}(x)$ для следующего итерационного шага. В ЦП это приращение перемасштабируется и суммируется с величиной $y_n(x)$ и т. д. до получения заданной точности решения.

Применение метода слоя позволяет получить быстродействие, близкое к быстродействию аналоговых вычислительных машин, а точность будет определяться только длиной разрядной сетки ЦП.

В связи с очень жесткими требованиями, накладываемыми на ядро, этот метод не всегда применим. Кроме того, итеративный процесс расходится, если параметр λ близок к первому характеристическому числу λ_1 интегрального уравнения. Поэтому для решения интегральных уравнений типа Фредгольма второго рода часто применяются метод Положего и метод средних. Для этих методов предлагается модификация метода слоя.

Метод Положего. Для уравнения (1), ядро которого $K(x, t)$ и функция $f(x)$ ограничены на $[a, b]$ и параметр λ не является характеристическим числом, решение ищется в виде [1] $y(x) = \psi(x) - f(x)$ (2). Функцию $\psi(x)$ находим итеративно из следующих соотношений: $\psi_0(x) = \frac{2}{\sigma} F^*(x)$ (3), где

$$F^*(x) = \mu \int_a^b \left[\frac{1}{\mu} K_2(x, t) - K(x, t) \right] f(t) dt; \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (5); \quad K_2(x, t) = \int_a^b K(x, s) K(s, t) ds \quad (6);$$

$$\sigma \geq \mu^2 + 2|\mu| \left[\int_a^b \int_a^b K^2(x, t) dx dt \right]^{1/2} + \int_a^b \int_a^b K^2(x, t) dx dt; \quad (7)$$

$$\psi_{K+1}(x) = \psi_0 + q\psi_K(x) - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \psi_K(t) dt. \quad (8)$$

Здесь $q = 1 - \frac{2\mu^2}{\sigma}$ (9); $N(x, t) = K_2(x, t) - 2\mu K(x, t)$ (10).

Поскольку $\psi_{K+1}(x)$ находим итеративно, то эту функцию можно представить в виде $\psi_{K+1}(x) = \psi_K(x) + \Delta\psi_{K+1}(x)$ (11). Тогда

$$\begin{aligned} \psi_{n+1}(x) &= \psi_0(x) + q\psi_{n-1}(x) + q\Delta\psi_n(x) - \\ &- \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \psi_{n-1}(t) dt - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \Delta\psi_n(t) dt = \\ &= \psi_0(x) + q\psi_{n-1}(x) - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \psi_{n-1}(t) dt + \\ &+ q\Delta\psi_n(x) - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \Delta\psi_n(t) dt = \\ &= \psi_n(x) + q\Delta\psi_n(x) - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \Delta\psi_n(t) dt, \end{aligned}$$

т. е.

$$\Delta\psi_{n+1}(x) = q\Delta\psi_n(x) - \frac{2}{\sigma} \int_a^b N(x, t) \Delta\psi_n(t) dt. \quad (12)$$

Из соотношения (12) видно, что для метода Положего можно применить метод слоя, выполняя вычисления по следующему алгоритму:

1. Вычисляются в АП и запоминаются в ЦП функции μ , $K_2(x, t)$, σ из соотношений (5)–(7).

2. В АП из соотношений (3), (4) вычисляется начальное приближение функции $\psi_0(x)$ и запоминается в цифровом процессоре.

3. В АП вычисляются значения q и $N(x, t)$ из соотношений (9) и (10), которые затем запоминаются в ЦП. Индекс шага итерации $n = 0$.

4. Из соотношения (8) в АП вычисляется очередное приближение $\psi_{n+1}(x)$.

5. Из соотношения (2) в АП вычисляется $y_{n+1}(x)$.

6. В ЦП проверяется условие $\max |\psi_{n+1}(x) - \psi_n(x)| < \varepsilon_A$. Если оно не соблюдается, то значение n увеличивается на 1 и повторяются шаги 4, 5, 6 до тех пор, пока условие не будет соблюдено.

7. Если условие соблюдается, то индекс n увеличивается на единицу и в ЦП производятся два следующих итеративных шага вычисления $\psi(x)$ и $y(x)$ с высокой точностью. Вычисляется $\Delta\psi_{n+1}(x) = \psi_{n+1}(x) - \psi_n(x)$, умножается

на новый масштаб $M = \frac{|\psi_{n+1}(x)|}{\max |\Delta\psi_{n+1}(x)|}$. Индекс итерационного шага n увеличивается на 1.

8. В АП из соотношения (12) вычисляется очередное приращение $\Delta\psi_{n+1}(x)$.

9. В ЦП демасштабируется приращение $\Delta\psi_{n+1}(x)$ и реализуются соотношения (11) и (2).

10. В ЦП проверяется условие $\max |\Delta\psi_{n+1}(x)| < \frac{\epsilon_A}{M}$. Если оно не выполняется, то приращение $\Delta\psi_{n+1}(x)$ снова умножается на M , индекс n увеличивается на 1 и повторяются шаги 8, 9, 10 до тех пор, пока условие не будет соблюдено.

11. Если условие соблюдается, то проверяется, соответствует ли полученная точность заданной, если нет — то повторяются все шаги, начиная с шага 7, до тех пор, пока не будет получена заданная точность.

Метод средних. Метод применим при соблюдении следующего условия [3]: параметр $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_v - \lambda}{\lambda_v}$ не должен менять знака при изменении v от 1 до ∞ , где λ_v — характеристические числа ядра $K(x, t)$. Данный метод применяется, если итерационный процесс расходится, а также если параметр λ уравнения (1) близок к λ_1 . Решение уравнения (1) ищем в виде

$$y_n(x) = \alpha y_{n-1}(x) + \beta \left[f(x) + \lambda \int_a^b K(x, t) y_{n-1}(t) dt \right], \quad (13)$$

где $y_0(x) = 0$, $n = 1, 2, \dots$

Параметры α , β определяем из условий $\alpha + \beta = 1$, $\beta > 0$ при $\frac{\lambda_v - \lambda}{\lambda_v} > 0$, $\beta < 0$ при $\frac{\lambda_v - \lambda}{\lambda_v} < 0$ (14). Можно записать

$$y_{n+1}(x) = \alpha y_n(x) + \beta \left[f(x) + \lambda \int_a^b K(x, t) y_n(t) dt \right]; \quad (15)$$

$$y_n(x) = \alpha y_{n-1}(x) + \beta \left[f(x) + \lambda \int_a^b K(x, t) y_{n-1}(t) dt \right]. \quad (16)$$

Вычитая (16) из (15), получаем

$$y_{n+1}(x) - y_n(x) = \alpha [y_n(x) - y_{n-1}(x)] + \beta \lambda \left\{ \int_a^b K(x, t) [y_n(t) - y_{n-1}(t)] dt \right\}.$$

Но поскольку $\Delta y_{K+1}(x) = y_{K+1}(x) - y_K(x)$, имеем

$$\Delta y_{n+1}(x) = \alpha \Delta y_n(x) + \beta \lambda \int_a^b K(x, t) \Delta y_n(t) dt. \quad (17)$$

Кроме того, $y_{n+1}(x) = y_n(x) + \Delta y_{n+1}(x)$ (18).

Из соотношений (17), (18) видно, что для решения уравнения (1) на гибридной вычислительной системе методом средних можно применять метод слоя, который реализуется посредством следующего алгоритма:

1. Из условий (14) определяются параметры α и β , индекс $n = 1$, $y_0(x) = 0$.
2. В АП реализуется соотношение (13).

3. В ЦП проверяется условие $\max |y_n(x) - y_{n-1}(x)| \leq \epsilon_A$, и если оно не выполняется, то n увеличивается на 1 и повторяются шаги 2, 3 до выполнения условия.

4. В ЦП с высокой точностью реализуется соотношение (13) для итерационных шагов $n+1$ и $n+2$, вычисляется величина приращения $\Delta y_{n+2}(x) = y_{n+2}(x) - y_{n+1}(x)$ и умножается на масштаб $M = \frac{|y_{n+2}(x)|}{\max |\Delta y_{n+2}(x)|}$.

5. Индекс шага $n = n + 2$.

6. В АП реализуется соотношение (17).

7. В ЦП величина $\Delta y_{n+1}(x)$ демасштабируется и реализуется соотношение (18).

8. В ЦП проверяется условие $\max |\Delta y_{n+1}(x)| \leq \frac{\epsilon_A}{M}$, и если оно не выполняется, то $n = n + 1$, и повторяются шаги 6, 7, 8.

9. Если условие выполнено, то проверяется, соответствует ли полученная точность заданной точности решения. Если да — решение окончено, а если нет — повторяются все шаги, начиная с шага 4.

Результаты моделирования работы алгоритмов показали, что время решения интегральных уравнений при высокой точности определяется временем ЦП, затрачиваемым на два точных шага.

Список литературы: 1. *Верлань А. Ф., Сизиков В. С.* Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. Киев: Наук. думка, 1978.—292 с. 2. *Buli S. T., Janac K.* High Accurate Hybrid Solution of Integral Equations.—Simulation of Systems, Proceedings of the 8 th AICA Congress DELFT, Aug. 1976, p. 937—945. 3. *Витенберг И. М.* Программирование аналоговых вычислительных машин.—М.: Машиностроение, 1972.—407 с.

Поступила в редколлегию 17.03.81.

УДК 510.62

Е. В. БЫКОВА.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

При функционировании многих сложных систем важной задачей является контроль работы системы и возможность оценки качества ее функционирования. Назовем задачей состояние исследуемой системы, которое вызывает необходимость принятия решения, т. е. задача — это конфликтное состояние системы, и именно наличие конфликта и является побудительной причиной для управляющего воздействия на систему [1]. Оценивая качество функционирования системы, будем выявлять наличие конфликта в системе.

В диалоговой адаптивной системе принятия решений рассматривается, в частности, решение задач на модели проблемной среды [2] и под задачей $Z = \langle S_n, S_k, W, \zeta \rangle$ в этом случае понимаем следующее: заданы начальная ситуация S_n , конечная (целевая) ситуация S_k , ограничения или критерий W , которому должно

удовлетворять решение, а также набор операторов ζ . Необходимо определить такую совокупность операторов $\zeta^* \subseteq \zeta$, последовательное применение которых к S_n позволит получить вывод $S_n \rightarrow S_k$ при ограничениях W . Под решением задачи Z будем понимать набор $\langle C(Z), \text{«и»}, \text{«затем»}, \text{«или»} \rangle$, где $C(Z) = \{W, \zeta, S_k\}$ — множество подцелей, связанных с решением задачи, а «и», «затем», «или» — отношения, определяющие структуру взаимосвязей подцелей, аналогично языку ярусно-параллельных форм.

Модель оценки качества функционирования должна сформировать глобальную цель воздействий на сложную систему и множество подцелей, последовательное разрешение которых приведет к разрешению глобальной цели. Каждая такая подцель будет являться задачей в указанном выше смысле. Модель также должна проверять, не нарушаются ли в процессе решения задач ограничения, имеющиеся в системе.

Обычно оценку качества функционирования сложной системы осуществляет человек (или группа людей), но в условиях увеличения размерности системы и усложнения ее структуры эти функции контроля необходимо автоматизировать. При этом в ЭВМ должна быть заложена модель, входными параметрами которой будут данные о функционировании разных компонентов системы, а выходными параметрами — глобальная оценка качества функционирования в целом и множество подцелей, ведущих к разрешению глобальной цели.

В [3] отмечено, что сейчас имеются две тенденции в создании систем представления знаний. С одной стороны, развиваются универсальные средства представления знаний, которые могут быть использованы в любых системах искусственного интеллекта. Но, как отмечается в [3], они имеют пониженную эффективность. С другой стороны, появились системы представления знаний, ориентированные на конкретную предметную область. В этих системах создаются или используются только те семантические сети или фреймы и привязанные к ним процедуры, которые необходимы для заданной предметной области.

В статье рассматривается модель, настраиваемая на конкретную сложную систему посредством разработанных инвариантных процедур.

Известно, что основными моделями представления знаний сейчас являются семантические сети и сети фреймов, причем разница между этими двумя моделями в настоящее время в значительной мере стерлась в силу того, что любую семантическую сеть можно представить как сеть фреймов, и наоборот.

В настоящей статье представление знаний осуществляется с помощью семантических сетей в смысле [4].

Для оценки качества функционирования сложной системы существуют два этапа: 1) собственно оценка качества функционирования и 2) анализ функционирования. На первом этапе

строится модель структуры исследуемой сложной системы с использованием отношения «часть — целое» и отношений, вводящих различные показатели функционирования. Кроме того, так как качество функционирования — не постоянная величина и может изменяться со временем, предусматривается возможность описания динамики поведения системы с точки зрения изменения качества. Для этого вводятся отношения типа «раньше — затем» («в—з»), «быть временем t » («б вр t »), «быть одновременно» («б одн») и другие. Например,

$$\begin{aligned}
 &\langle \gamma_1 \sqsubset \text{б кл } x_{10,11} x_{10} \rangle && \langle \gamma_2 \sqsubset \text{б кл } x_{10,12} x_{10} \rangle \\
 &\langle \gamma_3 \sqsubset \text{б кл } x_{10,13} x_{10} \rangle && \langle \gamma_4 \sqsubset \text{б к } x_{10,21} x_{10} \rangle \\
 &\langle \gamma_5 \sqsubset \text{б к } x_{10,22} x_{10} \rangle && \langle \gamma_6 \sqsubset \text{б к } x_{10,23} x_{10} \rangle \\
 &\langle \sqsubset \sqsubset \text{в—з } \gamma_1 \gamma_2 \rangle && \langle \sqsubset \sqsubset \text{в—з } \gamma_2 \gamma_3 \rangle \\
 &\langle \sqsubset \sqsubset \text{в—з } \gamma_4 \gamma_5 \rangle && \langle \sqsubset \sqsubset \text{в—з } \gamma_5 \gamma_6 \rangle \\
 &\langle \sqsubset \sqsubset \text{б одн } \gamma_1 \gamma_4 \rangle && \langle \sqsubset \sqsubset \text{б одн } \gamma_2 \gamma_5 \rangle \\
 &\langle \sqsubset \sqsubset \text{б одн } \gamma_3 \gamma_6 \rangle,
 \end{aligned}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$ — имена ситуаций; x_{10} — вершина с показателями функционирования $x_{10,1}$ и $x_{10,2}$; $x_{10,11}, x_{10,12}, x_{10,13}$ — значения показателя $x_{10,1}$ в моменты времени t_1, t_2, t_3 ; «б кл» — отношение, вводящее показатель функционирования «количество»; «б к» — отношение, вводящее показатель функционирования «качество» для вершины x_{10} .

В модели имеется также набор продукций вида $S_1 \rightarrow S_2$, где S_1 и S_2 — семантические сети, описывающие определенные ситуации. Эти продукции строятся с учетом опыта экспертов, в них учитывается взаимодействие различных параметров. Продукции предусматривают обработку динамических цепочек событий и строятся с учетом многокритериального характера задачи. Применение продукций осуществляется следующим образом: фрагмент S_1 отождествляется с некоторым фрагментом семантической сети модели системы, на место вершин-показателей качества в S_1 подставляются конкретные значения из модели. По ним вычисляется значение параметров в S_2 и на место фрагмента S_1 , который удаляется, помещается фрагмент S_2 . Продукции изменяются последовательно к соответствующим вершинам модели. Таким образом, происходит сверка всех показателей с низших уровней до верхних для получения некоторого обобщенного показателя качества функционирования. Для приведенного выше примера одна из продукций имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \gamma_j \sqsubset \text{б кл } x_{10,1} x_{10} \rangle \\ \langle \gamma_{j+1} \sqsubset \text{б кл } x_{10,1} x_{10} \rangle \\ \langle \sqsubset \sqsubset \text{в—з } \gamma_j \gamma_{j+1} \rangle \end{array} \right\} \rightarrow \{ \langle \gamma_{j+1} \sqsubset \text{б кл } x_{10,1} x_{10} \rangle \},$$

где γ_i, γ_{i+1} — имена ситуаций; $x_{10,1}[\eta], x_{10,1}[\eta+1]$ — значения показателя $x_{10,1}$ в моменты времени t_i, t_{i+1} .

