МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

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

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник

Основан в 1968 г.

ВЫПУСК 46

Харьков
Издательство «Основа» при Харьковском
государственном университете
1991

СОДЕРЖАНИЕ

УДК 62.506.2

Сборник содержит результаты решения важнейших задач психологической бионики. Представлены модели и методы построения некоторых сенсорных систем: модели языка, речи, восприятия. Освещены вопросы имитационного моделирования и обработки биомедицинской информации.

Для научных работников и специалистов.

Адрес редакционной коллегии: 310726 Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники, тел. 40-94-46

Редакция естественнонаучной литературы
Зав. редакцией *Е. П. Иващенко*

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Выпуск 46

Редактор *О. И. Григорьян*
Художественный редактор *Т. П. Короленко*
Технический редактор *Г. П. Александрова*
Корректор *В. М. Бурейко*

ИБ №

Сдано в набор 24.12.90. Подписано в печать 29.11.91. Формат 60×90/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9. Усл. кр.-отт. 9,25. Уч.-изд. л. 11,6. Тираж 600 экз. Зак. 1443. Цена 2 р. 30 к.

Издательство «Основа» при Харьковском государственном университете. 310005 Харьков, пл. Восстания, 17.

Харьковская городская типография № 16.
310003 Харьков, ул. Университетская, 16.

П $\frac{1402080000-088}{М226(04)-91}$ 49-91

УДК 510.62

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

ЛОГИЧЕСКАЯ АЛГЕБРА

Пусть G — непустое множество, называемое *логическим полем* (кратко — просто *полем*). Элементы множества G будем называть *логическими скалярами* (кратко — просто *скалярами*). Скаляры будем обозначать строчными греческими буквами. На множестве $G\times G$ определена операция $\alpha\vee\beta$ со значениями в множестве G, называемая *дизъюнкцией* или *логическим сложением* (кратко — просто *сложением*) скаляров α и β. Для сложения скаляров выполняются следующие аксиомы: *закон идемпотентности* — для любого $\alpha\in G$

$$\alpha\vee\alpha=\alpha, \tag{1}$$

закон коммутативности — для любых α, $\beta\in G$

$$\alpha\vee\beta=\beta\vee\alpha, \tag{2}$$

закон ассоциативности — для любых α, β, $\gamma\in G$

$$\alpha\vee(\beta\vee\gamma)=(\alpha\vee\beta)\vee\gamma, \tag{3}$$

закон нуля — существует *единственный элемент* $0\in G$, такой, что для любого $\alpha\in G$

$$0\vee\alpha=\alpha, \tag{4}$$

закон единицы — существует единственный элемент $1\in G$, такой, что для любого $\alpha\in G$

$$1\vee\alpha=1. \tag{5}$$

Скаляр 0 называется *нулевым скаляром* или *нулем* поля G, скаляр 1 — *единичным скаляром* или *единицей* поля G. Из того, что нулевой скаляр, удовлетворяющий условию (4), существует, и из закона коммутативности (2) следует, что он единственный. В самом деле, пусть существуют два нулевых скаляра $0'$ и $0''$, так что для любого $\alpha\in G$ имеем $0'\vee\alpha=\alpha$ и $0''\vee\alpha=\alpha$. В частности, $0'\vee0''=0''$ и $0''\vee0'=0'$. В силу (2) отсюда вытекает $0'=0''$, что и требовалось доказать. Таким образом, требование единственности можно исключить из закона нуля без уменьшения логической силы системы аксиом (2), (4). Из того, что единичный скаляр, удовлетворяющий условию (5), существует, и из закона коммутативности (2) следует, что он единственный. В самом деле, пусть существуют два единичных скаляра $1'$ и $1''$, так что для любого $\alpha\in G$ имеем $1'\vee\alpha=1'$ и $1''\vee\alpha=1''$. В частности, $1'\vee1''=1'$ и $1''\vee1'=1''$. В силу (2) отсюда вытекает $1'=1''$, что и требовалось доказать. Таким образом, требование единственности можно исключить из закона единицы без уменьшения логической силы системы аксиом (2), (5).

На множестве $G \times G$ определена операция $\alpha \wedge \beta = \alpha\beta$ со значениями в множестве G, называемая *конъюнкцией* или *логическим умножением* (кратко — просто *умножением*) *скаляров* α и β. Для умножения скаляров выполняются следующие аксиомы:
закон идемпотентности — для любого $\alpha \in G$

$$\alpha\alpha = \alpha, \tag{6}$$

закон коммутативности — для любых $\alpha, \beta \in G$

$$\alpha\beta = \beta\alpha, \tag{7}$$

закон ассоциативности — для любых $\alpha, \beta, \gamma \in G$

$$\alpha(\beta\gamma) = (\alpha\beta)\gamma, \tag{8}$$

закон нуля — для любого $\alpha \in G$

$$0 \cdot \alpha = 0, \tag{9}$$

закон *единицы* — для любого $\alpha \in G$ $1 \cdot \alpha = \alpha$ **(10)**.

Следующие аксиомы связывают сложение и умножение скаляров:
законы дистрибутивности — для любых $\alpha, \beta, \gamma \in G$

$$\alpha(\beta \vee \gamma) = \alpha\beta \vee \alpha\gamma \quad \mathbf{(11)}, \quad \alpha \vee \beta\gamma = (\alpha \vee \beta)(\alpha \vee \gamma) \quad \mathbf{(12)},$$

законы элиминации — для любых $\alpha, \beta \in G$

$$\alpha \vee \alpha\beta = \alpha \quad \mathbf{(13)}, \quad \alpha(\alpha \vee \beta) = \alpha \quad \mathbf{(14)}.$$

На множестве G определена одноместная операция $\bar{\alpha}$ со значениями в множестве G, называемая *отрицанием скаляра* α. Для отрицания скаляра выполняются следующие аксиомы:

закон двойного отрицания — для любого $\alpha \in G$ $\bar{\bar{\alpha}} = \alpha$ **(15)**, *закон отрицания нуля* — $\bar{0} = 1$ **(16)**, *закон отрицания единицы* — $\bar{1} = 0$ **(17)**.

Следующие аксиомы связывают отрицание со сложением и умножением скаляров:
закон исключенного третьего — для любого $\alpha \in G$ $\alpha \vee \bar{\alpha} = 1$ **(18)**,
закон противоречия — для любого $\alpha \in G$ $\alpha\bar{\alpha} = 0$ **(19)**,
законы де Моргана — для любых $\alpha, \beta \in G$

$$\overline{\alpha \vee \beta} = \bar{\alpha}\bar{\beta} \quad \mathbf{(20)}, \quad \overline{\alpha\beta} = \bar{\alpha} \vee \bar{\beta} \quad \mathbf{(21)}.$$

Законы (1)—(21) будем называть *аксиомами поля*. Рассматривая логическое поле как абстрактную алгебраическую систему, его можно отождествить с *булевой алгеброй* [1, с. 19]. Не все аксиомы поля логически независимы друг от друга. Оставив только шесть аксиом (1)—(3), (11), (15), (20) и присовокупив к ним еще одну аксиому — для любых $\alpha, \beta \in G$ $(\alpha \vee \bar{\alpha})\beta = \beta$ **(21а)**, получаем более экономную систему аксиом, равносильную исходной [2, с. 135]. Отметим, что привлечение операции умножения скаляров при определении понятия логического поля необязательно, поскольку эту операцию можно выразить через операции дизъюнкции и отрицания посредством равенства $\alpha\beta=\overline{\bar\alpha\vee\bar\beta}$ **(21 б)**, вытекающего из (21) и (15). Реализуя эту возможность, можно определить логическое поле как множество G, на котором заданы операции $\vee$ и —, удовлетворяющие аксиомам (1) — (3), (11), (15) и (21, *а*). Тождество (20) в перечень аксиом можно не включать, поскольку оно вытекает из определения (21 *б*) и аксиомы (15). Из аксиом (11) и (21 *а*) нужно исключить знак конъюнкции с помощью равенства (21 *б*). Сделав это, аксиому (11) переписываем в виде $\overline{\bar\alpha\vee\overline{\beta\vee\gamma}}=\overline{\bar\alpha\vee\bar\beta}\vee\overline{\bar\alpha\vee\bar\gamma}$ **(21 в)**, а аксиому (21 *а*) — в виде $\overline{\overline{\alpha\vee\bar\alpha}\vee\bar\beta}=\beta$ **(21 г)**.

Примером поля является *алгебра логики* [3, с. 7], представляющая собой множество $\{0, 1\}$ с заданными на нем операциями дизъюнкции $0\vee0=0$, $0\vee1=1$, $1\vee0=1$, $1\vee1=1$, конъюнкции $0\cdot0=0$, $0\cdot1=0$, $1\cdot0=0$, $1\cdot1=1$ и отрицания $\bar0=1$, $\bar1=0$. Нетрудно убедиться, что все аксиомы поля в алгебре логики выполняются. Другим примером поля может служить *алгебра конечных предикатов* [4, с. 15]. В ней в роли множества G выступает система всех предикатов, заданных на каком-нибудь множестве букв. В роли операций $\vee$, $\wedge$ и $^{-}$ выступают дизъюнкция, конъюнкция и отрицание предикатов. Еще одним примером поля может служить *алгебра множеств* [5, с. 28]. В ней роль множества G выполняет система всех подмножеств универсального множества. В роли операции сложения скаляров выступает объединение множеств, в роли операции умножения — пересечение множеств, в роли операции отрицания — дополнение множества.

Пусть M — непустое множество, называемое *логическим векторным пространством* над полем G (кратко — *векторное пространство, логическое пространство* или просто *пространство*). Элементы множества M будем называть логическими векторами (кратко — просто *векторами*). Векторы будем обозначать строчными латинскими буквами. На множестве $M\times M$ определена операция $a\vee b$ со значениями в множестве M, называемая *дизъюнкцией* или *логическим сложением* (кратко — просто *сложением*) *векторов* a и b. Для сложения векторов выполняются следующие аксиомы:

закон идемпотентности — для любого $a\in M$

$$a\vee a=a, \tag{22}$$

закон коммутативности — для любых a, $b\in M$

$$a\vee b=b\vee a, \tag{23}$$

закон ассоциативности — для любых a, b, $c\in M$

$$a\vee(b\vee c)=(a\vee b)\vee c, \tag{24}$$

закон нуля — существует единственный элемент $0 \in M$ такой, что для любого $a \in M$

$$0 \vee a = a, \tag{25}$$

закон единицы — существует единственный элемент $1 \in M$, такой, что для любого $a \in M$

$$1 \vee a = 1. \tag{26}$$

Вектор 0 называется *нулевым вектором* или *нулем* пространства M, вектор 1 называется *единичным вектором* или *единицей* пространства M. Из того, что нулевой вектор, удовлетворяющий условию (25), существует, и из закона коммутативности (23) следует, что он единственный. То же справедливо и для единичного вектора. Доказательства этих утверждений аналогичны тем, которые приведены выше при установлении единственности нулевого и единичного скаляров. Таким образом, требование единственности можно исключить из законов нуля (25) и единицы (26) без уменьшения логической силы систем аксиом (23), (25) и (23), (26).

На множестве $G \times M$ определена операция $\alpha \wedge a = \alpha a$ со значениями в множестве M, называемая *конъюнкцией* или *логическим умножением* (кратко — просто *умножением) скаляра* α *на вектор* a. Операции умножения скаляров и умножения скаляра на вектор связывает друг с другом следующая аксиома:

закон ассоциативности — для любых $\alpha, \beta \in G$ и любого $a \in M$

$$(\alpha\beta) a = \alpha (\beta a). \tag{27}$$

Операции сложения скаляров и векторов и умножения вектора на скаляр связывают аксиомы:

закон левой дистрибутивности — для любых $\alpha, \beta \in G$ и любого $a \in M$

$$(\alpha \vee \beta) a = \alpha a \vee \beta a, \tag{28}$$

закон правой дистрибутивности — для любого $\alpha \in G$ и любых $a, b \in M$

$$\alpha (a \vee b) = \alpha a \vee \alpha b, \tag{29}$$

закон нуля — для любого $a \in M$

$$0 \cdot a = 0, \tag{30}$$

закон единицы — для любого $a \in M$

$$1 \cdot a = a. \tag{31}$$

Законы (1)—(31) будем называть *аксиомами пространства*. Операции сложения скаляров и векторов обозначаются нами одним и тем же знаком $\vee$. Такая омонимичность знака сложения не приводит, однако, к путанице, поскольку его смысл легко уточняется по контексту. То же относится к операциям умножения скаляров и умножения скаляра на вектор, а также к нулевым (единичным) скаляру и вектору.

Логическое пространство будем еще иначе называть *логической алгеброй*. Логическая алгебра имеет некоторое сходство с *линейной алгеброй* [6]. Введенному нами понятию логического пространства соответствует в линейной алгебре понятие *линейного пространства*. Науку, изучающую свойства линейного пространства, иногда называют *линейным анализом* [7]. По аналогии с этим учение о свойствах логического пространства будем называть *логическим анализом*. Термин «логический анализ» употребляет также Рассел [8, с. 842], понимая под ним науку, изучающую логическими средствами философские проблемы. Одной из таких проблем является изучение природы интеллекта. Нам представляется, что логическая алгебра может служить тем математическим аппаратом, с помощью которого можно будет успешно вести такое изучение. Логическая алгебра представляет собой результат развития алгебры идей [9—13], являющейся абстрактным эквивалентом алгебры конечных предикатов.

$y \backslash x$	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	b	b	d	d
c	c	d	c	d
d	d	d	d	d

$x \vee y$

Рассмотрим пример логической алгебры, которую обозначим символом A_0. Пусть $G_0=\{0, 1\}$, $M_0=\{a, b, c, d\}$. Принимаем, что операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания скаляров совпадают с одноименными операциями алгебры логики. Операция дизъюнкции $x \vee y$ векторов x и y задана таблицей. Роль нуля играет вектор a, поскольку $a \vee x=x$ для любого $x \in M_0$. Роль единицы выполняет вектор d, поскольку $d \vee x=d$ для любого $x \in M_0$. Таким образом, $a=0$, $d=1$. Операция умножения скаляра на вектор в алгебре A_0 определяется законами нуля $0 \cdot x=0$ и единицы $1 \cdot x=x$, где x — произвольный вектор из M_0. Непосредственной проверкой убеждаемся, что при таком определении логической алгебры A_0 все аксиомы пространства выполняются. Отсюда следует, что система аксиом (1)—(31) непротиворечива.

Комбинацией векторов $a_1, a_2, \ldots, a_m$ (не обязательно различных) называется вектор u, равный

$$u=\alpha_1 a_1 \vee \alpha_2 a_2 \vee \ldots \vee \alpha_m a_m=\bigvee_{k=1}^{m} \alpha_k a_k.$$

Здесь $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$ — какие-нибудь скаляры, называемые *коэффициентами* комбинации. Например, в алгебре A_0 вектор $u=0 \cdot b \vee 1 \cdot b \vee 1 \cdot c=b \vee c=d$ является комбинацией векторов $a_1=b$, $a_2=b$, $a_3=c$. Коэффициентами комбинации здесь служат скаляры $\alpha_1=0$, $\alpha_2=1$, $\alpha_3=1$.

Комбинация комбинаций векторов $a_1, a_2, \ldots, a_m$, очевидно, снова будет комбинацией тех же векторов. Например, пусть в алгебре A_0 векторы u и v являются следующими комбинациями векторов a, b, c: $u=0 \cdot a \vee 1 \cdot b \vee 0 \cdot c$, $v=1 \cdot a \vee 0 \cdot b \vee 0 \cdot c$. Пусть вектор

w, в свою очередь, есть комбинация векторов u и v: $w=1\cdot u\vee 0\cdot v$. Тогда вектор w тоже будет комбинацией векторов

$$a,\ b,\ c: w=1\cdot(0\cdot a\vee 1\cdot b\vee 0\cdot c)\vee 0\cdot(1\cdot a\vee 0\cdot b\vee 0\cdot c)=$$

$$=1\cdot 0\cdot a\vee 1\cdot 1\cdot b\vee 1\cdot 0\cdot c\vee 0\cdot 1\cdot a\vee 0\cdot 0\cdot b\vee 0\cdot 0\cdot c=$$

$$=0\cdot a\vee 1\cdot b\vee 0\cdot c\vee 0\cdot a\vee 0\cdot b\vee 0\cdot c=(0\vee 0)\,a\vee(1\vee 0)\,b\vee(0\vee 0)\,c=$$

$$=0\cdot a\vee 1\cdot b\vee 0\cdot c.$$

Комбинация векторов называется *тривиальной*, если все ее коэффициенты равны нулю, и *нетривиальной* — в противном случае. Тривиальная комбинация любых векторов, очевидно, равна нулю. В только что приведенном примере векторы u, v, w являются нетривиальными комбинациями векторов a, b, c.

Если вектор u является комбинацией векторов a_1, a_2, ..., a_m. то будем говорить, что он от них *зависит*. Нулевой вектор, очевидно, зависит от любой непустой совокупности векторов. Если вектор u невозможно представить в виде какой бы то ни было комбинации векторов a_1, a_2, ..., a_m, то скажем, что он от них *независим*. О непустой системе векторов $\{a_k\}_{k=1}^{m}=\{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$ говорим, что она *независима*, если каждый из векторов, входящих в систему, не зависит от остальных ее векторов. Любую систему, состоящую из одного ненулевого вектора, считаем по определению независимой. Вектор 0, очевидно, не входит ни в какую независимую систему векторов, в которой содержатся ненулевые векторы. Если хотя бы один из векторов, входящих в систему, зависит от остальных ее векторов, то будем говорить, что такая система векторов *зависима*. Если совокупность векторов $\{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$ независима, а совокупность векторов $\{a_1, a_2, \ldots, a_m, a_{m+1}\}$ зависима, то, очевидно, вектор a_{m+1} есть комбинация векторов a_1, a_2, ..., a_m. Ясно также, что каждая подсистема независимой системы векторов тоже будет независимой. Образно говоря, независимость системы векторов является «наследственным» свойством. Например, в алгебре A_0 система всех ее векторов $\{a, b, c, d\}$ зависима, поскольку $0\cdot b\vee 0\cdot c=a$, $1\cdot b\vee 1\cdot c=d$. Система же векторов $\{b, c\}$ независима, так как вектор c не зависит от вектора b $(0\cdot b=a$, $1\cdot b=b)$, а вектор b не зависит от вектора c $(0\cdot c=a$, $1\cdot c=c)$. Подсистемы $\{b\}$ и $\{c\}$ системы векторов $\{b, c\}$ независимы.