В продукциях, наряду с количественными оценками, могут использоваться и качественные, это осуществляется введением лингвистической переменной «качество функционирования» = {хорошее, плохое, довольно хорошее}. Порядок применения продукций к обрабатываемой вершине произволен, так как если порядок важен, то это закладывается в продукции путем введения дополнительных отношений.

Получив на верхнем уровне некоторую оценку V качества функционирования исследуемой системы, сравним V с порогом Δ «хорошей» на этом уровне работоспособности системы.

Если $\Delta \leq V$, то качество оценивается положительно, если $\Delta > V$, то формируется глобальная цель управляющих воздействий на систему, чтобы перевести ее в нужный режим функционирования с качеством Δ :

$$\langle \gamma_k \sqcup \text{б обк } V x_1 \rangle \rightarrow \langle \gamma_p \sqcup \text{б обк } \Delta x_1 \rangle,$$

где γ_k, γ_p — имена ситуаций; x_1 — вершина с обобщенным показателем функционирования; V — значение обобщенного показателя, полученное в результате свертки модели; Δ — заданное значение обобщенного показателя; б обк — отношение «быть обобщенным качеством функционирования».

Затем осуществляется процесс прохождения вниз по модели для нахождения тех вершин, которые привели к образованию оценки V , т. е. выявляются те места, где система вышла из области «хорошей» работоспособности. Обнаружив нужную вершину и учитывая характер продукций, можно детализировать процесс устранения конфликта. Таким образом, будет сформировано множество подцелей; последовательное разрешение которых приведет к разрешению глобальной цели.

Например, одна из подцелей этого множества будет следующей:

$$\gamma_l \sqcup \text{б к кл } x_{10,3} x_{10} \rangle \rightarrow \langle \gamma_m \sqcup \text{б к кл } \tilde{X}_{10,3} x_{10} \rangle,$$

где γ_l, γ_m — имена ситуаций; «б к кл» — отношение, вводящее некоторый показатель функционирования $x_{10,3}$ для x_{10} .

Δ может меняться в зависимости от разных причин [5], так что это изменение влечет за собой образование иной глобальной цели воздействий на систему и вместе с тем другого множества подцелей.

На втором этапе осуществляется процесс выделения оптимального множества подцелей с учетом их влияния друг на друга. Для этого в диалоговом режиме модель структуры сложной системы пополняется новыми отношениями, существующими в реальной системе, и применяется другой набор продукций, отражающих взаимосвязи различных элементов системы.

После этого мы можем применить специальный «Решатель задач» [6], который, используя имеющиеся в нем трансформационные подстановки, построит решение задачи.

Рассмотрим вопрос построения набора продукций вида $S_i \rightarrow S_j$, в которых накапливается опыт экспертов. Сразу необходимо отметить, что в системе должна быть возможность расширения этого набора.

Пусть имеется некоторая задача принятия группового решения. Зададим ее в виде набора $\langle SIT, N, X, \{>_{i \in N}\} \rangle$, где SIT — описание некоторой задачи (ситуации) в виде семантической сети; N — множество экспертов; X — множество возможных решений; $>_i$ — предпочтение i -го эксперта на множестве X .

Построим групповые предпочтения $>_N$ на $X: SIT \rightarrow X_{>_N}$, $X_{>_N}$ имеет следующий вид: $[\delta_1(p_1), \dots, \delta_M(p_M)]$ (M — число альтернатив); $\delta_i(p_i) = U_i \vee \Phi$, где U_i — описание решения в виде семантической сети; Φ — неопределенная ситуация; $p_i = \frac{\Sigma}{N} \cdot 100\%$.

Здесь Σ — число экспертов, поставивших U_i на i -е место.

Выделим из этого упорядоченного множества некоторую часть, назовем ее оптимальными альтернативами. Получим множество $\{SIT_i \rightarrow \psi(X_i)\}$. Будем обращаться к экспертам лишь в том случае, если накопленный опыт недостаточен.

Теперь возникает новая задача принятия решения $G(X) = \langle T, X \rangle$, где T — описание задачи в виде семантической сети; X — возможные альтернативы. Будем строить отображения φ , которое каждому G поставит в соответствие множество оптимальных альтернатив $\varphi(G) \in X$.

Во-первых, проверим, нет ли похожих задач в системе. Для этого определенным образом разработана семантическая метрика, которая в режиме распознавания сравнивает G с каждой ситуацией из SIT_1, \dots, SIT_k и формирует оценку близости $\mu_i (i = \overline{1, k})$. Выбираем наиболее близкую к G ситуацию — пусть это будет SIT_i — и сравниваем ее с заданным порогом распознавания α . Если $\mu_i < \alpha$, то необходимо обратиться к экспертам, так как это неизвестная ситуация. В случае отождествления G и SIT_i строим $\varphi(G): G \rightarrow \psi(X_i)$.

Если $\mu_i \geq \alpha$, то на основе имеющихся продукций строятся новые по введенным правилам, например таким.

1. Если для $G = \langle T, X \rangle$ и $SIT_i = \langle SIT_i, X_i \rangle$ выполняется условие $X \subset X_i$ и $X \cap \psi(X_i) \neq \emptyset$, то $\varphi(G) = X \cap \psi(X_i)$.

2. Если для $G = \langle T, X \rangle$ и $SIT_i = \langle SIT_i, X_i \rangle$ выполняются условия $X \cap X_i \neq \emptyset$, $X \subset X_i$, но $X' = X \cap X_i \subset X_i$ и $X' \cap \psi(X_i) \neq \emptyset$, то $\varphi(G) = X' \cap \psi(X_i)$.

Хотя при этом возможна потеря некоторой части информации, но тем не менее без экспертов формулируются некоторые оптимальные альтернативы. Таким образом, будем расширять исходное, полученное с помощью экспертов, множество продукций.

В заключение отметим, что для машинного представления модели оценки качества функционирования сложной системы был использован реляционный подход, основанный на аппарате n -арных отношений. В некоторых работах (например, [2]) обосновывается удобство использования бинарных отношений. Хотя бинарные отношения и обеспечивают гибкость базы данных и минимальное время обслуживания некоторого класса задач, однако структура базы данных может быть еще более эффективной при введении удачно подобранных n -арных отношений.

Список литературы: 1. *Быкова Е. В., Сумароков Л. Н.* Информационный подход к изучению управленческих ситуаций в экономических системах.— ВИНТИ, НТИ, № 2, сер. 1, М., 1976, с. 3—5. 2. *Фазылов Н. М.* Решение задач с помощью многоуровневой модели.— В кн.: Вопросы кибернетики. Человеко-машинные обучающие системы.— М., Изд. АН СССР, 1979, с. 122—128. 3. *Кузин Л. Т.* Особенности систем представления знаний.— В кн.: Материалы семинара «Представление знаний в системах искусственного интеллекта».— М.: МДНТП, 1980, с. 3—7. 4. *Кузнецов И. П.* Механизмы обработки семантической информации.— М.: Наука, 1978.— 176 с. 5. *Растрингин Л. А.* Современные принципы управления сложным объектом.— М.: Сов. радио, 1980.— 232 с. 6. *Быкова Е. В., Кропова В. В., Фазылов Н. М.* Использование субъективных оценок при формировании стратегий поведения. Тез. докл. Всесоюз. науч. семинара: «Модели выбора альтернатив в нечетной среде».— Рига, 1980, с. 70—72.

Поступила в редколлегию 05.02.81.

УДК 631.3.01

В. Е. ЯРУШЕК, д-р техн. наук

О ФОРМАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Один из возможных подходов к задаче автоматического планирования целенаправленных действий сложных систем состоит в задании аксиоматической теории среды, сформулированной на некотором формализованном языке, и последующем применении процедуры автоматического доказательства теорем для вывода последовательности действий, обеспечивающей достижение поставленной цели [1, 2]. В случае применения для решения этой задачи аппарата исчисления предикатов первого порядка возникает ряд трудностей, связанных с необходимостью описания причинно-следственных зависимостей между явлениями внешней среды, а также изменений в состоянии среды, обусловленных как функционированием управляемых объектов, так и внешними причинами. Для преодоления этих трудностей предлагается проблемно-ориентированный язык, основанный на языке много-сортного исчисления предикатов первого порядка, дополненном вводимыми по определению операторами, эквивалентными по своим свойствам операторам модальной и временной логики.

Основные определения и аксиомы. Предположим, что состояния и отношения объектов внешней среды описываются посредством открытых или замкнутых формул на языке много-сортного исчисления предикатов первого порядка, обозначаемых p, q . Значение истинности всякой такой формулы зависит от сложившейся ситуации α и момента времени t . В связи с этим $p(\alpha, t)$ обозначает значение истинности формулы p в ситуации α в момент времени t .

Для описания возможностей системы по изменению состояния среды введем модальные операторы возможности:

$$01. M\uparrow p \equiv D_f \exists \alpha \exists t [C(\alpha_0, \alpha, t_0, t) \wedge p(\alpha, t)]$$

и необходимости;

$$02. L\uparrow p \equiv \sim M\uparrow \sim p \equiv D_f \forall \alpha \forall t [C(\alpha_0, \alpha, t_0, t) \rightarrow p(\alpha, t)],$$

где $C(\alpha_0, \alpha, t_0, t)$ — вспомогательный предикат, принимающий значение «истина», если система располагает действиями, позволяющими из начальной ситуации α_0 в момент времени t_0 перейти к ситуации α в момент времени t .

Определим также двойственные операторы, позволяющие описывать возможные исходные ситуации, предшествующие переходу в данную ситуацию α_0 :

$$03. M\downarrow p \equiv D_f \exists \alpha \exists t [C(\alpha, \alpha_0, t, t_0) \wedge p(\alpha, t)];$$

$$04. L\downarrow p \equiv \sim M\downarrow \sim p \equiv D_f \forall \alpha \forall t [C(\alpha, \alpha_0, t, t_0) \rightarrow p(\alpha, t)].$$

Из физических соображений примем, что предикат $C(\alpha, \beta, t_1, t_2)$ обладает следующими свойствами, описываемыми аксиоматически:

$$AC1. \forall \alpha \forall t C(\alpha, \alpha, t, t);$$

$$AC2. \forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [C(\alpha, \beta, t_1, t_2) \rightarrow (t_2 \geq t_1)];$$

$$AC3. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [C(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \wedge C(\gamma, \beta, t_3, t_2) \rightarrow C(\alpha, \beta, t_1, t_2)];$$

$$AC4. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [C(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge C(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \rightarrow (C(\beta, \gamma, t_1, t_3) \vee C(\gamma, \beta, t_3, t_2))];$$

$$AC5. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [C(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge C(\gamma, \beta, t_3, t_2) \rightarrow (C(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \vee C(\gamma, \alpha, t_3, t_1))];$$

$$AC6. \forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [C(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge (t_1 \equiv t_2) \rightarrow (\alpha \equiv \beta)].$$

Из сформулированных определений и аксиом в соответствии с правилами вывода и аксиомами исчисления предикатов с равенством можно вывести формулы

$$M1. L\uparrow p \rightarrow p;$$

$$M2. L\uparrow(p \rightarrow q) \rightarrow (L\uparrow p \rightarrow L\uparrow q);$$

$$M3. L\uparrow p \rightarrow L\uparrow L\uparrow p;$$

$$M4. L\uparrow L\downarrow p \leftrightarrow L\downarrow L\uparrow p;$$

$$M5. M\downarrow L\uparrow p \rightarrow p;$$

$$M6. M\uparrow p \wedge M\uparrow q \rightarrow M\uparrow(p \wedge M\uparrow q) \vee M\uparrow(q \wedge M\uparrow p);$$

$$M7. M\uparrow L\uparrow p \rightarrow L\uparrow M\uparrow q.$$

Наряду с приведенными выводимы также двойственные формулы, полученные путем замены у операторов всех знаков \uparrow на \downarrow , и наоборот.

Если присоединить M1—M7 к аксиомам исчисления высказываний, дополнив правилом R1: $\vdash A \rightarrow \vdash LA$, где \vdash обозначает выводимость, а L — оператор «для всех ситуаций и для всех моментов времени в прошлом и будущем», соответствующий кванторам $\forall \alpha_0 \forall t_0$, то получим некоторую модальную логику, включающую в себя систему S4 Льюиса (аксиомы M1—M3) [3]. Эта система содержит 10 типов несводимых операторов: $M\uparrow, L\uparrow, M\uparrow L\uparrow, L\uparrow M\uparrow, M\downarrow, L\downarrow, M\downarrow L\downarrow, L\downarrow M\downarrow, M\uparrow M\downarrow, L\uparrow L\downarrow$ (см. таблицу).

Введем по определению временные операторы:

$$05. M_{\uparrow} p \equiv D_f \exists \alpha \exists t [R(\alpha_0, \alpha, t_0, t) \wedge (t > t_0) \wedge p(\alpha, t)];$$

$$06. L_{\uparrow} p \equiv \sim M_{\uparrow} \sim p \equiv D_f \forall \alpha \forall t [R(\alpha_0, \alpha, t_0, t) \wedge (t > t_0) \rightarrow p(\alpha, t)];$$

$$07. M_{\downarrow} p \equiv D_f \exists \alpha \exists t [R(\alpha, \alpha_0, t, t_0) \wedge (t < t_0) \wedge p(\alpha, t)];$$

$$08. L_{\downarrow} p \equiv \sim M_{\downarrow} \sim p \equiv D_f \forall \alpha \forall t [R(\alpha, \alpha_0, t, t_0) \wedge (t < t_0) \rightarrow p(\alpha, t)],$$

где предикат $R(\alpha, \beta, t_1, t_2)$ принимает значение «истина», если переход из ситуации α в момент времени t_1 в ситуацию β в момент времени t_2 осуществился в прошлом или планируется (прогнозируется) в будущем.

Будем считать, что множество моментов времени линейно упорядочено, время безгранично делимо (всюду плотно) и не ограничено сверху и снизу:

$$AT1. \forall t_1, t_2 [(t_1 > t_2) \vee (t_2 > t_1) \vee (t_2 = t_1)];$$

$$AT2. \forall t_1, t_2 \exists t_3 [(t_2 > t_1) \rightarrow (t_2 > t_3) \wedge (t_3 > t_1)];$$

$$AT3. \forall t_1, t_2 \exists t_3 [(t_3 > t_1) \wedge (t_3 > t_2)];$$

$$AT4. \forall t_1, t_2 \exists t_3 [(t_3 < t_1) \wedge (t_3 < t_2)].$$

Дополнительно к этим аксиомам будем считать заданными аксиомы, описывающие свойства отношений строгого и нестрогого порядка, а также равенства.

Определим аксиоматически свойства предиката $R(\alpha, \beta, t_1, t_2)$:

$$AR1. \forall \alpha, \forall t R(\alpha, \alpha, t, t);$$

$$AR2. \forall t \exists \alpha [(t \geq t_0) \rightarrow R(\alpha_0, \alpha, t_0, t)];$$

$$AR3. \forall t \exists \alpha [(t \leq t_0) \rightarrow R(\alpha, \alpha_0, t, t_0)];$$

$$AR4. \forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \rightarrow (t_2 \geq t_1)];$$

$$AR5. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge R(\beta, \gamma, t_2, t_3) \rightarrow R(\alpha, \gamma, t_1, t_3)];$$

$$AR6. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge R(\gamma, \beta, t_3, t_2) \rightarrow (R(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \vee R(\gamma, \alpha, t_3, t_1))];$$

$$AR7. \forall \alpha, \beta, \gamma \forall t_1, t_2, t_3 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge R(\gamma, \beta, t_3, t_2) \rightarrow (R(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \vee R(\gamma, \alpha, t_3, t_1))];$$

$$AR8. \forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge (t_1 = t_2) \rightarrow (\alpha \equiv \beta)].$$

Присоединив приведенные аксиомы к аксиомам исчисления предикатов с равенством, можно вывести формулы:

$$T1. L_{\uparrow} p \rightarrow M_{\uparrow} p;$$

$$T2. L_{\uparrow} (p \rightarrow q) \rightarrow (L_{\uparrow} p \rightarrow L_{\uparrow} q);$$

$$T3. M_{\uparrow} L_{\uparrow} p \rightarrow L_{\uparrow} M_{\uparrow} p;$$

$$T4. L_{\uparrow} L_{\uparrow} p \leftrightarrow L_{\uparrow} p;$$

$$T5. L_{\uparrow} L_{\downarrow} p \leftrightarrow p \wedge L_{\uparrow} p \wedge L_{\downarrow} p;$$

$$T6. M_{\downarrow} L_{\uparrow} p \rightarrow p;$$

$$T7. M_{\uparrow} p \wedge M_{\downarrow} q \rightarrow [M_{\uparrow} (p \wedge M_{\downarrow} q) \vee M_{\uparrow} (q \wedge M_{\downarrow} p) \vee M_{\uparrow} (p \wedge q)],$$

а также двойственные им, получаемые одновременной заменой всех знаков \uparrow на \downarrow , и наоборот.