Совокупность векторов называется *порождающей*, если все векторы пространства M являются их комбинациями. Например, в алгебре A_0 порождающими будут следующие совокупности векторов: $\{a, b, c, d\}$, $\{a, b, c\}$, $\{b, c, d\}$, $\{b, c\}$. Других порождающих совокупностей в алгебре A_0 нет. Любая минимальная (по числу векторов) порождающая совокупность векторов независима. Действительно, пусть $\{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ — минимальная порождающая совокупность векторов. Если она зависима, то хотя бы один из векторов, скажем a_n, есть комбинация остальных векторов a_1, a_2, ..., a_{n-1}, и поэтому любая комбинация векторов a_1, a_2, ..., a_{n-1} есть комбинация меньшей совокупности векторов $\{a_1, a_2, ..., a_{n-1}\}$, которая тем самым оказывается порождающей. Например, в алгебре A_0 минимальной порождающей совокупностью векторов является множество $\{b, c\}$, вместе с тем эта совокупность независима. Любая максимальная (по числу векторов) независимая совокупность векторов является порождающей. Действительно, пусть $\{a_1, a_2, ..., a_n\}$ — максимальная независимая совокупность и b — любой вектор пространства. Тогда совокупность $\{a_1, a_2, ..., a_n, b\}$ не будет независимой и вектор b есть комбинация векторов $a_1, a_2, ..., a_n$. Например, в алгебре A_0 максимальной независимой совокупностью является множество $\{b, c\}$, вместе с тем эта совокупность порождающая.

Логическое пространство M называется *конечномерным*, если в нем существует конечное число r векторов $e_1, e_2, ..., e_r$, через которые можно выразить в виде

$$x = \bigvee_{i=1}^{r} \alpha_i e_i \tag{32}$$

любой вектор $x \in M$, где $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_r$ — некоторые коэффициенты. Иными словами, логическое пространство M конечномерно, если для него существует хотя бы одна конечная порождающая система $\{e_1, e_2, ..., e_r\}$. В противном случае логическое пространство называется *бесконечномерным*. Например, пространство M_0 конечномерно, поскольку в нем имеются конечные порождающие системы.

Наименьшее из чисел r, удовлетворяющее условию (32), называется *размерностью* или *числом измерений* логического пространства. Если размерность логического пространства M равна n, то будем говорить, что пространство M n-мерно. Если пространство M n-мерно, то в нем найдется n независимых векторов, а любые $n+1$ векторов этого пространства будут зависимыми. Например, размерность логического пространства M_0 равна двум. Таким образом, пространство M_0 двумерно. В n-мерном логическом пространстве любая порождающая совокупность векторов, содержащая n элементов, называется *базисом*. Например, для пространства M_0 в роли базиса можно использовать совокупность векторов $\{b, c\}$. Других базисов в пространстве M_0 нет. Ясно, что любое конечное логическое пространство конечномерно и в нем существует конечный базис.

Пусть Γ — какая-нибудь непустая система векторов. *Оболочкой* системы Γ называется множество всех комбинаций векторов системы Γ. Оболочка системы Γ обозначается через $L(\Gamma)$. Ясно, что оболочкой, порождающей системы векторов пространства M, является все пространство M. Подсистема Γ_0 системы Γ называется *полной*, если $\Gamma \subseteq L(\Gamma_0)$, т. е. если каждый вектор системы Γ является комбинацией векторов из Γ_0. Каждая подсистема векторов, содержащая полную подсистему, также является полной подсистемой. Полнота тоже является наследственным свойством, но уже по отношению к расширению, а не к сужению системы. Например, в алгебре A_0 оболочкой системы $\{a, d\}$ будет та же система $\{a, d\}$, поскольку $0 \cdot a \vee 0 \cdot d = a \vee a = a$, $0 \cdot a \vee 1 \cdot d = a \vee d = d$, $1 \cdot a \vee 0 \cdot d = a \vee a = a$, $1 \cdot a \vee 1 \cdot d = a \vee d = d$. Оболочкой системы $\{b, c\}$ является все пространство M_0 ($0 \cdot b \vee 0 \cdot c = a \vee a = a$, $1 \cdot b \vee 0 \cdot c = b \vee \vee a = b$, $0 \cdot b \vee 1 \cdot c = a \vee c = c$, $1 \cdot b \vee 1 \cdot c = b \vee c = d$). Множество векторов $\{b, c\}$ является полной подсистемой пространства M_0. Полными подсистемами пространства M_0 будут также множества векторов $\{a, b, c\}$ и $\{b, c, d\}$, поскольку они являются расширениями множества $\{a, b\}$. Множество же $\{a, d\}$ не будет полной подсистемой для пространства M_0.

Список литературы: 1. *Владимиров Д. А.* Булевы алгебры. М., 1969. 318 с. 2. *Мальцев А. И.* Алгебраические системы. М., 1970. 392 с. 3. *Яблонский С. В.* Введение в дискретную математику. М., 1979. 272 с. 4. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 142 с. 5. *Столл Р.* Множества. Логика. Аксиоматические теории. М., 1968. 231 с. 6. *Мальцев А. И.* Основы линейной алгебры. М., 1975. 400 с. 7. *Глазман И. М., Любич Ю. И.* Конечномерный линейный анализ. М., 1969. 475 с. 8. *Рассел Б.* История западной философии. М., 1959. 932 с. 9. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Об алгебре идей. К., 1989. 18 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 136—Ук89. 10. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Изоморфизм алгебр идей. К., 1988. 13 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 2280—Ук88. 11. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Числовая интерпретация алгебры идей. К., 1988. 14 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 2282—Ук88. 12. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Частичный порядок в алгебре идей. К., 1989. 12 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 131—Ук89. 13. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Содержательные интерпретации алгебры идей. К., 1988. 15 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 2283—Ук88.

Поступила в редколлегию 09.01.90

УДК 510.62

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

НЕПОЛНЫЕ И ПОЛНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВА

Пусть M—n-мерное *логическое пространство* [1] над полем G и $\{e_1, e_2, ..., e_n\}$ — его базис. Векторы $e_1, e_2, ..., e_n$ называются базисными. Любой вектор $x \in M$ может быть представлен в виде комбинации базисных векторов

$$x = \xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee ... \vee \xi_n e_n, \tag{1}$$

где $\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n$ — коэффициенты комбинации, называемые *координатами* вектора x. Представление вектора x в виде комбинации (1) базисных векторов $e_1, e_2, ..., e_n$, будем называть его *разложением* по базису $\{e_1, e_2, ..., e_n\}$. При заданном базисе каждый вектор логического пространства однозначно определяется его координатами. Можно ли утверждать обратное, т. е. что при заданном базисе любому вектору x из M соответствует единственный набор координат $(\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n)$? Иными словами, будет ли для каждого вектора разложение по базису единственным? В логической алгебре, в отличие от линейной, такое утверждение, вообще говоря, неверно. Следующий контрпример доказывает это.

Пусть A_1 — логическая алгебра, заданная на множестве векторов $M_1=\{a, b, c\}$ над полем скаляров $G_1=\{0, 1\}$. Операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания скаляров совпадают с одноименными операциями алгебры логики. Операция дизъюнкции $x \vee y$ векторов x и y задана табл. 1. Роль нуля играет вектор a, поскольку $a \vee x=x$ для любого $x \in M_1$. Роль единицы выполняет вектор c, поскольку $c \vee x=c$ для любого $x \in M_1$. Таким образом, $a=0$, $c=1$. Операция умножения скаляра на вектор в алгебре A_1 определяется законами нуля $0 \cdot x=0$ и единицы $1 \cdot x=x$, где x — произвольный вектор из M_1 (табл. 2). Непосредственной проверкой убеждаемся, что при таком определении логической алгебры A_1 все аксиомы логического пространства выполняются. Итак, множество M_1 — это логическое пространство.

Таблица 1

$y \setminus x$	a	b	
a	a	b	c
b	b	b	c
	c	c	c

$x \vee y$

Таблица 2

$\lambda \setminus x$	a	b	c
0	a	a	a
1	a	b	c

λx

В пространстве M_1 имеется единственный базис $\{b, c\}$. Действительно, векторы b и c друг от друга не зависят: $0 \cdot b=a$, $1 \cdot b=b$, $0 \cdot c=a$, $1 \cdot c=c$. Кроме того, все векторы пространства M_1 являются комбинациями векторов b и c: $0 \cdot b \vee 0 \cdot c=a$, $1 \cdot b \vee 0 \cdot c=b$, $0 \cdot b \vee 1 \cdot c=c$. Ясно, что других порождающих совокупностей, кроме $\{b, c\}$, в пространстве M_1 нет. Тем не менее в пространстве M_1 не любому вектору соответствует единственный набор координат, поскольку вектор c можно выразить еще и другой комбинацией базисных векторов, а именно $1 \cdot b \vee 1 \cdot c=b \vee c=c$.

Любое логическое пространство с заданным базисом, в котором нет единственности представления каждого его вектора набором координат, назовем *неполным*. Только что мы убедились, что неполные логические пространства существуют. Если же единственность представления имеется, то такое логическое пространство будем называть *полным*.

---

* *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* О логической алгебре. К., 1990. 12 с. Деп. в УкрНИИНТИ, № 16.

Полные логические пространства существуют. Примером такого пространства может служить пространство M_0 алгебры A_0^* [1]. Оно состоит всего из четырех векторов a, b, c, d, каждому из которых соответствует единственный набор координат (0, 0), (1, 0), (0, 1), (1,1). В полном пространстве базисные векторы e_1, e_2, ..., e_n характеризуются наборами координат (1, 0, 0, ..., 0, 0), (0, 1, 0, ..., 0, 0), ..., (0, 0, 0, ..., 0, 1). На примере алгебры A_1 мы только что видели, что в неполном пространстве базисному вектору может соответствовать более одного набора координат. А именно, базисному вектору c неполного пространства M_1 соответствует два набора координат (0, 1) и (1, 1).

Пусть M — логическое пространство над полем G и $\{e_1, e_2, ..., e_n\}$ — его базис, $(\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n)$ — набор координат, соответствующий вектору x, $(\eta_1, \eta_2, ..., \eta_n)$ — набор координат, соответствующий вектору y. Тогда набор координат $(\xi_1 \vee \eta_1, \xi_2 \vee \vee \eta_2, ..., \xi_n \vee \eta_n)$ будет соответствовать вектору $x \vee y$. В самом деле, если $x = \xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee ... \vee \xi_n e_n$ и $y = \eta_1 e_1 \vee \eta_2 e_2 \vee ... \vee \eta_n e_n$, то $x \vee y = (\xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee ... \vee \xi_n e_n) \vee (\eta_1 e_1 \vee \eta_2 e_2 \vee ... \vee \eta_n e_n) = (\xi_1 \vee \eta_1) e_1 \vee \vee (\xi_2 \vee \eta_2) e_2 \vee ... \vee (\xi_n \vee \eta_n) e_n$. Набор координат $(\xi_1 \vee \eta_1, \xi_2 \vee \eta_2, ..., \xi_n \vee \eta_n)$ будем называть *суммой наборов координат* $(\xi_1, \xi^2, ..., \xi_n)$ и $(\eta_1, \eta_2, ..., \eta_n)$. Таким образом, сумме векторов соответствует сумма их наборов координат.

Пусть λ — скаляр из поля G. Если набор координат $(\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n)$ соответствует вектору x, то набор координат $(\lambda\xi_1, \lambda\xi_2, ..., \lambda\xi_n)$ будет соответствовать вектору λx. В самом деле, если $x = \xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee ... \vee \xi_n e_n$, то $\lambda x = \lambda (\xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee ... \vee \xi_n e_n) = \lambda (\xi_1 e_1) \vee \lambda (\xi_2 e_2) \vee ... \vee \lambda (\xi_n e_n) = (\lambda\xi_1) e_1 \vee (\lambda\xi_2) e_2 \vee ... \vee (\lambda\xi_n) e_n$. Набор координат $(\lambda\xi_1, \lambda\xi_2, ..., \lambda\xi_n)$ будем называть *произведением скаляра* λ *на набор координат* $(\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n)$. Таким образом, произведению скаляра на вектор соответствует произведение этого скаляра на набор координат вектора. Только что описанные закономерности в равной мере справедливы как для полного, так и для неполного пространства. Различие состоит в том, что в случае полного пространства каждому вектору соответствует единственный набор координат, если же пространство неполно, то некоторым из его векторов будет соответствовать целое множество наборов координат, в котором содержится более одного набора.

Нам представляется, что неполное логическое пространство всегда можно расширить до полного, наполняя его некоторыми новыми векторами. Доказательство (или опровержение) этого утверждения, а также разработку способов расширения неполного пространства до полного предоставляем читателям. Ниже излагаются предварительные соображения об одном способе такого доопределения. Пусть M — неполное пространство над полем G с заданным в нем базисом $\{e_1, e_2, ..., e_n\}$, M' — соответствующее ему искомое полное пространство над полем G, получаемое из пространства M посредством его доопределения. Пространство M' строим следующим образом. Каждый элемент a, принадлежащий множеству M, включаем также и в множество M', так что $M \subseteq M'$. Обозначим через I_a множество всех наборов координат, соответствующих вектору a, принадлежащему пространству M. Выбираем в каждом из множества I_a ($a \in M$) некоторый набор координат (какой именно набор координат надо взять — в этом и состоит проблема) и ставим его в соответствие вектору a, принадлежащему множеству M'.

Из всех наборов координат, уже сопоставленных с векторами множества M', образуем множество I_1. Из всех n-местных наборов скаляров поля G образуем множество I всевозможных наборов координат. Образуем множество I / I_1 всех наборов координат, еще не сопоставленных с векторами множества M'. Каждому набору координат из этого множества ставим в соответствие свой вектор, отличный от всех векторов пространства M. Все введенные таким способом векторы включаем в множество M'. Никаких других векторов, кроме упомянутых выше, в множество M' не включаем. В роли базисных векторов множества M' принимаем векторы $e'_1, e'_2, \ldots, e'_n$, которым соответствуют наборы координат $(1, 0, \ldots, 0)$, $(0, 1, \ldots, 0)$, ..., $(0, 0, \ldots, 1)$. В роли нулевого вектора множества M' принимаем вектор $0'$, которому соответствует набор координат $(0, 0, \ldots, 0)$, в роли единичного — вектор $1'$, которому соответствует набор координат $(1, 1, \ldots, 1)$.

Операцию сложения векторов на множестве M' определяем следующим правилом: если вектору x' соответствует набор координат $(\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n)$, а вектору y' — набор координат $(\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_n)$, то в роли вектора $x' \vee y'$ берем тот, которому соответствует набор координат $(\xi_1 \vee \eta_1, \xi_2 \vee \eta_2, \ldots, \xi_n \vee \eta_n)$. Иными словами, если

$$x' = \xi_1 e'_1 \vee \xi_2 e'_2 \vee \ldots \vee \xi_n e'_n \text{ и } y' = \eta_1 e'_1 \vee \eta_2 e'_2 \vee \ldots \vee \eta_n e'_n, \text{ то } x' \vee y' =$$
$$= (\xi_1 \vee \eta_1) e'_1 \vee (\xi_2 \vee \eta_2) e'_2 \vee \ldots \vee (\xi_n \vee \eta_n) e'_n.$$

Операцию умножения скаляра на вектор для пространства M' определяем следующим правилом: если вектору x' соответствует набор координат $(\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n)$, то в роли вектора $\lambda x'$ берем тот, которому соответствует набор координат $(\lambda\xi_1, \lambda\xi_2, \ldots, \lambda\xi_n)$. Иными словами, если $x' = \xi_1 e'_1 \vee \xi_2 e'_2 \vee \ldots \vee \xi_n e'_n$,

$$\text{то } \lambda x' = \lambda\xi_1 e'_1 \vee \lambda\xi_2 e'_2 \vee \ldots \vee \lambda\xi_n e'_n.$$

Нетрудно проверить, что все аксиомы логического пространства для так введенных на множестве M' операций $x' \vee y'$ и $\lambda x'$ выполняются. Следовательно, множество M' есть логическое пространство. Пространство M' — полное, поскольку каждому из его векторов соответствует единственный набор координат. Будет ли только что построенное пространство M' расширением пространства M? Это пока неизвестно. Ответ на поставленный вопрос будет положительным, если, сузив пространство M' до множества M и сохранив в M операции сложения векторов и умножения скаляра на вектор, введенные в M', мы получим логическое пространство, совпадающее с исходным пространством M над полем G. Если же получим нечто иное, то ответ будет отрицательным. Предстоит выяснить, какие наборы координат следует присваивать элементам множества M при включении их в множество M', чтобы цель — расширение неполного пространства M до полного M' — достигалась. Предстоит также доказать, что такое присвоение всегда возможно.