Полученные аксиомы в сочетании с аксиомами исчисления высказываний и правилом вывода $R1$ описывают временную логику, включающую в себя известную систему (аксиомы T1—T6) [4]. Временная логика включает 14 типов операторов: M_{\uparrow} , L_{\uparrow} ,

$M_t \uparrow L_t \uparrow, L_t \uparrow M_t \uparrow, M_t \downarrow, L_t \downarrow, M_t \downarrow L_t \downarrow, L_t \downarrow M_t \downarrow, M_t \uparrow M_t \downarrow, L_t \uparrow L_t \downarrow, M_t \uparrow L_t \downarrow, L_t \uparrow M_t \downarrow, M_t \downarrow L_t \uparrow, L_t \downarrow M_t \uparrow.$

Взаимосвязь введенных операторов возможности и необходимости с временными операторами вытекает из следующих аксиом:

ACR1. $\forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \rightarrow C(\alpha, \beta, t_1, t_2)];$

ACR2. $\forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge C(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \rightarrow (R(\gamma, \beta, t_3, t_2) \vee C(\beta, \gamma, t_2, t_3))];$

ACR3. $\forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge C(\gamma, \beta, t_3, t_2) \rightarrow (R(\alpha, \gamma, t_1, t_3) \vee C(\gamma, \alpha, t_3, t_1))];$

ACR4. $\forall \alpha, \beta \forall t_1, t_2 [R(\alpha, \beta, t_1, t_2) \wedge C(\alpha, \gamma, t_1, t_2) \rightarrow (\beta \equiv \gamma)]$

и выражается выводимыми формулами

MT1. $L_t \uparrow p \rightarrow L_t \uparrow p;$

MT2. $M_t \uparrow L_t \uparrow p \rightarrow L_t \uparrow M_t \uparrow p;$

MT3. $L_t \uparrow L_t \uparrow p \leftrightarrow L_t \uparrow L_t \uparrow p;$

MT4. $L_t \uparrow L_t \downarrow p \leftrightarrow L_t \downarrow L_t \uparrow p;$

MT5. $M_t \downarrow L_t \uparrow p \rightarrow L_t \uparrow p;$

MT6. $M_t \uparrow p \wedge M_t \uparrow q \rightarrow M_t \uparrow (p \wedge M_t \uparrow q) \vee M_t \uparrow (q \wedge M_t \uparrow p),$

а также двойственными им.

Из таблицы, описывающей правила сведения кратных операторов, следует возможность образования смешанных модально-временных операторов типа $M_t \downarrow L_t \uparrow, L_t \downarrow M_t \uparrow$ и т. п. Правила сведения справедливы и для двойственных формул.

Схема импликаций между модальными, временными и смешанными операторами приведена на рис. 1.

Применение для планирования действий управляющей системы.

Пусть формулы $d_i (i = 1, 2, \dots, n)$ на языке многосортного исчисления предикатов первого порядка описывают состояния и отношения объектов внешней среды, соответствующие выполнению системой некоторых действий. Каждое действие характеризуется достаточными условиями его выполнения, описываемыми формулой u_i и определенным результатом. Введенные модальные операторы позволяют описать достаточные условия действия выражением $L(u_i \rightarrow O d_i)$, где O — модальный оператор вида $M_t \uparrow, L_t \uparrow M_t \uparrow, L_t \uparrow M_t \uparrow$, в зависимости от того, имеется ли возможность выполнения действия в момент выполнения условия через некоторое время после его выполнения или эта возможность сохраняется в будущем независимо от действий системы.

Результат действия описывается формулами

$$L[(d_i \wedge a_1) \rightarrow Tr_{i1}];$$

$$L[(d_i \wedge a_2) \rightarrow Tr_{i2}];$$

$$L[(d_i \wedge a_m) \rightarrow Tr_{im}].$$

Здесь a_j — формула, описывающая дополнительные условия, при которых выполняется действие; r_{ij} — формула, выражающая состояния и отношения объектов внешней среды после выполнения

действия; T — временной оператор вида $M \uparrow$, $L \uparrow$, $M \uparrow L \uparrow$, $L \uparrow M \uparrow$ в зависимости от момента времени появления, длительности существования или повторяемости результата.

Использование модальных и временных операторов позволяет разрешить известную «проблему рамок», поскольку имеется возможность выразить факт сохранения результата независимо от действий системы или описать условия, при которых этот результат сохраняется.

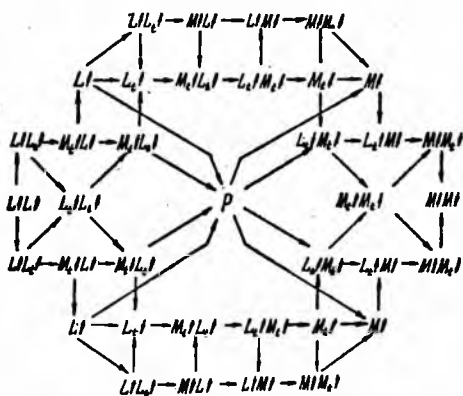


Рис. 1

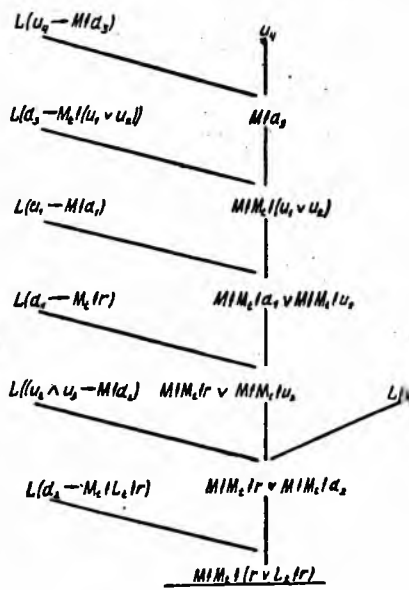


Рис. 2

Порядок вывода плана действий рассмотрим на простейшем примере. Пусть имеется система аксиом, описывающих возможные действия системы и состояние среды:

$L(u_1 \rightarrow M \uparrow d_1)$; $L(d_1 \rightarrow M \uparrow r)$; $L((u_2 \wedge u_3) \rightarrow M \uparrow d_2)$;
 $L(d_2 \rightarrow M \uparrow L \uparrow r)$; $L(u_4 \rightarrow M \uparrow d_3)$; $L(d_3 \rightarrow M \uparrow (u_1 \vee u_2))$; u_4 ; $L \uparrow u_3$,
 и требуется получить результат, выражаемый формулой r .

Схема вывода возможности получения результата приведена на рис. 2. Из этой схемы можно извлечь требуемую программу действий, которая является разветвленной в связи с неопределенным исходом действия d_3 .

Практически аксиомы, описывающие действия и состояния объектов среды, должны быть в соответствии с определениями операторов переведены на язык исчисления предикатов и использоваться совместно с аксиомами, выражающими свойства времени и предикатов $C(\alpha, \beta, t_1, t_2)$, $R(\alpha, \beta, t_1, t_2)$ процедурой автоматического доказательства теорем для извлечения ответа на вопрос $M \uparrow r$. Для определения требуемой последовательности действий после вывода ответа на вопрос необходима специальная программа.

Предложенный проблемно-ориентированный язык может использоваться в вопросно-ответных системах, предназначенных для использования в АСУ [5], а также в системах управления роботами.

Список литературы: 1. *Интегральные роботы*. Сб. статей, вып. 1,2.— М.: Мир, 1973, 1975.— 421—528 с. 2. *Попов Э. В., Фирдман Г. Р.* Алгоритмические основы интегральных роботов и искусственного интеллекта.— М.: Наука, 1976.— 455 с. 3. *Фейс Р.* Модальная логика.— М.: Мир, 1974.— 520 с. 4. *Ивин А. А.* Логика времени.— В кн.: Неклассическая логика.— М.: Наука, 1970, с. 124—190. 5. *Ярушек В. Е., Багаев А. П., Рось А. А.* О построении вопросно-ответных систем для АСУ.— АСУ и приборы автоматики, 1980, вып. 54, с. 103—112.

Поступила в редколлегию 25.02.81.

УДК 510.62

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, С. И. МАЛЕНЧЕНКО

О ВВЕДЕНИИ БУКВЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ РУССКИХ СЛОВ

Для того чтобы получить возможность моделирования морфологии русского языка на базе формального аппарата теории интеллекта [1, 2], необходимо прежде научиться записывать русские слова в виде уравнений алгебры конечных предикатов. Это, в свою очередь, требует введения набора буквенных переменных, принимающих в качестве своих значений различные русские слова. Наиболее простой способ введения искомого набора состоит в следующем. Вводится набор переменных $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, каждая из которых задана на русском алфавите. Число n выбираем с таким расчетом, чтобы оно совпало с числом букв самого длинного слова, указанного в орфографическом словаре русского языка.

Для математической записи какого-нибудь слова, например *стол*, полагаем $x_1 = с$, $x_2 = т$, $x_3 = о$, $x_4 = л$, $x_5 \div x_n = -$, где $-$ знак пробела. Описанный способ математической записи слов прост, однако он имеет существенный недостаток. Дело в том, что при такой записи полностью игнорируется внутренняя структура русских слов. Как известно, слово членится на отдельные морфы, например, *пере-дел-ыва-ть*, в роли которых выступают префиксы, корни, суффиксы и флексии. При описанном способе формального представления слов однотипные морфы окажутся на разных местах (например, корень *дел-* в словах *переделывать* и *деловой*), а это в конечном итоге чрезвычайно усложнит и затруднит математическое моделирование морфологии русского языка.

Представляется гораздо более логичным поступить иначе: предусмотреть последовательность наборов переменных

$\langle x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n} \rangle, \langle x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n} \rangle, \dots, \langle x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn} \rangle$

с тем, чтобы каждым набором представлять тот или иной морф слова. В данной статье рассматривается вопрос о представлении подобным способом суффиксов и флексий. Представление префиксов и корней здесь не затрагивается. Прежде всего необходимо решить вопрос о выборе чисел m и n . Число n определяется максимальной длиной суффикса или окончания. Суффиксы и флексии берем из перечней, указанных в книге [3, с. 755—760]. Самое длинное окончание имеет 3 буквы (например, *-ами*), самый длинный суффикс имеет 8 букв (*-истическ-*). Наибольшее число суффиксов в слове — пять (например, *веро-ят-н-ост-н-ый*), окончаний — одно. Таким образом, можно принять $n=8, m=6$. Под числом m понимаем число букв в слове после его корня, причем имеются в виду только слова с одним корнем.

Теперь необходимо рациональным способом расположить буквы отдельно взятого i -го морфа в последовательности $\langle x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in} \rangle$. Если нумеровать буквы морфа просто слева направо, то немедленно обнаруживается, что однотипные части морфа оказываются на различных местах (например, часть *ов* в морфах *ов, ова, ствова, изирова, овь, овск, овит*). Это свидетельствует о том, что отдельно взятый морф, как и все слово в целом, имеет свою собственную структуру, которую мы пока что не учли. Вскрывшееся обстоятельство вынуждает продолжить дробление слова и ввести понятие о части слова более мелкой, чем морф, но более крупной, чем отдельная буква слова. Назовем такие части морфа морфоидами (морфоподобными частями слова). Будем считать, что если морфоид содержит гласную букву, то она всегда стоит в нем на первом месте. Далее полагаем, что любой морфоид содержит не более одной гласной буквы. Однако мы будем допускать морфоиды, вообще не содержащие ни одной гласной буквы. Такие морфоиды могут получаться, например, в результате выпадения беглой гласной буквы.

При членении морфа на морфоиды полезно ввести понятие морфемоида, играющего такую же роль по отношению к морфоиду, как и морфема к морфу. Известно, что в морфемах наблюдается беглость гласных и чередование согласных. В связи с этим появляются различные графические варианты морфоида. *Морфемоидом* назовем совокупность всех возможных вариантов морфоида. Полагаем, что для записи отдельно взятого морфоида достаточно набора (x_1, x_2, x_3) , составленного из трех буквенных переменных. Первая переменная морфоида — гласная буква, если же гласная буква в морфоиде отсутствует, то в этом случае полагаем $x_1 = -$. Вторая и третья переменные

x_2 и x_3 используются для букв, следующих за гласной буквой. Это — согласные буквы, полугласная буква й и мягкий знак ь. Букву x_1 назовем *левой частью* морфоида, набор букв $\langle x_2, x_3 \rangle$ — его *правой частью*. Букву x_2 назовем *основной буквой* правой части морфоида, букву x_3 — *дополнительной*.

К числу морфоидов причисляем прежде всего все двухбуквенные суффиксальные и флексийные морфы, имеющие структуру \langle гласная, согласная \rangle , или \langle гласная, й \rangle . К ним относятся следующие морфы: об, ав, ев, ёв, ив, ов, аг, уг, ыг, ад, аж, ёж, из, оз, ой, ей, ёй, ий, ой, ый, ак, ик, ок, ук, ык, юк, як, ал, ёл, ол, ул, ам, ем, ём, им, ом, ум, ым, ям, ан, ен, ён, ин, он, ун, ар, ер, ир, ор, ур, яр, ас, ис, ус, ат, ет, ёт, ит, от, ут, ют, ят, ах, ех, ёх, их, ох, ух, ых, ях, ец, иц, аг, иг, уг, ыг, аш, иш, ош, уш, ыш, ащ, ищ, ущ. Первую букву этих морфов принимаем за x_1 , вторую — за x_2 , в качестве значения третьей буквы x_3 принимаем знак пробела —. К числу морфоидов причисляем также все трехбуквенные морфы, имеющие структуру \langle гласная, согласная, ь \rangle . К ним относятся морфы овь, ядь, ёжь, аль, ель, оль, ыль, ень, ынь, арь, ырь, оть, ешь, ёшь, ишь. Морфоидами считаем все однобуквенные и двухбуквенные морфы следующих структур \langle гласная \rangle , \langle согласная \rangle , \langle согласная, ь \rangle : а, б, в, д, е, ё, и, к, л, ль, н, нь, о, с, т, ть, у, х, ц, ч, щ, ы, ю, я. Здесь гласную берем в качестве значения первой буквы x_1 , согласную — в качестве второй буквы x_2 , мягкий знак — в качестве третьей буквы x_3 .

Остальные морфы расщепляем на морфоиды по следующему принципу: выделяем в них, где это возможно, части вида \langle гласная, согласная \rangle , \langle гласная, согласная, ь \rangle или \langle гласная, й \rangle , например: ив-а, ов-а, ств-ов-а, из-ов-а. Если произведенное деление подтверждается наличием разветвления слов в этом месте при словообразовании, то выделенные части морфа принимаем за морфоиды. Например, для морфа ив-а имеем следующую разветвления: разбив $\begin{cases} \text{ание} \\ \text{ка} \end{cases}$, следовательно *ив*

принимаем за морфоид. Части морфа, полученные таким способом, считаем морфоидами только в тех случаях, когда они подходят хотя бы под одну из схем морфоидов, описанных выше, т. е. под схемы \langle гласная, согласная \rangle , \langle гласная, й \rangle , \langle гласная \rangle \langle согласная \rangle , \langle согласная, ь \rangle .