В качестве примера попытаемся описанным методом расширить до полного неполное пространство $M_1=\{a, b, c\}$ рассмотренной выше алгебры A_1, заданное над полем $G_1=\{0, 1\}$. Базисными в пространстве M_1 являются векторы $e_1=b$ и $e_2=c$. В роли нулевого вектора выступает вектор $0=a$, в роли единичного — вектор $1=c$. Все элементы a, b, c пространства M_1 включаем также и в пространство M_1'. Вектору a соответствует множество наборов координат $I_a=\{(0, 0)\}$, вектору b — множество $I_в=\{(1, 0)\}$, вектору c — множество $I_c=\{(0, 1), (1, 1)\}$. Вектору a пространства M_1' ставим в соответствие единственно возможный набор координат $(0, 0)$, вектору b — также единственно возможный набор координат $(1, 0)$.

Вектору c ставим в соответствие набор координат $(0, 1)$, в последнем случае выбор набора не единственно возможный, можно было бы вместо набора координат $(1, 0)$ взять набор $(1, 1)$, тогда пространство M_1' получилось бы иным. Формируем множества $I_1=\{(0, 0), (1, 0), (0, 1)\}$, $I=\{(0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)\}$, $I\setminus I_1=\{(1, 1)\}$. Набору координат $(1, 1)$ ставим в соответствие вектор d, который включаем в множество M_1'. Образуем множество $M_1'=\{a, b, c, d\}$. Базисными в пространстве M_1' будут векторы $e_1'=b$ и e_2' c, поскольку им соответствуют наборы координат $(1, 0)$ и $(0,1)$. Нулем пространства M_1^1 будет вектор $0'=a$, поскольку ему соответствует набор координат $(0, 0)$. Единицей пространства M_1' будет вектор $1'=\mathbf{d}$, поскольку ему соответствует набор координат $(1,1)$.

Определяем операцию сложения векторов пространства M_1' $b\vee c=(1\cdot e_1'0\cdot e_2')\vee(0\cdot e_1'\vee 1\cdot e_2')=(1\vee 0)e_1'\vee(0\vee 1)e_2'=1\cdot e_1'\vee 1\cdot e_2'=d$ и т. д. Полученные таким способом значения операции сложения $x'\vee y'$ векторов x' и y' пространства M_1' приведены в табл. 3. Определяем операцию умножения скаляра поля G_1 на вектор пространства M_1': $0\cdot b=0\cdot(1\cdot e_1'\vee 0\cdot e_2')=(0\cdot 1)e_1\vee(0\cdot 0)e_2=0e_1\vee 0\cdot e_2=$ $=a$ и т. д. Полученные таким способом значения операции $\lambda x'$ умножения скаляра $\lambda\in G_1$ на вектор $x'\in M_1'$ приведены в табл. 4.

Итак, мы построили пространство M_1'. В его состав входят, кроме всех элементов пространства M_1, еще и элемент d. Проверим, является ли пространство M расширением пространства

M_1. Для этого сужаем множество M до множества M_1, выбрасывая из него элемент d. Если на множестве M_1 сохранить действие операций $x' \vee y'$ и $\lambda x'$, то они будут определяться табл. 5, 6. Операция $\lambda x'$ совпадает с умножением коэффициента на вектор

Таблица 3

y' \ x'	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	b	b	d	d
c	c	d	c	d
d	d	d	d	d

$x' \vee y'$

Таблица 4

λ \ x'	a	b	c	d
0	a	a	a	a
1	a	b	c	d

$\lambda x'$

Таблица 5

y' \ x'	a	b	c
a	a	b	c
b	b	b	—
c	c	—	c

$x' \vee y'$

Таблица 6

λ \ x'	a	b	c
0	a	a	a
1	a	b	c

$\lambda x'$

в пространстве M_1. Однако, как это видно из сравнения табл. 1, 5, операции $x \vee y$ и $x' \vee y'$, заданные на множестве M_1, не совпадают. Первая определена всюду, вторая же операция — частичная. Таким образом, построенное нами пространство M_1' не является расширением пространства M_1.

Этот пример доказывает, что при включении элементов множества M_1 в множество M_1' им нельзя приписывать наборы координат произвольным образом. При формировании пространства M_1' мы поставили в соответствие вектору c набор координат (0, 1) и, как видим, расширения пространства M_1 не получили.

Таблица 7

y' \ x'	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	b	b	c	c
c	c	c	c	c
d	d	c	c	d

$x' \vee y'$

Испытаем теперь вторую из имеющихся возможностей и присвоим вектору c набор координат $(1, 1)$. Теперь набору $(1, 0)$ ставим в соответствие вектор d. Таблица для операции $\lambda x'$ остается прежней, операция $x' \vee y'$ теперь характеризуется табл. 7. При исключении из нее элемента d она превращается в таблицу, значения которой совпадают со значениями табл. 1. Итак, реализуя второй вариант построения пространства M_1' приходим к полному пространству, которое является расширением пространства M_1.

Пусть M — полное логическое пространство над полем G с базисом $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ и k — число элементов поля G. Каждому набору $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ скаляров поля G соответствует свой вектор $x \in M$, равный $x = \xi_1 e_1 \vee \xi_2 e_2 \vee \dots \vee \xi_n e_n$. Вместе взятые, эти векторы образуют все пространство M. Отсюда непосредственно следует, что число l векторов пространства M составит $l = k^n$ **(2)**. Обратно, любое логическое пространство M, число векторов которого определяется формулой (2), будет полным, поскольку каждому вектору в этом случае соответствует только одно его разложение. Таким образом, *полное логическое пространство* M над полем G можно определить еще и как такое логическое пространство, у которого число скаляров k поля G, число всех векторов l и число базисных векторов r пространства M связаны зависимостью (2). Для неполного пространства, очевидно, должно выполняться соотношение $l < k^n$ **(3)**.

В полном логическом пространстве вводим *операции конъюнкции* и *отрицания векторов*. Пусть M — полное логическое пространство с базисом $(e_1, e_2, \dots, e_n)$ над полем G, $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ — набор координат, соответствующий вектору $x \in M$, $(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ — набор координат, соответствующий вектору $y \in M$. *Конъюнкцией* или *логическим произведением* (кратко — просто *произведением*) векторов x и y назовем вектор

$$xy = \xi_1\eta_1 e_1 \vee \xi_2\eta_2 e_2 \vee \dots \vee \xi_n\eta_n e_n, \tag{4}$$

отрицанием вектора x назовем вектор

$$\bar{x} = \bar{\xi}_1 e_1 \vee \bar{\xi}_2 e_2 \vee \dots \vee \bar{\xi}_n e_n. \tag{5}$$

Заметим, что в неполном логическом пространстве операции конъюнкции и отрицания векторов ввести, вообще говоря, невозможно, поскольку не обеспечивается их однозначность. Следующий пример доказывает это. Попытаемся ввести с помощью определения (4) операцию конъюнкции для неполного пространства M_1 над полем G_1. Вектору b соответствует набор координат $(1, 0)$ вектору c — наборы координат $(0, 1)$ и $(1, 1)$. Согласно (4) имеем $bc = 1 \cdot 0 \cdot b \vee 0 \cdot 1 \cdot c = a$ и вместе с тем $bc = 1 \cdot 1 \cdot b \vee 0 \cdot 1 \cdot c = b$. Как видим, однозначность операции конъюнкции не выполняется. С нарушением однозначности мы сталкиваемся и при попытке ввести операцию отрицания с помощью определения (5): с одной стороны, $c = 0 \cdot b \vee 1 \cdot c = b$, с другой, $c = \bar{1} \cdot b \vee \bar{1} \cdot c = a$.

Легко проверить, что для операций конъюнкции и отрицания векторов выполняются следующие соотношения:

закон идемпотентности — для любого $a \in M$ $aa = a$ **(6)**;

закон коммутативности — для любых a, $b \in M$ $ab = ba$ **(7)**;

закон ассоциативности — для любых a, b, $c \in M$ $a(bc) = (ab)c$ **(8)**;

закон нуля — для любого $a \in M$ $0 \cdot a = 0$ **(9)**;

закон единицы — для любого $a \in M$ $1 \cdot a = a$ **(10)**;

законы дистрибутивности — для любых a, b, $c \in M$

$$a(b \vee c) = ab \vee ac \quad \mathbf{(11)}, \qquad a \vee bc = (a \vee b)(a \vee c) \quad \mathbf{(12)};$$

законы элиминации — для любых a, $b \in M$

$$a \vee ab = a \quad \mathbf{(13)}, \qquad a(a \vee b) = a \quad \mathbf{(14)};$$

закон двойного отрицания — для любого $\bar{a} \in M$ $\bar{\bar{a}} = a$ **(15)**;

закон отрицания нуля $\bar{0} = 1$ **(16)**;

закон отрицания единицы $\bar{1} = 0$ **(17)**;

закон исключенного третьего — для любого $a \in M$ $a \vee \bar{a} = 1$ **(18)**;

закон противоречия — для любого $a \in M$ $a\bar{a} = 0$ **(19)**;

законы де Моргана — для любых a, $b \in M$

$$\overline{a \vee b} = \bar{a}\bar{b} \quad \mathbf{(20)}; \qquad \overline{ab} = \bar{a} \vee \bar{b} \quad \mathbf{(21)}.$$

Символы 0 и 1, фигурирующие в только что записанных равенствах, обозначают векторы, а не скаляры.

Операции умножения векторов и умножения скаляра на вектор связывают следующие соотношения:

закон ассоциативности — для любого $\alpha \in G$ и любых a, $b \in M$

$$\alpha(ab) = (\alpha a)b, \tag{22}$$

закон дистрибутивности — для любого $\alpha \in G$ и любых a, $b \in M$

$$\alpha(ab) = (\alpha a)(\alpha b). \tag{23}$$

Поступила в редколлегию 09.01.90

Список литературы: 1. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Х., 1987. С. 142. 2. *Гельфанд И. М.* Лекции по линейной алгебре. М., 1971. С. 271. 3. *Люстерник Л. А., Соболев В. И.* Элементы функционального анализа. М., 1965. С. 520.

Поступила в редколлегию 03.05.89

УДК 519.76

Г. Д. ФРОЛОВ, Н. А. КРИВОШЕЕВА

ФОРМАЛЬНЫЕ ПРАВИЛА РАССТАНОВКИ СВЯЗЕЙ ПРЕДЛОЖНО-ПАДЕЖНЫХ ГРУПП В ПРЕДЛОЖЕНИЯХ РУССКОГО ЯЗЫКА

При автоматическом синтаксическом анализе наибольшие трудности возникают при установлении синтаксических связей между предложно-падежными группами и другими словами в предложениях русского языка, так как нет никаких формальных признаков для установления этих связей.

Мы считаем, что задача установления связей будет решена, если из множества установленных формально связей хотя бы одна будет удовлетворять смыслу данного предложения.

Все предлоги русского языка разобьем на синтаксические классы в зависимости от того, с какими частями речи предложно-падежная группа может образовывать словосочетания. Предложно-падежные группы в предложении могут образовывать словосочетания со словами, принадлежащими следующим частям речи: глаголам и всем его формам, существительным, прилагательным, наречиям, местоимениям и числительным.

К глаголам предложно-падежная группа может примыкать слева и справа, а к остальным частям речи — только справа. Формальные правила для примыкания предложно-падежных групп основываются только на принадлежности предлога к определенной синтаксической группе, но не лексическими и семантическими признаками существительного. У существительного, входящего в предложно-падежную группу, принимается во внимание только один формальный признак: одушевленность или неодушевленность. Для каждого предлога русского языка заполняется таблица, фрагмент которой приводится для наиболее характерных предлогов и охватывает все основные синтаксические группы предлогов. Для 17 предлогов русского языка имеются только им присущие связи, они принадлежат к группам с номера 15 и далее (к ним относятся еще предлоги: между, в, о, у, к, не считая). В колонке 1 отмечается, является предложно-падежная группа сильноуправляемой или нет. Далее буквами обозначены, с какими частями речи данная группа образует синтагмы (Г — глагол и его формы, С — существительные, П — прилагательные, Н — наречия, М — местоимения, Ч — числительные, н — неодушевленное существительное, о — одушевленное существительное).

Перейдем теперь к системе расстановки связей в простом предложении русского языка без знаков препинания. Предложно-падежная группа, стоящая абсолютно в начале предложения, относится к сказуемому предложения. Предложная группа, в которую вместо существительного входит местоимение, относится также к сказуемому предложения.

Общая схема расстановки связей между предложно-падежными группами и другими словами предложения следующая: устанавливаются всевозможные связи с теми частями речи, стоящими слева от группы, которые могут сочетаться с данной группой, согласно таблице и с глаголами, стоящими справа от группы, затем стираются все связи, которые не отвечают свойству проективности.

Предлог	1	Г	С	П	Н	М	Ч	Номер синтаксической группы
в силу	0	н/о	—	—	—	—	—	1
в пользу	1	—	н/о	—	—	—	—	2
по части	0	н/о	—	н/о	—	—	—	3
в случае	0	н/о	н/о	—	—	—	—	4
в виде	0	н/о	н	—	—	—	—	5
из-под	0	н/о	н	н	—	—	—	6
вдоль	0	н/о	н/о	н/о	—	—	—	7
без	0	н/о	н/о	н	—	—	—	8
вслед	0	н/о	н/о	н/о	н/о	—	—	9
над	1	н/о	н/о	н	н	—	—	10
из-за	1	н/о	н	н	н	—	—	11
вслед за	0	н/о	н/о	—	н	—	—	12
вроде	0	н/о	н/о	—	—	н	—	13
благодаря		н/о	—	н	—	—	—	14
для	1	н/о	н/о	н/о	н	—	—	15
от	1	н/о	н	н	н	н	н	16
из	1	н/о	н/о	н/о	н	н/о	н/о	17
до	1	н/о	н	н	н/о	—	—	18
ради	1	н/о	н	н/о	—	—	—	19
по+Д. П.	1	н/о	н/о	н	н	—	н	20.
по+П. П.	1	н	—	—	—	—	—	
по+В. П.	0	н	н	н	—	—	—	
с+В. П.	0	н/о	н/о	—	—	—	—	21
с+Р. П.	1	н/о	н	н	—	—	—	
с+Т. П.	1	н/о	н/о	н	н	—	н	
под+В. П.	1	н	н	о	—	—	—	22
под+Т. П.	1	н/о	н/о	н	н	—	—	
за+В. П.	1	н	н	н	—	—	—	23

Большинство исследователей по синтаксическому анализу до установления связи примыкания устанавливают сильноуправляемые связи, причем четкого определения сильноуправляемой связи никто не дает. Так как синтаксический анализ основывается на автоматическом морфологическом анализе для слов, входящих в словарь Ожегова, мы считаем слово сильноуправляемым, если в словарной статье к данному слову дается указание на наличие связи с предложно-падежной группой. После установления синтаксических связей примыкания для предложно-падежных групп, у которых есть указание, что эта группа сильноуправляемая, проверяем среди связей этих групп, нет ли слов, которые бы сильно управляли данной группой, и если эта связь существует, то из всего множества полученных связей оставляем только эту. Из множества полученных таким образом синтаксических схем предложения обязательно должны оказаться связи, отвечающие смыслу предложения.

Поступила в редколлегию 18.12.89

УДК 801.31

С. Ю. СЕМЕНОВА

СИСТЕМА ПРАВИЛ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РУССКИХ ВОПРОСИТЕЛЬНЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ

В связи с развитием автоматизированных вопросно-ответных систем возникает проблема формального анализа вопросительных предложений естественного языка. В рамках этой проблемы определенное место должна занять задача автоматической классификации вопросов. Классификация — составная часть общей задачи понимания вопроса. Недостатком вопросно-ответных систем, не использующих алгоритмы семантического анализа, является, как правило, чрезмерно большой объем выдаваемой пользователю информации, выходящей за рамки вопросно-ответного соответствия. Классификация же способствует целенаправленному сужению объема этой информации.

Будем придерживаться традиционного деления вопросов на три класса: частные, общие и альтернативные. Класс вопроса определяется содержанием адекватных ответов. Под частным понимается вопрос, обладающий следующими двумя свойствами: на него нельзя ответить «да» или «нет», и этим он отличается от общего; в его формулировке не содержится в явном виде вариантов ответа, и этим он отличается от альтернативного.

В настоящей статье рассматривается задача классификации в следующей постановке. Анализируется простое изолированное предложение, оканчивающееся знаком «?», для каждого слова которого определены морфологические признаки. Предполагается также, что в предложении предварительно выделены причастные, деепричастные обороты, приложения, вводные конструкции и обращения, а также предложные именные группы. Требуется определить, выражает ли данное предложение частный вопрос.

В приведенных ниже правилах классификации существенное место занимает задача разрешения омонимии вопросительных слов (ВС), или распознавания ситуаций, когда в анализируемом вопросительном предложении (ВП) содержится ВС, и в то же время это слово вопросительного смысла не имеет. В таком контексте ВС будем называть вырожденным. Например, слово «как» в предложении «Как Вы себя чувствуете?» невырождено, а в предложении «Вы себя чувствуете как обычно?» — вырождено. Правила позволяют идентифицировать частные вопросы и в случае, когда анализируемое ВП вообще не имеет ВС. Кроме того, эти правила могут быть полезны для идентификации вопросов нестандартной семантики, включая некоторые типы риторических вопросов.

Общая структура алгоритма классификации ВП состоит из трех этапов. На первом этапе (правила 1—4) производится поиск лексических единиц, свойственных только общим или альтернативным вопросам. При необнаружении таких лексических единиц производится второй этап — поиск всех ВС и их последовательная проверка на вырожденность (правила 5—21). Вопрос классифицируется как частный, если в нем обнаружено хотя бы одно невырожденное ВС. На третьем этапе (правила 22—24) производится дополнительный анализ с целью выявления частного вопроса в тех случаях, когда он не выражен явно при помощи ВС.

Укажем еще одно допущение: анализируемое ВП не содержит одновременно вопросов, принадлежащих к разным классам: «Кто-нибудь приходил и кто именно?». В силу последнего допущения мы не рассматриваем ВП смешанного типа, состоящие из двух частей и содержание ВС в первой части, а во второй части — один или несколько возможных ответов: «Кто приходил, Ваш брат?».