Таким путем получаем следующие новые морфоиды: аб, еб, иб, яв, ж, яж, ез, ей, ен, ел, уль, онь, ень, ес, ыть, ац, еч, оч, ёш, юш, ош, юш. Некоторые части морфов из числа полученных таким способом не подходят ни под одну из схем. Мы их расчленим на морфоиды следующим образом: с-т, ес-т, чл, инс, ург, о-ид, ар-ад, ар-н, ат-н, ль-н, ист, ль-щ, л-к, ер-к, ур-к, ек, в-ск, л-ез-ск, эз-ск, й-ск, н-ск., к-а, к-и, ш-к, изм, и-ан, л-ан, м-ан, м-ен, см-ен, з-нь, с-н, с-нь, ш-н, ль-н, -аль-н, и-ян, анс, есс, евт, м-ент, ан-ент, ем-ент, и-от, аст, ос-ть, вш-и, ог-о. В ре-

			е	ё	и	о	у	ы	э	ю	я
		а	е	ё	и	о	у	ы		ю	я
б	б	аб	еб		иб	об					
в	в вш	ав	ев евт	ёв	ив	ов овь					яз
г		аг				ог	уг	ыг			
д	д	ад			ид						ядь
ж	ж	аж	еж	ёж ежь							язь
з	з		ез		яз изн	оз			эз		
й	й	ай	ей	ёй	ий	ой	уй	ый			йя
к	к	ак	ек		ик	ок	ук	ык		юк	як
л	л ль	ал аль	ел ель	ёл		ол оль	ул уль	ыль			
м		ам	ем	ём	им	ом	ум	ым			ям
н	н нь	ан анс	ен ень ент	ён	ин инг	он онь	ун	ынь			ян
р		ар арь	ер		ир	ор	ур ург	ырь			яр
с	с ск ст	ас аст	ес есс		ис ист		ус				
т	т ть ть	ат	ет	ёт	ит	от оть	ут	ыть		ют	ят
х	х	ах	ех	ёх	их	ох	ух	ых			ях
ц	ц	ац	ец		иц						
ч	ч	ач	еч		ич	оч	уч	ыч			
ш	ш	аш	еш ешь	ёш ешь	иш ишь	ош	уш	ыш		юш	
щ	щ	ащ			ищ	ощ	ущ			ющ	

в результате получаем следующие новые морфоиды: тв, инг, ург, ид, ист, ск, эз, й, изм, з, ст, анс, есс, евт, ент, аст, ог.

Полный перечень всех выделенных морфоидов приведен в таблице. Пользуясь этой таблицей, легко произвести однозначную разбивку послекоренной части любого слова на морфоиды. Система правил, управляющая разбивкой, следующая: 1) производим членение перед каждой гласной буквой слова; 2) вычлениаем вхождения буквосочетания *тв*; 3) если перед *к* стоит согласная (кроме *с*), производим перед *к* членение; 4) если перед *ск* стоит согласная, производим перед *ск* членение; 5) если перед *н* стоит согласная, производим перед *н* членение; 6) в последовательности букв, включающей буквосочетание *ств*, вводим членение после *с*. Приводим примеры разбивки послекоренной части слова на морфоиды согласно этой системе правил: аккурат-н-ень-к-ий, хвощ-ев-ид-н-ый, мобил-из-ов-ан-н-ый, соц-и-ал-ист-ич-еск-ий, так-ов-ск-ий, вид-им-ос-ть.

В результате подобной разбивки предельное число морфоидов достигает восьми, что лишь немногим больше, чем предельное число морфов (6). В связи с этим представляется неэкономным вводить наборы переменных для морфов, более целесообразно проводить формальную запись слова, расчлененного на морфоиды. В этом случае достаточно ввести 8 трехбуквенных наборов переменных. Таким образом, для записи послекоренной части слова (имеются в виду слова с одним корнем) всего требуется $m \cdot n = 8 \times 3 = 24$ буквенных переменных.

В заключение перечислим некоторые из задач, ждущих решения и являющихся естественным продолжением этой работы: инвентаризация морфоидов префиксальных и корневых морфов; разработка системы правил, управляющей процессом членения префиксальной и корневой части слова на морфоиды; математическое описание процесса членения слова на морфоиды; формирование системы семантических признаков, управляющих синтезом морфов; формирование морфемоидов (системы родственных морфоидов) для каждого морфоида; изучение и математическое описание процессов беглости и чередования букв в морфемоидах; изучение и математическое описание закономерностей сочетаемости соседних морфоидов в морфах и морфов в словах; изучение и математическое описание процесса синтеза морфоидов, морфов и слов по семантическим признакам.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Применение метода нуль-органа в лингвистике.— Проблемы бионики, 1978, вып. 21, с. 109—112. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О теории интеллекта.— Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 15—22. 3. Русская грамматика, т. I.— М.: Наука, 1980.— 783 с.

Поступила в редколлегию 09.03.81.

И. Г. ФИЛИППЕНКО, канд. техн. наук,
В. Н. САМСОНКИН, канд. техн. наук

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАЗНОСТНОГО УРАВНЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

При построении алгоритмов регулирования движения робототехнических систем, основанных на бионических принципах, используются пространственно-временные алгоритмы. При моделировании данных алгоритмов система разностных уравнений

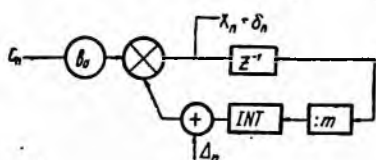


Рис. 1

преобразуется в систему с целочисленными значениями коэффициентов. Представляет интерес зависимость погрешностей целочисленного округления от выбора коэффициентов разностного уравнения.

Рассмотрим разностное уравнение 1-го порядка $x_n = b_0 c_n -$

$-\text{INT}\left(\frac{x_{n-1}}{m}\right)$ (1), где $c_n = 1$; INT — операция определения целой части числа; b_0, m — целые положительные числа.

Ошибка, которая имеет место в результате выполнения операции INT, обозначим Δ_n . Здесь $\Delta_n = -\frac{x_{n-1}}{m} + \text{INT}\left(\frac{x_{n-1}}{m}\right)$. Обозначим через x_n решение разностного уравнения $x_n = b_0 c_n - \frac{x_{n-1}}{m}$ (2). Тогда x_n можно определить так: $x_n = x_n + \delta_n$, где δ_n — ошибка, обусловленная операцией INT.

Для исследования погрешностей, вводимых операцией INT, следует указать, что данные погрешности имеют стохастическую природу. Кроме того, предположим, что ошибки округления Δ_n при различных n независимы, и для определения оценки погрешности воспользуемся приближенной моделью, основанной на применении теории шума для линейных систем [1].

Эксперименты показали, что коэффициент b_0 влияет сложным образом на ошибку δ_n . Поэтому дисперсию погрешностей округления будем определять в два этапа, исходя из формулы

$$\sigma_0^2 = f^2(b_0) \sigma_1^2, \quad (3)$$

где σ_1^2 — дисперсия погрешностей разностного уравнения (1) при $b_0 = 1$; $f(b_0)$ — функция, учитывающая влияние b_0 .

1. Рассмотрим соотношение (1) при $b_0 = 1$. Учитывая, что $0 \leq \Delta_n < 1$, одиночная ошибка Δ_n подчиняется равномерному закону распределения плотности вероятности $g(\Delta) = 1, 0 \leq \Delta < 1$ и имеет дисперсию $(\int \Delta^2) \sigma^2(\Delta) = 1/12$ (4).

На рис. 1 изображена шумовая модель цифрового фильтра (ЦФ), соответствующего уравнению (1), показано, каким образом вводится шум округления. Учитывая, что установившееся состояние наступило, дисперсия ошибки $\delta_n(1)$ (где $\delta_n(1) = \delta_n$ при $b_0 = 1$), согласно [1], определится из формулы

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma^2(\Delta)}{2\pi j} \oint P(z) P\left(\frac{1}{z}\right) z^{-1} dz, \quad (5)$$

где $P(z) - z$ — передаточная функция ЦФ (1); $j^2 = -1$; $\sigma^2(\Delta)$ определяется из (4).

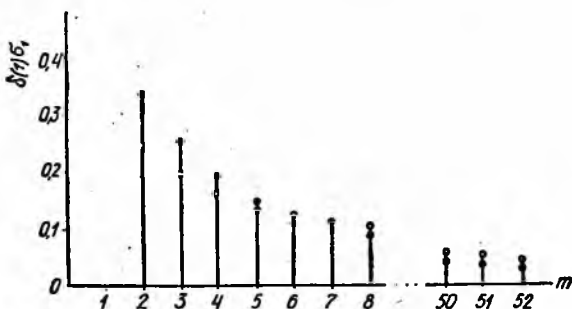


Рис. 2

Исходя из (1) z -передаточная функция ЦФ имеет вид $P(z) = \frac{z}{z + \frac{1}{m}}$. Для обеспечения устойчивой работы ЦФ, согласно

критерию Шур — Кона, необходимо выполнение условия $m > 1$. Интегрирование в (5) ведется вдоль круга единичного радиуса с центром в точке 0. Функция $Q(z) = P(z) P\left(\frac{1}{z}\right) z^{-1}$ голоморфна, поэтому для определения интеграла по поверхности от функции $Q(z)$ можно применить теорему Коши о вычетах:

$$\oint Q(z) dz = 2\pi j \sum_{i=1}^k \text{Res } Q(z_i).$$

Вычеты вычисляются для полюсов $z_1 = 0$, $z_2 = -\frac{1}{m}$ (при этом $K = 2$). В результате применения теоремы Коши получим

$$\sigma_1^2 = \frac{m\sigma^2(\Delta)}{m^2 - 1}. \quad (6)$$

На рис. 2 показан сравнительный график изменения среднеквадратичного отклонения ($\sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2}$) и ошибки $\sigma_n(1) = x' - x$, полученной в результате проведения экспериментов при $b_0 = 1$ (• — экспериментальные данные; ○ — теоретические данные). Значения $\delta_n(1)$ получены после окончания в ЦФ переходных процессов, т. е. в установившемся состоянии.

Для того чтобы среднеквадратичное отклонение σ_1 наиболее точно описывало экспериментальную кривую $\delta(1)$, введена правочная функция $r(m)$ следующего вида:

$$r(m) = \begin{cases} t, & \text{если } 2 \leq m < 5; \\ \frac{1-t^2}{5t}, & \text{если } 5 \leq m < 10; \\ \frac{1}{t}, & \text{если } m \geq 10, \end{cases}$$

где $t = 1,4$.

Таким образом, окончательно дисперсия погрешностей на выходе ЦФ 1-го порядка вида (1) при $b_0 = 1$ в установившемся состоянии с учетом (5) определится из следующего выражения:

$$\sigma_1^2 = \frac{m\sigma^2(\Delta)r^2(m)}{m^2 - 1}. \quad (7)$$

2. Для определения $f(b_0)$ проведены эксперименты. Определялись значения $f_s = \delta/\delta(1)$. Замечательно, что f_s принимает только целые положительные значения. Оказалось, что при $m \geq b_0$: $f_s = b_0$. Для $m < b_0$: f_s имеет довольно сложную зависимость от m и b_0 , т. е. $f_s = \varphi(b_0, m)$, причем функция $\varphi(b_0, m)$ периодическая, период которой — величина непостоянная. Необходимо, чтобы $f(b_0) = \varphi(b_0, m)$ для всех пар (b_0, m) . Очевидно, что функция f также зависит и от m , т. е. необходимо найти функцию $f(b_0, m)$ такую, чтобы для всех пар (b_0, m) выполнялось равенство $f(b_0, m) = \varphi(b_0, m)$.

Исходя из вида полученной в результате экспериментов функции $\varphi(b_0, m)$ для ее аппроксимации была найдена функция $f(b_0, m) = b_0 - (\text{INT}(\frac{b_0}{m}) - k)(m + 1)$ (8), где k — изменяющаяся величина, которая определяется из экспериментов. Закон изменения k ищется в виде $k = [p(m)b_0 + s(m)]$. В результате расчетов найдено, что

$$p(m) = \frac{1}{m(m+1)}; \quad s(m) = \frac{|m-3|}{m+1}$$

и, таким образом,

$$k = \text{INT} \left(\frac{b_0}{m(m+1)} + \frac{|m-3|}{m+1} \right). \quad (9)$$

Подставив k из (8) в (7), получим

$$f(b_0, m) = b_0 - \left[\text{INT} \left(\frac{b_0}{m} \right) - \text{INT} \left(\frac{b_0}{m(m+1)} + \frac{|m-3|}{m+1} \right) \right] (m+1). \quad (10)$$

Вероятность $P(f = \varphi) = 0,9$.

Окончательно дисперсия ошибки, возникающей в ЦФ (1) вследствие наличия операции INT, определяется с помощью формулы $\sigma_0^2 = f^2(b_0, m)\sigma_1^2$ (11). Здесь σ_1^2 определяется из формулы (7); $f(b_0, m)$ — из формулы (10).

3. Функция $f_s = \varphi(b_0, m)$ обладает замечательным свойством: при некоторых парах (b_0, m) $f_s = 0$. Это означает, что при данных парах (b_0, m) ошибка на выходе, получаемая вследствие применения операции INT, $\delta = 0$. Следовательно, для данного b_0 можно подобрать такое m , чтобы в установившемся состоянии уравнения (1) и (2) были адекватны.

В результате анализа $\varphi(b_0, m)$ установлено, что если b_0 — простое число, то $f(b_0, m) = 0$ при $m = b_0 - 1$, или, что то же самое, при фиксированном $m: f(m + 1, m) = 0$.

В общем случае: пусть $\{n_1, n_2, \dots, n_k, b_0\}$ — совокупность делителей b_0 , причем $n_i > 2$ ($i = \overline{1, k}$). Тогда при $m = \{n_1 - 1, n_2 - 1, \dots, n_k - 1, b_0 - 1\}$ (12) ошибка на выходе ЦФ (1) $\delta = 0$. Аналогичные свойства приписаны функции $f(b_0, m)$.

Заключение. При исследовании ЦФ (1) возникает ошибка $\delta_n = x_n^* - x_n$, получаемая вследствие операции INT. Для того чтобы оценить эту ошибку, была разработана шумовая модель ЦФ (1), а также получены соотношения для дисперсии округления. Это позволит определить дисперсию (среднеквадратичное отклонение) получаемой погрешности в зависимости от значения полюса z — передаточной функции $(1/m)$ ЦФ, а также коэффициента усиления ЦФ (b_0). Обнаружено замечательное свойство: при некоторых соотношениях между b_0 и m ошибка равна нулю, что позволяет уравнению ЦФ с округлением и без округления рассматривать как адекватные. Предлагается следующий алгоритм для определения $f(b_0, m)$.

Шаг 1. Для заданного m определим величину a по формуле (7).

Шаг 2. Вычислить делители b_0 . Пусть n_1, n_2, \dots, n_{k+1} — делители b_0 ($n_{k+1} = b_0$).

Шаг 3. Пусть $i = 1$.

Шаг 4. Если $m = n_i - 1, h = 0$ и перейти к шагу 7. Иначе перейти к шагу 5.

Шаг 5. $i = i + 1$. Если $i \leq k + 1$, перейти к шагу 4, иначе — к шагу 6.

Шаг 6. Вычислить значение h по формуле (10).

Шаг 7. Значение функции $f(b_0, m) = h$.

Список литературы: 1. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов.— М.: Сов. радио, 1973.— 368 с. 2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей.— М.: Наука, 1969.— 576 с. 3. Виноградов И. М. Основы теории чисел.— М.—Л. Госиздат технико-теоретич. лит-ры, 1952.— 180 с. 4. Филиппенко И. Г., Самсонкин В. Н. Оценка погрешностей самонастраивающегося цифрового фильтра.— Системы управления летательных аппаратов, 1979, вып. 5, с. 81—86.

Поступила в редколлегию 03.03.81.

УДК 631.3.01

А. А. РОСЬ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ АЛГОРИТМОВ

Бурное внедрение вычислительных машин в процесс управления приводит к резкому увеличению объема программного обеспечения управляющих ЭВМ. Очевидно, через 10 лет соот-

ношение между ними будет такое, как между стоимостью упаковки и товара [1]. Производительность труда программистов при создании сложных комплексов программ управления в реальном масштабе времени составляет 1—3 команды в день на человека. На разработку комплексов программ в 100—200 тыс. команд требуется 3—5 лет [2]. Кроме того, программная продукция, принятая к эксплуатации, всегда недоотлажена. Число ошибок, остающихся невыявленными в больших программах и системах (после предположительного окончания их отладки и тестирования), очень велико. Так, каждая новая версия операционной системы OS/360 содержит свыше тысячи ошибок [3].

Еще одной особенностью программной продукции является то, что она не имеет физического износа, тогда как ее моральный износ очень высок. Нередко программа устаревает быстрее, чем создается, а незначительная модернизация управляющей программы, принятой к эксплуатации, обходится чрезвычайно дорого.

В настоящее время не существует единых взглядов на вопросы создания сложных комплексов программ, отсутствуют единые методы их производства, недостаточно теоретических работ, направленных на сокращение времени и стоимости производства таких программ.