Перейдем к описанию правил.

Правило 1. Если ВП содержит общевопросительные частицы **ли, разве, неужели,** то вопрос является частным. Исключения составляют:

а) словосочетания с ли: **вряд ли, навряд ли, едва ли, чуть ли не,** которые могут входить в частный вопрос;

б) употребление **ли** непосредственно справа после следующих наречий, имеющих количественное значение: **быстро, давно, далеко, долго, надолго, недавно, ненадолго, редко, скоро, часто** (такие наречия могут замещать собой ВС [1]);

в) словосочетания с **разве: разве лишь, лишь разве, разве только, только разве, разве что,** которые употребляются как союзы и, вообще говоря, могут оказаться в частном вопросе.

Правило 2. Если вопрос содержит словосочетание **или нет,** то он не является частным.

Правило 3. Если ВП содержит общевопросительные частицы **да, ведь, верно, ладно, правда, хорошо**, то вопрос не является частным.

Правило 4. Если ВП содержит модальные вводные слова и словосочетания, отражающие отношение говорящего к правдоподобности ситуации, описанной в ВП, то оно с высокой вероятностью выражает общий вопрос. Такие вводные конструкции, к числу которых принадлежат «несомненно», «может быть», «я надеюсь» и т. д., задаются списком, насчитывающим около 70 единиц.

Как было указано, правила 5—21 предназначены для анализа ВС на вырожденность. К ВС относятся: относительно-вопросительные местоимения **кто, что**[1], **каков, какой, который, чей** в разных падежах и с разными предлогами и вопросительные наречия **где, зачем, как, каково, когда, куда, насколько, откуда, отчего, почем, почему, сколь, сколько, что**[2] (в значении «почему»).

Правило 5. Если ВС входит в состав причастного, деепричастного оборота или вводной конструкции, то оно является вырожденным. Например, будет вырожденным слово **как** во вводных конструкциях с глаголами **полагать, считать, думать, сообщать** и т. д.: «Кто, **как** Вы **полагаете,** победит?».

Правило 6. Если перед ВС стоит одна из частиц не, ни, кое, то ВС вырождено. Между частицей и ВС может быть только предлог.

Правила 7—10 предназначены для выявления вырожденных ВС в так называемых псевдопридаточных предложениях [2].

Правило 7. Если ВС находится между двумя спрягаемыми формами глаголов (V_f), двумя *предикативами* (Praed) или между V_f и Praed (между Praed и V_f, и во всей этой группе, начиная с первого V_f или Praed и кончая последним, нет ни запятых, ни сочинительных союзов, то ВС — вырождено: «Он всегда **делает что** ему **вздумается**?», или другой пример: «Из этой ткани **можно** сшить **какие угодно** платья?».

Правило 8. Если за ВС следуют либо два V_f, либо два Praed, либо V_f и Praed (в любом порядке), и от ВС до второго из них нет ни запятых, ни сочинительных союзов, то ВС вырождено. Например, «Кто из Вас **как следует поработал**?» Отметим, что в правилах 7 и 8 требование отсутствия сочинительных союзов существенно: **«Кто следует** за Вами **и пугает** Вас?».

Правило 9. Если ВС стоит после какого-либо из глаголов **быть, иметься, найти, найтись, остаться,** а также слова **нет** (причем настоящее время глагола **быть** ненулевое), и, кроме того, в предложении имеется инфинитив (*Inf*) произвольного глагола, между которым и одним из глаголов, названных выше, нет ни запятых, ни сочинительных союзов, то данное ВС — вырождено. Например, «Ему **есть чем гордиться?».** Заметим, что взаимное расположение глагола **быть** и др. и ВС существенно: ВС, предшествующее глаголу, может быть и невырожденным. Например, ВС «почему» в предложении «Почему он не нашелся что сказать?» будет невырожденным.

Поскольку внутри конструкций с псевдопридаточными предложениями возможно сочинение ВС, приведем еще одно правило.

Правило 10. Если между одним из глаголов быть и т. д. и *Inf* произвольного глагола находятся два или более ВС, и между какими-либо двумя из этих ВС имеется сочинительный союз, то все эти ВС вырождены: «У Вас есть **что и кому передать?».**

Правило 11. Если в предложении имеется V_f с частицей ни, то ближайшее к глаголу слева ВС (и все ВС, связанные с этим ближайшим сочинительной связью) будет вырожденным. Например, «Почему он решил во **что** бы то **ни стало** добиться успеха?». Заметим, что правило 11 неприменимо, если глагол с **ни** имеет форму инфинитива: «Сколько времени больному нельзя ни есть, ни пить?».

Правило 12. Следующие слова и словосочетания, стоящие слева от ВС и не отделенные от него знаками препинания, делают данное ВС и все ВС, стоящие справа от него и связанные с ним сочинительной связью, вырожденными: **безразлично+ВС, бог знает+ВС, все одно + ВС, все равно + ВС, мало + ВС, не ахти + ВС, не бог весть+ВС, не бог знает+ВС, не весть+ВС, незнамо + ВС, не знаю + ВС, неизвестно + ВС, непонятно + ВС, черт знает + ВС, хоть + ВС.** Между данными словами и ВС может быть только предлог. Пример: «Опять начнутся беседы неизвестно о чем?».

Правило 13. Словосочетания вида **видите (видишь)+ВС, знаете (знаешь) + ВС, представляете (представляешь) + ВС,** внутри которых нет знаков препинания, являются признаками вопроса нестандартной семантики. ВС при этом объявляется вырожденным. Пример: «Он **знаете что** сделал **вчера**». Нестандартность семантики заключается в том, что говорящий не стремится получить информацию о том, что именно сделал субъект вчера, как это было бы в стандартном информативном вопросе, а наоборот, показывает, что он располагает этой информацией и изъявляет готовность ею поделиться.

Правило 14. Наличие в ВП одного из следующих контекстов ВС делает вопрос риторическим, а ВС — вырожденным: **мало ли +ВС, ВС+только не+**V_f**, ВС, как не+предложная именная группа,** за которой не следует противительного союза. В последнем случае ВС должно быть отлично от **как.** Пример: **«Кто, как не он,** может выполнить эту работу?».

Отметим, что каждое из правил 5—14 применимо не к одному, а к нескольким ВС. Для каждого ВС существуют также только одному ему присущие фразеологизмы, наличие которых делает ВС вырожденным при определенных условиях. Список фразеологизмов с указанием этих условий в данной работе не приведен из-за ограниченности ее объема.

Правила 15, 16 предназначены для разрешения омонимии типа **«ВС—частица»** для слов **как** и **что.**

Правило 15. Если в ВП нет других невырожденных ВС, кроме одного из слов **как** или **что,** и после этого слова (и частицы **же,** которая является факультативной) стоит запятая, за которой непосредственно не следует ни обособленного причастного, ни деепричастного оборотов, ни приложения, ни вводной конструкции, ни обращения, ни слова **если,** то данное ВС вырождено. В этом случае ВС является частицей, усиливающей вопрос. Пример: «А Вам **что** же, мои стихи не нравятся?».

Правило 16. Если в ВП нет других невырожденных ВС, кроме **как** или **что,** и одно из этих слов не отделено запятой от подлежащего (подлежащее должно быть отлично от слова **что**) и отделено ровно одной запятой от начала сказуемого, то это ВС — вырождено. Пример: «Как программа, отлажена?».

Правила 17—21 могут быть использованы при разрешении омонимии типа **«ВС — союз»** для слов **как** и **чем.**

Правило 17. Если слову **как** предшествуют какие-либо из невырожденных ВС **зачем, насколько, отчего, почему, сколько** и между словом **как** и ВС из указанного ряда нет ни запятой, ни сочинительного союза, то **как** — вырождено. Пример: **«Почему** она весь день **как** на иголках?».

Правило 18. Если слово **как** соединяет две одинаковых словоформы или две совпадающие именные группы и примыкает контактно к ним обеим без знаков препинания, то оно вырождено. Пример: «Почему этих давно ожидаемых результатов до сих пор **нет как нет**?».

Правило 19. Если **как** соединяет две лексически несовпадающие именные группы, стоящие в одинаковых падежах с одинаковыми предлогами, и запятая между ними либо отсутствует, либо отделяет **как** только от первой из этих групп, то **как** — вырождено. Пример: «У Вашего брата, **как** у лучшего игрока сборной, много спортивных трофеев?».

Правило 20. Если слову **чем** (без предлога) предшествует компаратив с частицей **не,** который является единственным компаративом в ВП, и, кроме того, ВП не имеет знаков препинания, то **чем** — вырождено. Пример: «Он сумеет закончить работу не позже чем к 1 января?».

Заметим, что слово **чем** может быть вырожденным и при наличии компаратива без отрицания. Распознавание таких ситуаций требует привлечения информации о валентности предикатов предложения. Этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

Правило 21. Если в ВП после ВС **чем** без предлога обнаруживается именная группа с частицей **не,** стоящая в именительном падеже, и ВП не содержит ни глаголов, ни Praed, то **чем** будет являться вырожденным, а вопрос — риторическим. Пример: «Ну **чем** я **не герой?».**

Приведем в заключение еще три правила для распознавания тех ситуаций, когда частный вопрос выражается имплицитно, т. е. без помощи ВС.