Чтобы сократить сроки и стоимость производства и модернизации управляющих программ, необходимо автоматизировать синтез сложной программы.

Процесс автоматического синтеза программ можно рассматривать как распадающийся на два этапа — планирование решения и оформление алгоритма в виде, готовом для исполнения. Рабочую программу всегда можно представить состоящей из операторов (которыми могут быть программные модули), выполняемых в ходе решения задачи в последовательности, заданной логикой этой программы. Тогда планирование решения состоит в определении того, какие операторы и в какой последовательности должны применяться для решения какой-либо задачи. Это приводит к исследованию смысла, содержания решаемых задач и в целом имеет принципиальный характер. На втором этапе необходимо обеспечить правильную связь и взаимодействие операторов, включая распределение памяти, организацию вычислительного процесса и т. п. Таким образом, автоматический синтез программ включает этап автоматического определения последовательности операторов на основании анализа содержания задачи управления и этап организации взаимодействия операторов, что позволяет синтез программ свести, по сути, к синтезу алгоритмов. В соответствии с этим сформулируем на содержательном уровне задачу, которую должна решать предлагаемая система автоматизированного синтеза управляющих программ (САСП).

Пусть имеется набор программных модулей, интерпретирующих все возможные действия управляющей системы. Система автоматизированного синтеза управляющих программ должна (исходя из целевых установок управляющей системы, состояния среды, свойств управляемых объектов и рекомендаций по организации управления) сформировать план действий управляющей системы, в соответствии с которым затем синтезировать из необходимого набора программных модулей управляющую программу.

Анализ задач управления позволяет сделать вывод о возможности формализованного представления их содержания и вывода из него плана действий по выработке решения. Это связано с тем, что на практике часто реализуется детерминированная система правил принятия решения.

Следует отметить следующую особенность структуры управляющих алгоритмов. В процессе управления в определенные моменты времени управляющей ЭВМ вырабатываются команды на выполнение управляемыми объектами действий, направленных на достижение определенной цели управляющей системой. Каждое действие характеризуется субъектом, объектом, условиями его выполнения, временем начала выполнения действия, длительностью и результатом. Это позволяет выявить конечное множество таких действий, соответственно условия их выполнения, сопоставить с ними наборы программных модулей и, обращаясь с ними как с операторами, синтезировать алгоритм управления, который и будет представлять собой план действий управляющей системы.

Анализируя опыт формального описания проблемной среды на языке исчисления предикатов, можно сделать выводы о типичном представлении аксиом, используемых для этой цели. Это объясняется тем, что при формулировании аксиом человек стремится отразить в их содержании причинно-следственную связь, которая приводит к их имплицативной записи. Последнее является естественным, так как в аксиомах, описывающих поведение управляющей системы, должны быть формализованно отражены достаточные условия выполнения действий и их результаты, а также порядок реализации действий. В соответствии с этим все аксиомы, используемые при описании среды, можно разбить на три группы:

аксиомы, характеризующие достаточные условия выполнения действий: $a_1 \& a_2 \rightarrow d_1$;

аксиомы, описывающие результаты действий: $d_2 \rightarrow p_1$;

аксиомы, определяющие порядок действий системы: $d_1 \rightarrow d_2$.

Здесь a_1, a_2 — условия выполнения действий; d_1, d_2 — действия, выполняемые управляющей системой; p_1 — результат выполнения действий.

При выводе плана действий системы наиболее естественным представляется формализация такого способа мышления, при

котором строилась бы цепочка причинно-следственных связей, где следствие одного явления было бы причиной другого. Так, уже приведенные аксиомы подсказывают, что для того, чтобы добиться результата p_1 , необходимо выполнить действие d_2 . Это можно совершить после реализации d_1 , для чего необходимо выполнение условий a_1 и a_2 . Формально такие рассуждения записываются в виде цепочки импликаций: $a_1 \& a_2 \rightarrow d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow p_1$.

Простота и естественность такого подхода к выводу плана действий управляющей системы наводит на мысль, что его целесообразно положить в основу построения САСП.

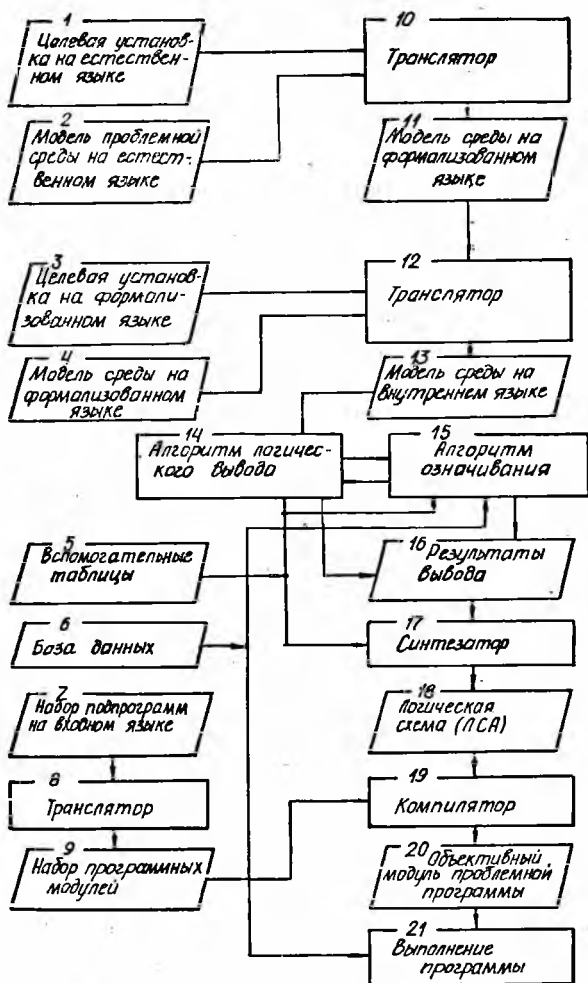
Из существующих методов синтеза программ наиболее разработанным и позволяющим решать сформулированные ранее задачи является метод, основанный на доказательстве теорем. При этом в качестве языка описания моделей внешнего мира целесообразно выбрать язык исчисления предикатов первого порядка, расширенный операторами модальной, временной и других логик для описания динамических процессов.

Опыт работы в этой области показывает, что применение таких мощных универсальных процедур вывода, как метод резолюций и его модификации при решении задач синтеза программ, является нецелесообразным, так как отсутствие хороших эвристик, способствующих организации направленного поиска доказательства, порождает в процессе вывода много неперспективных вариантов. Сам процесс построения плана действий по полученному доказательству указанными методами является достаточно громоздким. В силу изложенных соображений представляется целесообразным для решения задач синтеза управляющих программ в основу алгоритма доказательства положить правила вывода, реализованные в процедуре MESON [5].

Состав и функциональная схема САСП представлены на рисунке. Ядром системы является дедуктивная вопросно-ответная система (бл. 10—16), содержащая средства логического вывода следствий из системы аксиом (бл. 14—15). Исходными данными САСП являются: а) модель проблемной среды, заданной либо на ограниченном естественном языке (бл. 2), либо на формализованном языке теории среды (бл. 4); б) база данных, включающая все наборы значений предметных переменных; в) набор программ, отлаженных на входном языке (бл. 7), или набор автономно оттранслированных программных модулей (бл. 9); г) набор таблиц, содержащих информацию о структуре базы данных, набора программных модулей и др., а также д) целевая установка, в соответствии с которой системой должен синтезироваться управляющий алгоритм (бл. 1, 3).

Модель проблемной среды и целевая установка могут задаваться двумя способами — на естественном или формализованном языке, логическую основу которого составляет язык исчисления предикатов первого порядка, расширенный операторами

модальной логики. В первом случае утверждения, описывающие модель среды, предварительно транслируются на формализованный язык (бл. 10, 11), во втором — описание модели поступает непосредственно на вход транслятора, преобразующего входные предложения к стандартному виду на внутреннем языке



системы (бл. 12). В результате этих преобразований формируется модель проблемной среды в удобном для оперирования с ней в процессе дальнейшего использования в виде (бл. 13).

Формирование плана действий управляющей системы по достижению поставленной целевой установки (подвергшейся таким же преобразованиям, как и модель среды) осуществля-

ется алгоритмом логического вывода с привлечением алгоритма означивания формул, записанных на языке исчисления предикатов первого порядка, на множестве значений предметных переменных. Это необходимо для определения условий функционирования проблемного алгоритма управления. В результате процесса вывода плана действий может быть сформирован ответ трех типов (бл. 16):

отрицательный, если из модели проблемной среды следует, что управляющая система не способна выполнить поставленную перед ней задачу;

содержащий сведения о недостающей информации, без которой нельзя сделать никакого заключения;

положительный в виде плана действий, представленного в форме древовидной структуры.

На этом функции вопросно-ответной системы заканчиваются, и в работу включается синтезатор (бл. 17), задача которого заключается в том, чтобы по дереву доказательства построить логическую схему проблемного алгоритма (ЛСА) с учетом информационного сопряжения между модулями (бл. 18). Компилятор в соответствии с ЛСА из набора необходимых автономно оттранслированных программных модулей формирует управляющую программу (бл. 19, 20), после чего управление передается на выполнение проблемной программы.

Описанная САСП позволяет значительно сократить сроки производства прикладного программного обеспечения управляющих ЭВМ и упростить процесс модернизации управляющих программ, который сводится к коррекции аксиоматической модели проблемной среды. Кроме того, представление синтезированного алгоритма в виде ЛСА позволяет использовать уже разработанный аппарат преобразования логических схем алгоритмов с целью оптимизации структуры проблемного алгоритма.

Список литературы: 1. Глушков В. М. Фундаментальные исследования и технология программирования.— Технология программирования. Тез. докл. I Всесоюз. конф. Пленарные доклады и общие материалы. ИК АН УССР, Киев, 1979, с. 7—11. 2. Липавев В. В. Состояние и проблемы производства математического обеспечения для систем управления и обработки информации.— Технология программирования. Тез. докл. I Всесоюз. конф. Пленарные доклады и общие материалы. ИК АН УССР, Киев, 1979, с. 27—30. 3. Йодан Э. Структурное проектирование и конструирование программ.— М.: Мир, 1979.— 413 с. 4. Генцен Г. Исследования логических выводов.— В кн.: Математическая теория логического вывода.— М.: Наука, 1967, с. 9—74. 5. Loveland D. Automated Theorem Proving: A Logical Basis.— New-York, North-Holland Publishing Company, 1978. 405 p.

Поступила в редколлегию 25.02.81

П. В. ВАСИЛИК, О. А. КРИВОВА, А. А. ПОПОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАТЕЛЬНОЙ АРИТМИИ

Впервые объяснение дыхательной аритмии (применение частоты сердечных сокращений на вдохе и выдохе) дал Геринг [1]. Он считал, что дыхание влияет на частоту сердечных сокращений через блуждающий нерв, источником афферентации являются механорецепторы легких. Впоследствии Гейманс выдвинул гипотезу о непосредственной передаче периодически возникающего возбуждения дыхательного центра в центр регуляции частоты сердечных сокращений [2]. В настоящее время нет четкого представления о механизмах дыхательной аритмии. Наряду с гипотезами Геринга о рефлекторном происхождении дыхательной аритмии и центральном — Гейманса существуют представления, что рецепторной зоной этого рефлекса являются барорецепторы каротидного синуса, дуги аорты, полые вены. Имеется предположение о механическом влиянии дыхания на гемодинамику сердца [3].

Широко известна модель дыхательной аритмии, предложенная Клайнсом в 1960 г. [4]. Клайнс исходил из гипотезы Геринга о влиянии импульсации с рецепторов растяжения легких на сердце через блуждающий нерв. По кривым реальных переходных процессов при задержке дыхания на вдохе и выдохе Клайнс подобрал вид передаточной функции, связывающей изменение окружности грудной клетки при дыхании с изменением вагусного торможения сердца. Передаточные функции вдоха и выдоха реализованы на аналоговой установке. Дыхательные изменения частоты сердечных сокращений формируются наложением переходных процессов вдоха и выдоха. Модель дает хорошее совпадение с реальными значениями длительности сердечных циклов при различных режимах дыхания.

В статье предлагается математическая модель дыхательной аритмии, в основе которой лежат предположения Гейманса о центральном происхождении дыхательной аритмии на новой нейрофизиологической основе — о тесной связи некоторых дыхательных и кардиоваскулярных нейронов в продолговатом мозге, посредством которой реализуется взаимосвязь ритма дыхания и ритма сердечных сокращений.

Нейроны дыхательного центра подразделяются на несколько основных групп. Инспираторные — активные в фазу вдоха, инспираторно-эспираторные и эспираторно-инспираторные — активные в обе фазы с учащением на вдохе и выдохе, а также нейроны с непрерывной активностью, модулированной в ритме дыхания. Существует мнение, что непрерывно активные дыхательные нейроны относятся также к сосудодвигательному цен-

тру [5]. В опытах Przybilla и Wang найдены кардио-васкулярные нейроны с частотно модулированной дыханием активностью [6]. Можно предположить, что непрерывно активные нейроны с частотой, модулированной дыханием, осуществляют изменение частоты сердца в ритме дыхания.

Таким образом, взаимодействие ритма дыхания и ритма сердца приводит к возникновению процессов, напоминающих модуляцию сердечного ритма, что обычно называют дыхательной аритмией. Возникающая модуляция может быть следствием:

1) навязывания дыхательного ритма — в результате период модуляции сердечного ритма равен периоду дыхания;

2) независимого возникновения модуляции сердечного ритма с периодом модуляции, близким к дыхательному, — влияние дыхательных периодов отсутствует, аритмия возникает из-за внутренних свойств сердечно-сосудистой системы;

3) модуляция сердечного ритма возникает в результате взаимодействия ритмов сердцебиения и дыхания, и период модуляции может отличаться от периода дыхания.

В статье исследуются 1-й и 3-й варианты, т. е. модель дыхательной аритмии представляет собой два взаимосвязанных осциллятора — дыхательный и сердечный. Для моделирования дыхательного ритма используем уравнение Лотка — Вольтерра, которое впервые было использовано для этой цели в работе [7]:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_1(F_1 - K_1 y_2); \quad \frac{dy_2}{dt} = y_2(-F_2 + K_2 y_1), \quad (1)$$

где y_1, y_2 — активность инспираторных и экспираторных нейронов; K_1, K_2 — коэффициенты связи инспираторных и экспираторных нейронов; F_1, F_2 — описывают влияние тонууса симпатической и парасимпатической нервной системы.

Ван дер Поль предложил описывать биение сердца релаксационными колебаниями [8]: $\frac{d^2 y}{dt^2} = -Fy + \varepsilon(1 - y^2) \frac{dy}{dt}$ (2). Введем в уравнение Ван дер Поля [2] модуляцию частоты сердечного осциллятора активностью дыхательного осциллятора $D(y_1 - y_2)$, т. е.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -(F + D(y_1 - y_2)) + \varepsilon(1 - y^2) \frac{dy}{dt}. \quad (3)$$

Здесь y — активность сердечного осциллятора; $y_1 - y_2$ — суммарная активность дыхательных нейронов; D — коэффициент связи сердечного осциллятора с дыхательным; ε — коэффициент, определяющий степень релаксационности сердечного осциллятора.

Систему уравнений (1) и уравнение (3) запишем в виде системы уравнений первого порядка:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_1(F_1 - K_1 y_2); \quad \frac{dy_2}{dt} = y_2(-F_2 + K_2 y_1);$$

$$\frac{dy_3}{dt} = y_t; \quad \frac{dy_t}{dt} = -y_3(F + D(y_1 - y_2)) + \varepsilon(1 - y_3^2)y_t. \quad (4)$$

Переменная y_3 описывает модуляцию активности сердечного осциллятора активностью дыхательного осциллятора.

Система нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (4) рассчитывалась на ЭВМ БЭСМ-6 стандартным методом Мерсона. На рис. 1 приведены типичные решения системы (4). Периоды сердечных сокращений считали по максимумам кривой активности сердечного осциллятора (переменная

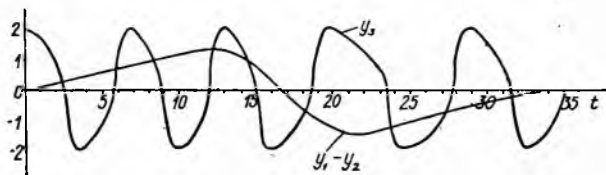


Рис. 1

y_3). В модели время t относится к реальному времени как 10:1, т. е. для получения на модели реальных значений периодов сердечных сокращений правые части системы (4) необходимо умножить на 10.

На рис. 2, а представлена полученная нами периодограмма 15-летнего испытуемого К-ко, на рис. 2, б — рассчитанная из модельной кривой y_3 периодограмма. Период дыхания равен 5,1 с, отношение длительностей фаз вдоха и выдоха 1,2:1, средняя длительность сердечного цикла 0,68 с. Значения коэффициентов модели $F_1=0,13$, $F_2=0,12$, $K_1=0,11$, $K_2=0,1$ определяют соответствующий период дыхания 5,1 с и соответствие длительностей фаз вдоха и выдоха. Значение коэффициентов $F=1,2$, $\varepsilon=2$ определяет основную частоту сердечного осциллятора, равную средней частоте сердечных сокращений обследуемого. При значении коэффициента $D=0,25$, который определяет амплитуду периодограммы, достигается удовлетворительное приближение к реальной периодограмме.

При записи пневмограммы и ЭКГ испытуемого в состоянии покоя дыхание было нестабильным, а в модели период дыхания постоянный. Поэтому мы на рис. 2 и 3 приводим периодограммы только в течение двух циклов дыхания.

На рис. 3, а представлена полученная нами периодограмма 15-летнего испытуемого А-ского, на рис. 3, б — рассчитанная на модели при значениях коэффициентов $F_1=0,16$, $F_2=0,16$, $K_1=0,12$, $K_2=0,12$, $F=0,93$, $\varepsilon=2$, $D=0,1$. Период дыхания равен 4,1 с, средняя длительность сердечных сокращений 0,8 с.

В описанных случаях у испытуемого К-ко на один цикл дыхания приходилось 7—8 сердечных сокращений, у А-ского — 5. Интересен случай патологического дыхания, которое наблю-

далось у 13-летнего больного Р-ского в состоянии покоя. Периоды дыхания на протяжении записи изменялись в интервале 1,3—1,5 с, средняя длительность сердечных циклов (определяемых по RR-интервалам ЭКГ) равнялась 0,69 с.

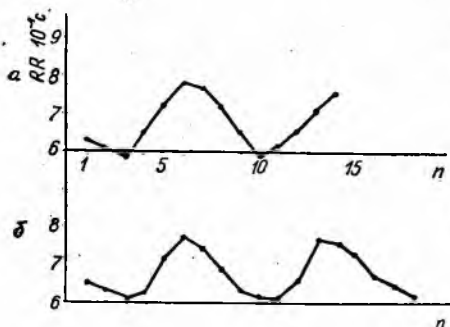


Рис. 2

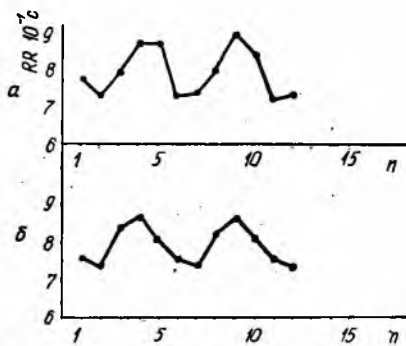


Рис. 3

На рис. 4, а приведена периодограмма Р-ского, на рис. 4, б — рассчитанная на модели периодограмма при значениях коэффициентов $F_1 = F_2 = 0,45$, $K_1 = K_2 = 0,4$, что соответствует периоду дыхания 1,4 с; $\epsilon = 2$, $F = 1,15$, что соответствует средней длительности сердечных сокращений — 0,69 с, $D = 0,2$. В данном случае отношение частоты сердцебиений к частоте дыхания близко к 2. Как отмечалось в работе [9], при таком малом отношении частот еще наблюдается дыхательная аритмия.

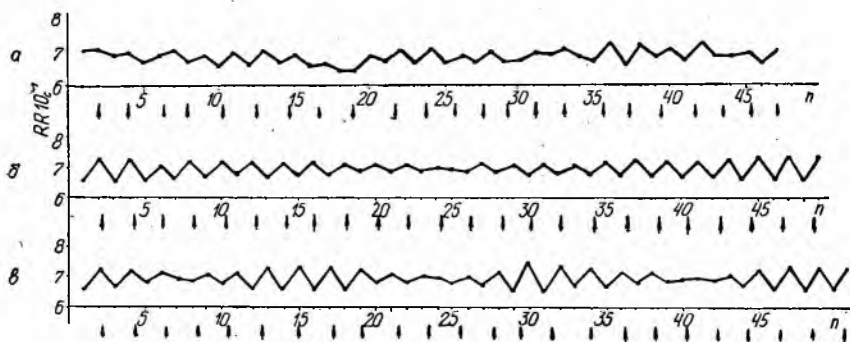


Рис. 4

На рис. 4, в представлена рассчитанная периодограмма этого же больного при значениях коэффициентов $F_1 = F_2 = 0,45$, $K_1 = K_2 = 0,45$, определяющих период дыхания 1,5 с, и $D = 0,12$, т. е. отношение периодов дыхания и сердечных сокращений (1,5:0,69) больше, чем в случае, изображенном на рис. 4, б. На

рис. 4, а, б, в можно увидеть модуляцию периодограмм по амплитуде с периодом, охватывающим несколько дыхательных циклов [10], иными словами, второй уровень модуляции сердечного ритма.

В работе [9] описано появление медленных изменений пульса при частом дыхании — «псевдыхательных волн». Авторы объясняют это явление наложением переходных процессов после каждого вдоха, выдоха; блокированием при высокой частоте дыхания его влияния на сердце и появлением периодики неизвестного генеза; тем, что часть нейронов дыхательного центра генерирует импульсы в ритме естественного для данного обследуемого дыхания.



На рис. 4, б, в (где стрелками отмечено начало вдоха) наряду с модуляцией по амплитуде можно обнаружить периодическое изменение соотношения между фазами дыхания и фазами изменения периодограммы, т. е. учащение сердцебиений может опережать начало вдоха и возникать на выдохе. Как следует из предлагаемой модели, второй уровень модуляции сердечного ритма возникает из-за некрatного соотношения периодов (или частот) дыхания и сердцебиения. От величины этого соотношения зависит период модуляции.

Модуляция дыхательных колебаний сердечных сокращений, на наш взгляд, может возникать при разных частотах дыхания и пульса, что и наблюдалось при исследованиях на модели. Например, на рис. 5 изображена периодограмма, полученная для случая, когда период дыхания равен 4 с, средняя длительность сердечных сокращений 1,07 с ($F_1=F_2=0,2$, $K_1=K_2=0,4$, $\varepsilon=2$, $F=0,6$, $D=0,3$).

Таким образом, исходя из гипотезы о модуляции сердечного осциллятора дыхательным предложена математическая модель, описывающая дыхательную аритмию частоты сердечных сокращений. При соответствующем выборе коэффициентов модель дает удовлетворительное совпадение с реальными периодограммами RR интервалов ЭКГ.

В модельных исследованиях обнаружено явление модуляции дыхательных колебаний частоты сердечных сокращений (или второй уровень модуляции), а также изменение соотношения между фазами дыхания и дыхательной аритмии.

Список литературы: 1. *Hering H.* Karotissinusreflexe auf Herz and Gefässe.— Leipzig, 1927.— 120 p. 2. *Heymans C., Neil E.* Reflexogenic area of the cardiovascular system.— London, 1958.— 200 p. 3. Физиология кровообращения — Физиология сердца.— Л.: Наука, 1980.— 583 с. 4. *Клайне М.* Дыхательная регуляция частоты сердечных сокращений сердца. Закономерности, установленные при помощи моделирующего устройства.— В кн.: Электроника и кибернетика в биологии и медицине.— М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 282—314. 5. Дыхательный центр.— М.: Медицина, 1975.— 184 с. 6. *Przybila A., Wang S.* Neurophysiological characteristics of Cardiovascular Neurons in the Medullar Oblongata of the Cat.— J. of Neurophysiology, 1967, 30, № 4, p. 645—647. 7. *Lüscher H., Greff K., Hess C.* The Lotka—Volterra Equations, a Possible Model for the Rhythmogenesis of Respiration: An Experimental and Study.— Biological Cybernetic, 1977, 26, № 2, p. 81—92. 8. *Van der Pol B., Van der Mark J.* The Heartbeat considered as a relaxation oscillation and electrical model of the heart.— Phis. Mag., 1928, 6, p. 763—768. 9. *Защиорский В. М., Сарсания С. К.* Частотный анализ респираторных влияний на сердечную ритмику.— Биофизика, 1966, 11, вып. 5, с. 894—902. 10. *Воскресенский А. Д.* Статистический анализ сердечного ритма и показателей гемодинамики в физиологических исследованиях.— Проблемы космической биологии. Т. 26. М., Наука, 1974.— 218 с.

Поступила в редколлегию 02.03.81.

УДК 681.3.068

Е. Г. КАЧКО, канд. техн. наук, *Ю. С. МАРЧЕНКО*

СИСТЕМА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВКУСОВОГО АНАЛИЗАТОРА СООБЩЕНИЕ 2

В работе [1] предложен специальный язык для описания объективных данных обследования вкусового анализатора человека и показана его применимость для задания данных, полученных общим и капельным методами и методом плетизмографии. Сообщение 2 посвящено описанию транслятора с этого языка.

При разработке транслятора используются синтаксические методы трансляции [2]. Транслятор может быть представлен в виде суперпозиции трех блоков: блок лексического анализа (БЛА); блок синтаксического анализа (БСА); блок формирования шкалы (БФШ).

Будем называть текст программы, написанной на входном языке, исходным текстом. Понятие лексической единицы (ЛЕ) совпадает с общепринятым [2]. БЛА предназначен для анализа исходного текста с целью построения таблицы чисел, S-строки и обнаружения лексических ошибок, допущенных в записи ЛЕ. БСА предназначен для проверки корректности исходного текста с точки зрения синтаксиса. При нарушении необходимой последовательности ЛЕ формируются соответствующие диагностические сообщения. БФШ ставит в соответствие данные обследования из исходного текста данным таблицы [1] для

определения уровней отклонений от нормы в каждом конкретном случае.

Входной информацией для БЛА являются исходный текст; таблица терминальных символов.

Терминальные символы вместе с соответствующими кодами, записанными в 16-ричной системе счисления, представлены в табл. 1. В эту же таблицу занесены ЛЕ типа «понятие», «число» с соответствующими кодами.

Таблица 1

Терминальный символ	16-ричный код	№ п/п	Терминальный символ	16-ричный код
Общий метод	20	16	Винная кислота	2F
Левая сторона, капельный метод	21	17	Соляная кислота	30
Правая сторона, капельный метод	22	18	Хинин солянокислый	31
Плетизмографии метод	23	19	Понятие (имя болезни)	40
Сладкое	24	20	Пробел ()	01
Кислое	25	21	Запятая (,)	02
Соленое	26	22	Точка с запятой (;)	03
Горькое	27	23	Символ разделения	04
Появление реакции	28	24	Звездочка (*)	05
Сдвиг максимальный	29	25	Двоеточие (:)	06
Длительность реакции	2A	26	*L	07
Величина реакции	2B	27	*E	08
Сахар	2C	28	Число	09
Глюкоза	2D	29	Имперсанд (&)	0A
Хлористый натрий	2E			

Выходной информацией блока являются: таблица чисел (TABN); S-строка (STR); список диагностических сообщений, если в исходном тексте допущены лексические ошибки (ERR).

Таблица чисел представляет собой последовательность чисел в машинной форме в том порядке, в котором они встречаются в исходном тексте. Если одно и то же число появляется несколько раз, в таблицу чисел оно записывается только один раз. Каждое число рассматривается как константа с плавающей точкой с обычной точностью вне зависимости от его внешнего представления.

S-строка — это таблица стандартных символов, под каждый элемент которой отводится слово (4 байта). Структура элемента S-строки представлена на схеме. Самый старший байт всегда заполняется шестнадцатиричными CØ, что является признаком S-строки. Код ЛЕ выбирается из табл. 1. Для чисел в качестве дополнительной информации заносится номер числа в таблице чисел, для ЛЕ другого типа — константа, содержащая нули во всех разрядах. Каждой ЛЕ исходного текста ставится в соответствие один элемент S-строки. Последователь-

ность ЛЕ и соответствующих им элементов в S-строке одинакова.

С_Q | Код ЛЕ | Дополнительная информация
 Байт 0 | Байт 1 | Байты 2,3

Т а б л и ц а 2

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Примечание
1		=											Понятие
2			=										*L
3							=						Метод
4							=						Компонента
5							=						Эталон
6								=	=				Число
7				=	=	=							:
8				=									,
9			=							=			:
10	=										=		*
11													&
12													Временные характеристики

Диагностические сообщения формируются в виде СТРОКА (№ строки) (текст сообщения).

Одно диагностическое сообщение занимает 120 позиций, что соответствует одной строке АЦПУ, № строки совпадает с номером строки исходного текста. Программа просматривается с начала до конца, диагностические сообщения заносятся в область ошибок (ERR). Распечатка области ошибок ERR выполняется после отработки БЛА и БСА с целью выявления максимального количества ошибок за один просмотр.

Входной информацией для БСА являются: S-строка (STR); матрицы предшествования (M).

Матрицы предшествования представляют собой таблицы [3], в которых указаны допустимые и недопустимые последовательности стандартных символов S-строки. Ввиду простоты операторов мы использовали упрощенный вид матрицы предшествования. В табл. 2 представлена матрица предшествования для

общего и капельного методов, а в табл.3 — для метода плетизмографии. Элемент матрицы M_{ij} обозначается $\underline{=}$, если стандартный символ j может следовать за стандартным символом i . Отсутствие этого знака означает недопустимость следования j -символа после i -го.

Т а б л и ц а 3

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Примечание
1		$\underline{=}$											Понятие
2			$\underline{=}$										*L
3							$\underline{=}$						Метод
4							$\underline{=}$						Компонента
5							$\underline{=}$						Эталон
6								$\underline{=}$	$\underline{=}$				Число
7				$\underline{=}$	$\underline{=}$	$\underline{=}$						$\underline{=}$:
8				$\underline{=}$								$\underline{=}$,
9			$\underline{=}$							$\underline{=}$;
10	$\underline{=}$										$\underline{=}$		*
11													&
12							$\underline{=}$						Временные характеристики

Выходной информацией БСА являются: список диагностических сообщений, если в исходном тексте допущены синтаксические ошибки (нарушены правила следования ЛЕ); признак успешного завершения БЛА и БСА.

Диагностические сообщения о синтаксических ошибках формируются в виде
ЗАПИСЬ (№ записи) НЕ УКАЗАН МЕТОД ОБСЛЕДОВАНИЯ
 или

ЗАПИСЬ (№ записи) СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА

Диагностическое сообщение первого типа указывает на отсутствие метода обследования, а второго — на нарушение правил следования ЛЕ. Запись — это последовательность символов исходного текста до ближайшего символа «;». Все диагностические сообщения заносятся в область *ERR* вслед за сообщениями БЛА.

Признак успешного завершения

$$PR = \begin{cases} 1, & \text{отсутствие ошибок в исходном тексте;} \\ 0, & \text{наличие ошибок.} \end{cases}$$

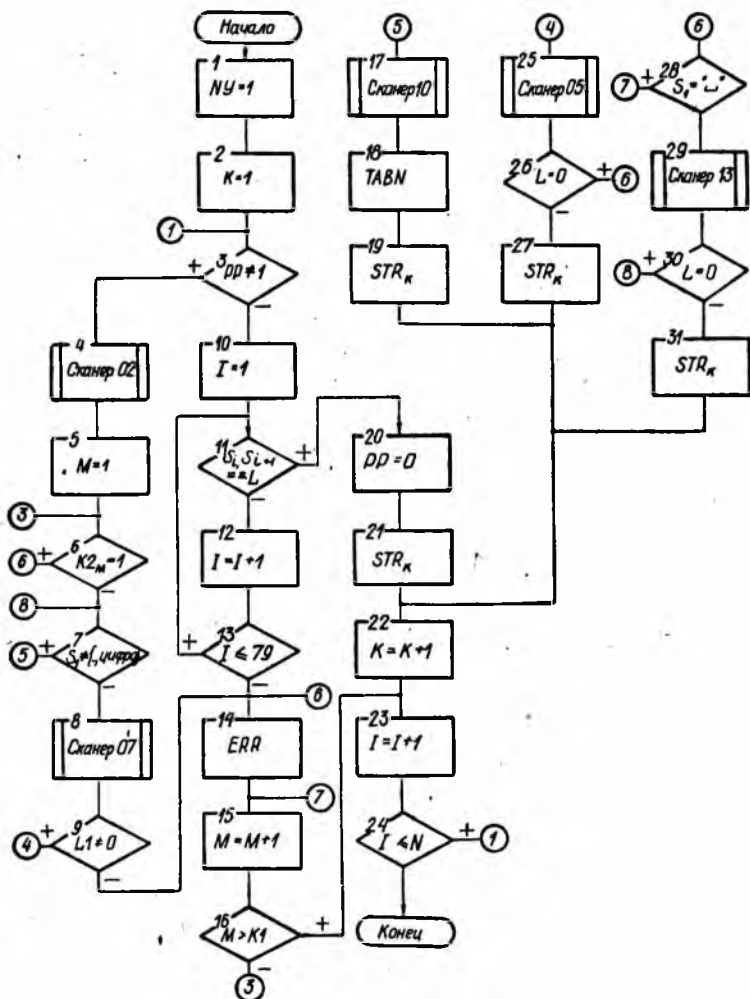


Рис. 1

Если $PR=0$, то после распечатки области ERR работа транслятора прекращается. БФШ выполняется только при $PR=1$. Входной информацией БФШ являются таблица чисел ($TABN$): S -строка (STR); таблица исходных данных (TAB).

Таблица исходных данных содержит шкалу для определения отклонений данных обследования вкусового анализатора от нормы [1] для различных методов, компонент, эталонов и параметров времени.

Выходной информацией БФС является массив *A*, элементы которого указывают степень отклонения от нормы отдельных компонент при выбранных методе исследования и эталонах. Степень отклонения от нормы, оцененная по пятибалльной системе, является существенным признаком для определения характера заболевания, его стадии и прогнозов.

При выполнении БФС может быть сформировано диагностическое сообщение.

ЗАПИСЬ (№ записи) ОШИБКА В ЗАДАНИИ ЭТАЛОНА.

При отсутствии ошибок после выполнения блока лексического анализа, блока синтаксического анализа и блока формирования шкалы печатается сообщение

ТРАНСЛЯЦИЯ УСПЕШНАЯ.

Опишем функционирование отдельных блоков транслятора.

После ввода исходного текста он распечатывается в виде

НОМЕР	НОМЕР	
СТРОКИ	ЗАПИСИ	(текст исходной программы)
1	1	
...

Исходный текст после распечатки приводится к эталонному виду — все ключевые слова сокращаются до четырех символов включительно. Затем выполняется БЛА. Блок-схема БЛА приведена на рис. 1. Обозначения, принятые на блок-схеме:

NY — номер записи;

PP — признак понятия

$$PP = \begin{cases} 1, & \text{работа в режиме обучения} \\ 0, & \text{работа в режиме постановки диагноза;} \end{cases}$$

I — номер строки исходного текста;

K — номер элемента в *S*-строке, соответствующего ЛЕ;

M — номер ЛЕ;

K1 — количество ЛЕ;

K2 — количество символов в ЛЕ;

S — массив символов ЛЕ;

i — номер символа в массиве *S*;

L — признак наличия или отсутствия ошибки в записи ЛЕ;

$$L = \begin{cases} 0, & \text{ошибка есть,} \\ 1, & \text{ошибки нет;} \end{cases}$$

STR, *TABN* — *S*-строка и таблица чисел соответственно;

ERR — область ошибок;

СКАНЕРØ2 — подпрограмма разбивки исходного текста на ЛЕ;

СКАНЕРØ7 — подпрограмма анализа правильности записи числа;

СКАНЕРØ1Ø — подпрограмма перевода исходного числа в форме представления с плавающей точкой;

СКАНЕРØ5 — подпрограмма анализа правильности записи ключевых слов;

N — количество строк исходного текста.

Описание блок-схемы.

Блоки 1, 2 — установка начальных значений *NY*, *I*, *K*;

- Блок 3 — проверка режима работы системы;
 Блоки 10—13 — проверка первой строки на название болезни, если режим обучения;
 Блок 14 — формирование диагностического сообщения при отсутствии названия болезни или программами анализа чисел и служебных слов;
 Блок 4 — разделение строки исходного текста на ЛЕ;
 Блоки 5, 15, 16 — перебор лексических единиц строки и анализ на полноту перебора;
 Блоки 7—9, 17—19 — проверка очередной ЛЕ на число и формирование элемента S-строки и TAVN (при необходимости);
 Блоки 20—21 — формирование признака PP и элемента S-строки в случае режима обучения;
 Блоки 25—27 — проверка очередной ЛЕ на ключевое слово и формирование элемента S-строки, если необходимо;
 Блоки 28—31 — проверка очередной ЛЕ на пробел и разделитель и формирование очередного элемента S-строки, если необходимо;
 Блоки 23—24 — переход к очередной строке исходного текста и проверка на его окончание.

При работе БЛА возможно формирование следующих диагностических сообщений:

СТРОКА (№ строки) ЛЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНА
 СТРОКА (№ строки) ОТСУТСТВУЕТ НАЗВАНИЕ БОЛЕЗНИ
 СТРОКА (№ строки) В ЧИСЛЕ ЗАПРЕЩЕННЫЙ СИМВОЛ
 СТРОКА (№ строки) В ЧИСЛЕ БОЛЕЕ ОДНОЙ ТОЧКИ
 СТРОКА (№ строки) В МАНТИССЕ НЕТ ЦИФР
 СТРОКА (№ строки) ОШИБКА В ЗАПИСИ ПОРЯДКА
 СТРОКА (№ строки) ПЕРЕПОЛНЕНИЕ ПОРЯДКА
 СТРОКА (№ строки) В МАНТИССЕ БОЛЬШЕ 7 ЦИФР

Блок-схема БСА приведена на рис. 2.

Обозначения, принятые на блок-схеме:

I — признак метода;

$$I = \begin{cases} 0 & \text{метод не задан.} \\ 1 & \text{общий или капельный метод,} \\ 2 & \text{метод плетизмографии;} \end{cases}$$

И — массив, предназначенный для указания диапазона допустимых кодов для каждой строки матрицы предшествования;

M — матрица предшествования;

NY — номер записи;

I — номер стандартного символа в S-строке;

KODR — код текущего стандартного символа;

KOD — код очередного стандартного символа;

L1 (L2) номер строки (столбца) матрицы предшествования, соответствующих I (I + 1) стандартным символам S-строки;

L — текущее значение номера строки (столбца) матрицы предшествования;

ERR — область ошибок;

NERR — величина, определяющая адрес очередного диагностического сообщения;

СКАН 21 — подпрограмма для формирования матриц предшествования M (2, 12, 12);

СКАН 23 — подпрограмма для выделения кода стандартного символа S-строки;

СКАН 24 — подпрограмма для формирования допустимого диапазона изменения кодов И(12,2) для каждой строки матриц предшествования;

ERR1 — диагностическое сообщение

ЗАПИСЬ (№ записи) НЕ УКАЗАН МЕТОД ОБСЛЕДОВАНИЯ;

ERR2 — диагностическое сообщение

ЗАПИСЬ (№ записи) СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА.

Описание блок-схемы. После формирования диапазона допустимых кодов (1) для каждой строки матрицы предшествования, самих матриц и задания начального значения номера записи NY (блоки 1—4) начинается просмотр стандартных символов S -строки (блоки 5—6). Если код стандартного символа равен 64, т. е. соответствует названию болезни, то переходим к стандартному

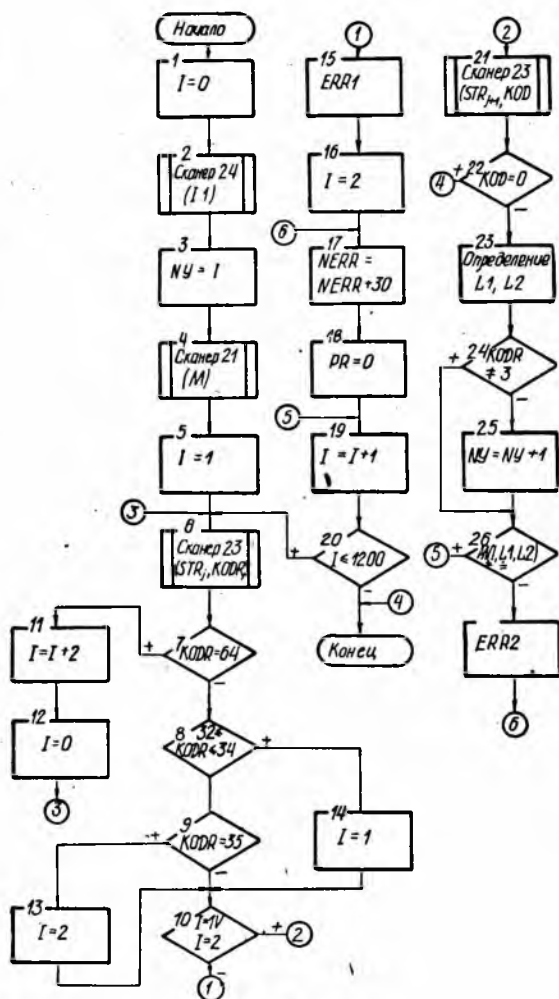


Рис. 2

символу, соответствующему методу обследования (блоки 7—12). Если код не равен 64, то проверяем, соответствует ли очередной символ методу обследования, если «нет», то проверяем $ERR1$, если «да», то определяем номер метода ($I = 1$ или $I = 2$) (блоки 7—10, 13—16). При наличии $ERR1$ предполагаем, что $I = 2$, признак наличия ошибок PR устанавливаем в 0 и переходим к анализу очередного стандартного символа (блоки 16—20). При ответствии $ERR1$ после

проверки на конец S-строки (блок 22) определяем номер строки и столбца в матрице предшествования M , соответствующих j и $j+1$ стандартным символам (блок 23). Одновременно, если STR соответствует символу «;», то изменяем номер записи NY (блок 25).

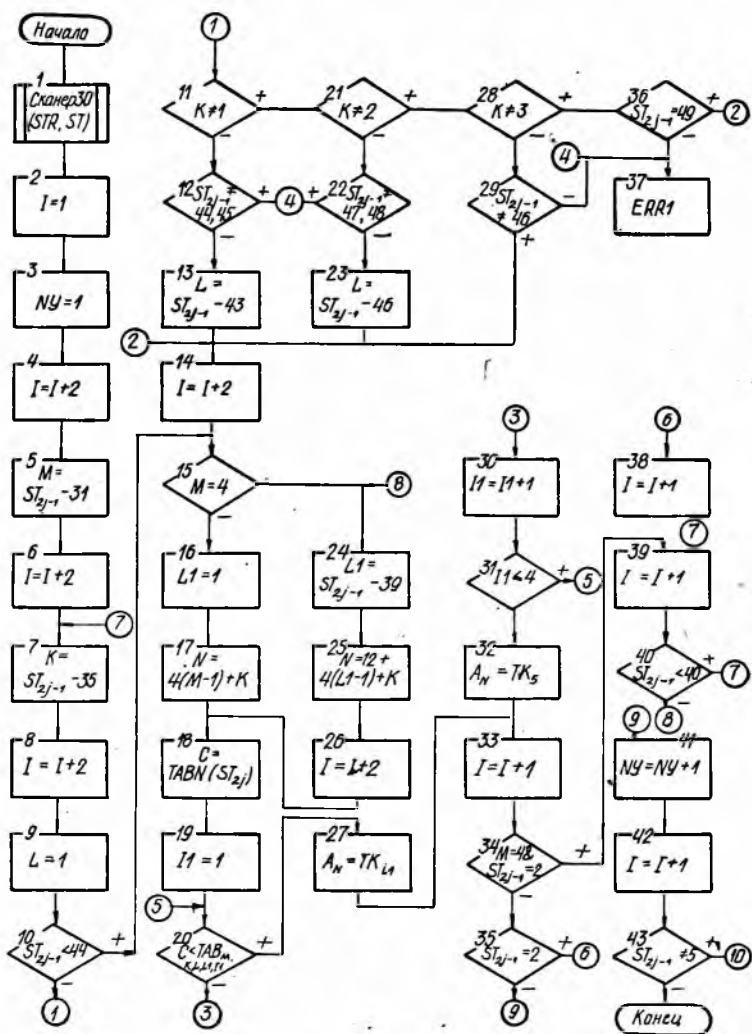


Рис. 3

Если соответствующий элемент матрицы предшествования равен «истине», что соответствует символу \equiv , то переходим к анализу очередной пары символов (блоки 26, 19—20). Если «лжи», что соответствует отсутствию символа \equiv , то формируется **ERR2** (блок 6) и выполняется переход к блокам для обработки ошибок (блоки 17—18).

Просмотр элементов S-строки завершается, если достигнут признак конца S-строки ($KOD = 0$); обработаны все элементы S-строки ($j_{max} = 1200$).

Блок-схема БФС приведена на рис. 3.

Обозначения, принятые на блок-схеме:

- j — номер элемента S-строки;
 STR — S-строка;
 $KOD(1)$ — код стандартного символа S-строки;
 $KOD(2)$ — номер числа в таблице чисел $TABN$;
 ST — имя «распакованной» S-строки;
 M — номер метода

$$M = \begin{cases} 1, & \text{общий метод,} \\ 2, & \text{левая сторона, капельный метод,} \\ 3, & \text{правая сторона, капельный метод,} \\ 4, & \text{метод плетизмографии;} \end{cases}$$

K — номер компоненты

$$K = \begin{cases} 1, & \text{сладкое,} \\ 2, & \text{кислое,} \\ 3, & \text{соленое,} \\ 4, & \text{горькое;} \end{cases}$$

L — номер эталона

$$L = \begin{cases} 1 & \text{сахар, винная кислота, соляная кислота,} \\ & \text{хинин солянокислый,} \\ 2 & \text{глюкоза, соляная кислота;} \end{cases}$$

NY — номер записи;

A — выходной массив, состоящий из элементов типа $LTLT, LESS, \dots$

N — номер элемента в массиве A ($N = 1, 2, \dots, 28$);

TAB — таблица исходных данных, размерность массива равна 5, первый индекс определяет номер метода (M).

второй — номер компоненты (K),

третий — номер эталона (L),

четвертый — параметр времени ($L1$)

пятый — номер интервала ($I1$);

$I1$ — номер интервала в TAB ($I1 = 1, 2, \dots, 5$);

C — число, значение которого определяется из таблицы чисел;

TK — массив кодов (уровней отклонений от нормы $LTLT, LESS, NORM, MORE, GTGT$);

$L1$ — номер компоненты времени для метода плетизмографии

$$L1 = \begin{cases} 1, & \text{появление реакции,} \\ 2, & \text{едвиг максимальный,} \\ 3, & \text{длительность реакции,} \\ 4, & \text{величина реакции;} \end{cases}$$

$ERR1$ — диагностическое сообщение

ЗАПИСЬ (№ записи) ОШИБКА В ЗАДАНИИ ЭТАЛОНА.

Описание блок-схемы.

Блок 1 — «распаковка» S-строки, т. е. запись кода и номера числа в $TABN$ для каждого символа S-строки в слово;

Блоки 2 и 3 — задание начальных значений I, NY ;

Блоки 4 и 5 — определение метода;

Блоки 6—13, 21—23, 28, 29, 36 — определение номера компоненты;

Блок 37 — формирование диагностического сообщения $ERR1$, и аварийного выхода из подпрограммы (КОНЕЦ!);

Блоки 16 и 17 — формирование индекса элемента в массиве A для общего и капельного методов;

Блоки 24—26 — формирование индекса элемента в массиве A для метода плетизмографии;

Блоки 18—20, 27, 30—32 — формирование элемента массива A;
 Блоки 33—35, 38—40 — переход к анализу новой компоненты, если она есть;
 Блоки 41—43 — переход к анализу нового метода, если он есть,
 и успешный выход из подпрограммы, если все методы исчерпаны.

При разработке транслятора программы собирались и тестировались снизу вверх. Ниже приведены примеры тестирования транслятора для случаев отсутствия и наличия ошибок в исходном тексте.

Пример 1.

НОМЕР НОМЕР
 СТРОКИ ЗАПИСИ

1	1	САХАРНЫЙ ДИАБЕТ *L
2	1	ОБЩИЙ МЕТОД:
3	1	КИСЛОЕ: ВИННАЯ КИСЛОТА: 0.01,
4	1	ГОРЬКОЕ: 0.00007,
5	1	СЛАДКОЕ: ГЛЮКОЗА: 1,5,
6	1	СОЛЕНОЕ: ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ: 0.7;
7	2	*

GTGT NORM MORE NORM
 ТРАНСЛЯЦИЯ УСПЕШНАЯ

Этот пример соответствует случаю отсутствия ошибок в исходном тексте.

ПРИМЕР 2.

НОМЕР НОМЕР
 СТРОКИ ЗАПИСИ

... 1	1	ЗАПИСЬ С ОШИБКАМИ *L
2	1	ОБЩИЙ МЕТОД:
3	1	ГОРЬКОЕ: ГЛЮКОЗА: 0,358,
4	1	КИСЛОЕ: 3.4E—02,
5	1	СЛАДКОЕ: ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ: 0.024,
6	1	СОЛЕНОЕ: 0.038E + 1;*

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ
 ЗАПИСЬ 1 ОШИБКА В ЗАДАНИИ ЭТАЛОНА

Система обнаружила ошибку, связанную с неправильным заданием эталонов для ГОРЬКОЕ и СЛАДКОЕ.

ПРИМЕР 3.

НОМЕР НОМЕР
 СТРОКИ ЗАПИСИ

1	1	ПРОВЕРКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ *L
2	1	МЕТОД ПРОБ: 0.00 000 065, 65 000 000;
3	2	СЛАДКОЕ: 0.023E 1,
4	2	СЛАДКОЕ: 5.37,
5	2	КИСЛОЕ: 5.A31;
6	3	ГОРЬКОЕ: A.531;
7	4	СОЛИНОЕ: 0,537.01;

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

СТРОКА 2 ЛЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНА

(МЕТОД ПРОБ не может быть распознан)

СТРОКА 2 В МАНТИССЕ БОЛЬШЕ 7 ЦИФР

СТРОКА 2 В МАНТИССЕ БОЛЬШЕ 7 ЦИФР

(оба числа, записанные в строке 2, содержат больше 7 цифр в мантиссе)

СТРОКА 5 В ЧИСЛЕ ЗАПРЕЩЕННЫЙ СИМВОЛ

(5.A31 содержит запрещенный символ A)

СТРОКА 7 Л. Е. НЕ ОПРЕДЕЛЕНА

(ключевое слово СОЛИНОЕ написано с ошибкой)

СТРОКА 7 В ЧИСЛЕ БОЛЕЕ ОДНОЙ ТОЧКИ

ЗАПИСЬ 1 НЕ УКАЗАН МЕТОД ОБСЛЕДОВАНИЯ

ЗАПИСЬ 1 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 2 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 2 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 2 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 3 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 3 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 4 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА
ЗАПИСЬ 4 СИНТАКСИЧЕСКАЯ ОШИБКА

Некоторые из указанных синтаксических ошибок являются следствием ошибок в задании ЛЕ, т. е. прежде всего необходимо исправить лексические ошибки.

Транслятор занимает 10638 байтов, для реализации БЛА использован язык АССЕМБЛЕР, а БСА и БФС — язык ФОРТРАН.

Таким образом, данные обследования вкусового анализатора, заданные на языке, близком к общепринятому, переводятся на машинный язык. Эти данные используются для обучения диагностических систем и уточнения диагноза в процессе их функционирования. В ходе трансляции отыскиваются ошибки в задании данных. Специальные диагностические сообщения позволяют локализовать эти ошибки и определить их характер.

Список литературы: 1. Качко Е. Г., Марченко Ю. С. Система программирования данных исследования вкусового анализатора. *Сообщение 1.* — Проблемы бионики, 1982, вып. 28, с. 118—121. 2. Donovan Дж. Системное программирование. — М.: Мир, 1975, с. 296—352. 3. Лебедев В. Н. Введение в системы программирования. — М.: Статистика, 1975, с. 232—253.

Поступила в редколлегию 02.03.81.

УДК 681.34

Ю. С. ЗАМАЛЕЕВ

О ПРИМЕНЕНИИ ПЛЕКС-ЯЗЫКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ МАШИН

При решении широкого круга задач, связанных с моделированием бионических процессов на аналоговых, цифровых и гибридных вычислительных устройствах, часто возникает необходимость преобразования структурных схем. Это может быть вызвано, например, исключением из структурной схемы или введением в нее вычислительных блоков (ВБ) или стандартных процедур. В связи с этим в работе [1] показана возможность применения плекс-языка, позволяющего описывать аналоговые структурные схемы и производить построение простых и эффективных алгоритмов преобразования таких структурных схем.

Остановимся на основных определениях и понятиях теории плекс-языков [1, 2]. Плекс-элементом является абстрактный сим-

вол, имеющий любое число контактов. Плекс-элементы соответствуют элементам структуры объекта. Соединение конкатенация плекс-элементов дает и абстрактное представление структуры в виде плекса.

Плекс — это результат соединения конкатенации плекс-элементов и связей между ними.

Число плекс-элементов, содержащихся в плексе, называется объемом $|P|$ плекса P . Упорядоченная четверка $\langle S, A, B, R \rangle$ называется формальной плекс-грамматикой G . Здесь S — начальный символ; $S \in B$; A — алфавит терминальных плекс-элементов; B — алфавит вспомогательных плекс-элементов; R — множество правил вывода вида $P_1 \rightarrow \psi P_2$, где ψ есть подстановка плекса P_2 вместо P_1 .

Если алфавит плекс-элементов — A , то A^+ является множеством всевозможных плексов над алфавитом A . Тогда плекс над алфавитом A запишется следующим образом:

$$P = \Gamma A_1 A_2 \dots A_i \dots A_n.$$

Такая запись называется приведенным представлением плекса и является одним из способов его кодирования. Здесь $A_i \in A$, где A_i есть плекс-элемент. Γ — это матрица конкатенации: $\Gamma = \|\gamma_{ij}\|$, где γ_{ij} — гипероперация конкатенации плекс-элементов; $\gamma_{ij} = E_i \times E_j$. Здесь E_i и E_j представляют собой множества контактов плекс-элементов A_i и A_j .

Γ -матрица содержит избыточную информацию, расположенную ниже ее главной диагонали. Поэтому Γ -матрицу еще представляют списком, в котором последовательно записываются строки Γ -матрицы, несущие полезную информацию. Но список тоже содержит некоторый избыток информации. Поэтому наиболее рационально и компактно сеть связей представлять Γ -вектором. Любая компонента Γ -вектора содержит четыре элемента, разделенных запятыми: 1-й элемент — номер ВВ, выход которого подсоединяется; 2-й элемент — номер выхода этого ВВ (при одном выходе, последний обозначается через нуль); 3-й элемент — номер последующего ВВ, к которому подсоединяется выход предыдущего ВВ; 4-й элемент — номер входа последующего ВВ.

Применим описанные выше правила и определения к описанию структурных схем цифровых интегрирующих машин, построенных на основе однородных структур. Последние содержат однотипные универсальные обобщенные цифровые интеграторы (ЦИ) с «жесткой» структурой и элементарные коммутирующие элементы и выполняются на основе твердых схем микрорадиоэлектроники [3]. В качестве основного решающего блока такой однородной цифровой интегрирующей структуры был предложен адаптивный ЦИ [4]. Последний реализует процесс численного интегрирования по Стилтесу с регулированием погрешности и времени вычислений.

На рис. 1 приведена обобщенная блок-схема адаптивного ЦИ, содержащая следующие элементы: два сумматора (Σ_1 и Σ_2); непосредственно адаптивный ЦИ; квантователь (К); экстраполятор приращений (\mathcal{E}).

Прототипом данной схемы является блок-схема обобщенно-го универсального ЦИ с «жесткой» структурой.

Запишем плекс-схемы (рис. 1). При этом под понятием «ВБ» подразумеваем операционные элементы структуры адаптивного ЦИ:

$$P_1 = \Gamma_1 \Sigma_1 \Sigma_2 ИКЭ,$$

где Σ_1 , Σ_2 , И, К, Э являются идентификаторами соответственно сумматоров, внутренней структуры адаптивного ЦИ, квантователя и экстраполятора, а Γ_1 представляет собой Γ -вектор, списывающий схему соединения операционных элементов.

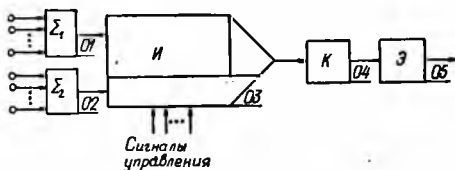


Рис. 1

Для нумерации блоков и составления Γ -вектора перенумеруем плекс-элементы плекса P_1 и номера блоков нанесем на схему (рис. 1):

$$P_1 = \Gamma_1 \overset{1}{\Sigma_1} \overset{2}{\Sigma_2} \overset{3}{И} \overset{4}{К} \overset{5}{Э}.$$

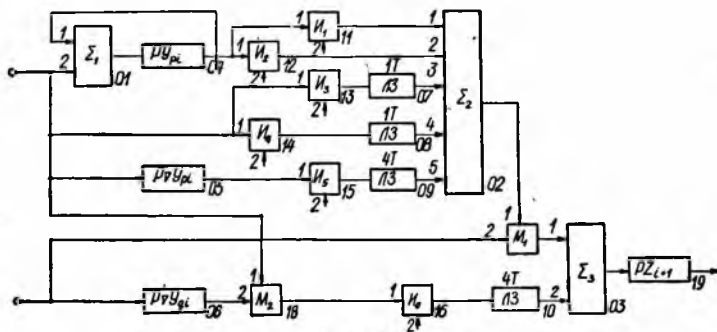


Рис. 2

Составим Γ -вектор:

$$\Gamma_1 = \{1, 0, 3, 1; 2, 0, 3, 2; 3, 0, 4, 1; 4, 0, 5, 1\}.$$

Плекс-элемент Э имеет одну точку примыкания, посредством которой соединяется с плекс-элементом К, поэтому Γ -вектор в данном случае содержит четыре компоненты.

Рассмотрим теперь внутреннюю структуру адаптивного ЦИ, представленную на рис. 2 [4]. Плекс этой схемы запишется следующим образом:

$$P_u = \Gamma_u \Sigma_1 \Sigma_2 \Sigma_3 \text{ ПУП}_{\rho\tau} \text{ ПУП}_{\nu\mu} \text{ ПУП}_{q\omega} \text{ ЛЗ1Т ЛЗ1Т ЛЗ4Т ЛЗ4Т И}_1 \text{ И}_2 \text{ М}_1 \times$$

$\times M_2 PZ_{(i+1)}$.

Здесь Σ_j , PY_{pi} , $P_{\nabla}Y_{pi}$, $P_{\nabla}Y_{qi}$, $L31T_j$, $L34T_j$, I_j , M_j , $PZ_{(i+1)}$ являются идентификаторами соответственно сумматоров, регистров подынтегральной функции, регистров приращений подынтегральной функции, регистров приращения переменной интегрирования, линий задержек одноктактных и четырехтактных, элементов И, схем перемножения, регистра приближенного значения интеграла.

Перенумеруем плекс-элементы:

$$P_n = \Gamma_n \sum_1^1 \sum_2^2 \sum_3^3 P Y_{pi} P_{\nabla} Y_{pi} P_{\nabla} Y_{qi} L31T L31T L34T \\ L34T I_1 I_2 I_3 I_4 I_5 I_6 M_1 M_2 PZ_{(i+1)}.$$

На схему (рис. 2) нанесем номера элементов и номера их входов. Γ -вектор данной схемы запишется следующим образом:

$$\Gamma_n = \{1, 0, 4, 1; 2, 0, 17, 1; 3, 0, 19, 1; 4, 0, 1, 1; 4, 0, 11, 1; \\ 4, 0, 12, 1; 5, 0, 15, 1; 6, 0, 18, 2; 7, 0, 2, 3; 8, 0, 2, 4; \\ 9, 0, 2, 5; 10, 0, 3, 2; 11, 0, 2, 1; 12, 0, 2, 2; 13, 0, 7, 1; \\ 14, 0, 8, 1; 15, 0, 9, 1; 16, 0, 10, 1; 17, 0, 3, 1; 18, 0, 16, 1\}.$$

Таким образом, полученные плексы, описывающие структурные схемы и соответствующие плексам Γ -векторы, которые описывают сеть связей операционных элементов внутри схемы, позволяют компактно задавать структуры цифровых интегрирующих машин.

Список литературы: 1. Сенченко Н. И., Терещенко А. П., Якушев Ю. Н. Применение одного класса языков для описания и преобразования структурных схем гибридных вычислительных систем.— В кн.: Электронное моделирование. Киев: Наук. думка, 1980, с. 20—24. 2. Николаев В. И., Анкудинов Г. И. Определение и всевозможные применения контекстно-свободных плекс-языков.— Автоматизир. системы упр., 1976, вып. 3, с. 3—6. 3. Каляев А. В. Теория цифровых интегрирующих машин и структур.— М.: Сов. радио, 1970. — 471 с. 4. Мурашко А. Г., Замалеев Ю. С. Структура адаптивной мультипроцессорной вычислительной системы.— Проблемы бионики, 1979, вып. 22, с. 17—24.

Поступила в редколлегию 01.04.81.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Сарнавский Н. Г., Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Шляхов В. В.</i> Исследование свойств предиката дифункциональности	3
<i>Бондаренко М. Ф., Маленченко С. И.</i> Метод формирования грамматических категорий по смысловым оттенкам морфем	9
<i>Осыка А. Ф., Буркова Н. М., Шаронова Н. В.</i> Математическая модель фрагментированных суффиксов глаголов русского языка	12
<i>Бузницкая Э. М., Дима З. В., Чикина В. А.</i> Формальное описание процессов суффиксального формообразования и словоизменения причастий русского языка	19
<i>Лазаренко О. В.</i> О математическом описании именного приставочного словообразования	23
<i>Чен Р. Н.</i> Об алгоритме исправления ошибок орфографии с использованием метода корректирующего словаря	31
<i>Соловьева Е. А., Жуков О. А.</i> Исследование фрагментов лексической семантики русского глагола	36
<i>Судаков Б. Н.</i> О формализованной модели языка для взаимодействия пользователя с ЭВМ	43
<i>Кацалан С. Ф.</i> Дифференциальные методы обнаружения при аффинных преобразованиях объектов	47
<i>Кривуля Г. Ф., Пилипенко Н. И., Штец Л. К., Сердюченко В. Я.</i> Диагностическая модель почки	53
<i>Колотенко Г. А.</i> Моделирование веса множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга гауссовым распределением	60
<i>Горго Ю. П., Рубцов Ю. Б.</i> Автоматический комплекс оценки психофизиологического состояния оператора по параметрам ЭКГ	67
<i>Ропавка А. И.</i> Двойственные экстремальные принципы в задачах параболического типа	74
<i>Милосердов В. Б.</i> Решение уравнений параболического типа на гибридных вычислительных системах с высокой точностью	77
<i>Трашугин С. И.</i> Гибридное решение интегральных уравнений некоторыми итерационными методами с высокой точностью	80
<i>Быкова Е. В.</i> Об одном подходе к построению модели оценки качества функционирования сложной иерархической системы	83
<i>Ярушек В. Е.</i> О формализованной модели для планирования действий управляемых объектов в динамической среде	88
<i>Бондаренко М. Ф., Маленченко С. И.</i> О введении буквенных переменных для математической записи русских слов	95
<i>Филиппенко И. Г., Самсонкин В. Н.</i> Анализ погрешностей разностного уравнения регулирования движения	100
<i>Рось А. А.</i> Принципы построения системы автоматизированного синтеза управляющих алгоритмов	103
<i>Василик П. В., Кривова О. А., Попов А. А.</i> Моделирование дыхательной ритмики	109
<i>Качко Е. Г., Марченко Ю. С.</i> Система программирования данных исследования вкусового анализатора. Сообщение 2	114
<i>Замалеев Ю. С.</i> О применении плекс-языка для описания структурных схем цифровых интегрирующих машин	125