Правило 22. Если ВП содержит какие-либо из наречий с количественным значением (они перечислены в исключении б) к правилу 1 и, кроме того, выполняются следующие условия:

а) эти количественные наречия не входят в причастные, деепричастные обороты и другие обособленные конструкции, т. е. подчиняются непосредственно главным членам ВП;

б) если этим наречиям непосредственно не предшествуют ВС *как, сколь, насколько,* между которыми и наречиями нет запятых;

в) если в ВП есть частица **ли,** то она находится либо непосредственно справа от рассматриваемого наречия, либо непосредственно справа от V_f или Praed (если они имеются в ВП, о позиции **ли** в ВП см. [3]);

г) если ВП не имеет невырожденных ВС и в нем не имеется также частиц **это, именно,** либо невырожденное ВС есть, а указанные усилительные частицы либо отсутствуют, либо примыкают к этому ВС, то при выполнении условий а) — г) данные наречия сами играют роль вопросительных слов. Примеры: «Вы надолго к нам приехали?», «И много вас тут живет?» («На какое время?», «Сколько?»).

Приведем примеры ВП с количественным наречием, показывающие, что при нарушении каких-либо условий а) — г) эти ВП нельзя отнести к классу частных вопросов: «Уезжая надолго из дома, он знал о невозможности возвращения?», «Не он ли давно работает на нашем заводе?», «Это Вы надолго к нам приехали?».

Правило 23. Если ВП не содержит невырожденных ВС, не сожержит ни V_f, ни Praed, не содержит также принаков общего вопроса, перечисленных в правилах 1—4, но содержит именную группу именительного падежа, причем вершиной этой именной группы является существительное, обозначающее в данной предметной области не индивид (не предмет), а понятие, имеющее определенное содержание или определенный объем, то данное ВП выражает частный вопрос, в котором опущено, но подразумевается ВС **какой** или **каков.** Таких именных групп может быть и несколько, но тогда они обязательно должны быть соединены сочинительной связью, т. е. предложение должно быть односоставным. Примеры: «Ваши действия в случае аварии?», «Итак, имя преступника?». Отметим, что если существительное — центр именной группы обозначает конкретный индивид, то правило неприменимо: «Ваша авторучка?» (ср. с «Ваши планы?»). Правило неприменимо также и при наличии признаков общего вопроса: «Ваша ли фамилия?».

Правило 24. Если ВП, не имеющее невырожденных ВС, начинается одним из словосочетаний **а если, а вдруг,** предшествовать которым могут только частицы и обращения, то ВП представляет собой частный вопрос, который можно перефразировать, использовав одну из следующих конструкций с ВС **что: что, если, а что, если, что было, что будет** и **что надо (было) делать:** «А если бы не было изобретено радио?».

Список литературы: 1. *Падучева Е. В.* Вопросительные местоимения и семантика вопроса//Разработка формальных моделей естественного языка. Новосибирск, 1981. С. 5—89. 2. *Попов А. С.* Псевдопридаточные предложения и пунктуационная практика в современном русском языке//Современная русская пунктуация. М., 1979. С. 17—69. 3. *Рестан П.* Синтаксис вопросительного предложения. Осло, 1969. С. 23.

Поступила в редколлегию 05.06.89

УДК 519.76

Г. Д. ФРОЛОВ, Н. А. КРИВОШЕЕВА

РАЗБИЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЙ РУССКОГО ЯЗЫКА НА СИНТАКСИЧЕСКИЕ СЕГМЕНТЫ

При автоматическом синтаксическом анализе предложений русского языка возникает необходимость разбиения любого предложения на некоторые отрезки, внутри которых синтаксический анализ бы значительно облегчался, и внутри которых можно было бы решить задачу установления синтаксических связей между словами предложения. Для этого большинство исследователей по автоматическому синтаксическому анализу разбивают предложение на сегменты, границы которых проходят по знакам препинания и союзам. Этот подход не всегда оправдан при анализе, так как может усложнить, а не упростить анализ предложения. Например, управляемое существительное и предлог могут оказаться в разных сегментах. Нами предлагается двухэтапный подход для решения данной проблемы.

При анализе любых текстов русского языка обнаружено, что все связи, лежащие между предлогом и управляемым существительным, не выходят за их пределы. Поэтому перед синтаксическим анализом предложения предлагается выделить в нем такие отрезки, внутри которых легко было бы искать для каждого предлога управляемое существительное. Для этого предложение разбивается на суперсегменты следующим образом: последовательно от начала предложения до его конца устанавливаются границы суперсегментов. Первая левая граница устанавливается перед первым словом предложения и считается знаком препинания. Первая правая граница устанавливается по первому встретившемуся признаку: это или глагол, или двоеточие, или точка с запятой, или рядом стоящие запятая и тире, или знак препинания, стоящий перед подчинительным союзом. Вторая левая граница устанавливается по первой правой границе, а вторая правая граница — аналогично первой правой границе, и так последовательно до конца предложения, последняя правая граница устанавливается по знаку препинания, являющемуся концом предложения. Затем внутри каждого суперсегмента находятся для каждого предлога управляемые существительные и для слов, находящихся между предлогом и существительным, разрешаются все вопросы омонимии, устанавливаются связи между словами, и для дальнейшего анализа в предложении рассматривается только предлог и управляемое им существительное. Все границы, стоящие перед глаголами, стираются, и уже упрощенное, предложение разбивается на сегменты, границы которых находятся аналогично границам суперсегментов, но границами сегментов являются только все знаки препинания, входящие в предложение. Покажем на примере конкретного предложения, как происходит его разбиение на суперсегменты.

|В готовившемся выступить в любую минуту на защиту от карателей отряде|шли, не останавливаясь ни на минуту, приготовления к тяжелому, затяжному бою,| который должен был начаться утром.| Вертикальной чертой обозначены границы суперсегментов. В дальнейшем рассматривается предложение:
|В отряде шли,| не останавливаясь ни на минуту,| приготовления к бою,| который должен был начаться утром.| Вертикальной чертой показаны границы сегментов.

Поступила в редколлегию 18.12.89

УДК 681.51.015

В. В. ШЛЯХОВ, канд. техн. наук, *А. И. ПРЕСНЯКОВ, П. П. ТАРАСОВ*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ МНОЖЕСТВА ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ

В настоящее время большое внимание уделяется моделированию процесса распознавания человеком цветовых оттенков и построению приборов для классификации предметов по их цветовым характеристикам. Построение математической модели различения цветов предполагает идентификацию и определение параметров сенсорной системы — орган зрения человека. Традиционные методы идентификации существенным образом используют экспериментальные данные о входном и выходном сигналах системы [1]. В ряде случаев, когда измерение сигнала на выходе либо невозможно, либо чрезвычайно затруднено, единственно приемлемым способом идентификации является метод сравнения. Математическое описание метода сравнения связано с изучением различных бинарных предикатов [2].

При изучении произвольных линейных систем наиболее естественно интерпретировать множество входных сигналов как некоторую алгебраическую систему, наделенную различными бинарными операциями. Примем за подобную алгебраическую систему линейное пространство над произвольным полем.

Назовем конусом K абстрактного линейного пространства L собственное подмножество $K \subset L$, удовлетворяющее свойствам: если $x, y \in K$, то $x+y \in K$; существует $\lambda \in G$, такое, что если $\lambda x \in K$ и $-\lambda x \in K$, то $x=0_L$ (0_L — ноль линейного пространства L).

Рассмотрим предикат $T(x, y)$ вида

$$T(x, y) = D(Fx, Fy), \tag{1}$$

где $Fx = (f_1(x), \ldots, f_n(x))$, а $\{f_i(x)\}_{i=1}^n$ — линейно независимые функционалы над L, причем $\dim(\ker F) < \dim L$, D — предикат равенства на $G^n \times G^n$. Известно, что предикат вида (1) является предикатом n-мерной линейности тогда и только тогда, когда выполняется условие рефлексивности, симметричности, транзитивности, аддитивности, однородности, n-мерности. Нас будет интересовать случай, когда предикат $T(x, y)$ вида (1) задан не на всем L, а только на конусе K. На первый взгляд кажется, что предикат $E(x, y)=T(x, y)/_k$ удовлетворяет перечисленным выше свойствам. Однако имеется целый ряд различий. Рассмотрим свойство n-мерности, переделав его для случая конуса: существует набор векторов $\{e_i\}_{i-1}^n \in K$ такой, что для любого $x \in K$ найдется единственный набор элементов $\{\alpha_i(x)\}_{i=1}^n \in G$, для которого $E(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) e_i)=1$. Здесь возникает трудность. Действительно, необходимо как-то регламентировать элементы $\{\alpha_i(x)\}_{i=1}^n$, чтобы линейная комбинация принадлежала конусу K. Поэтому условие n-мерности требует изменения. Возьмем какую-либо линейно независимую систему из n элементов $\{e_i\}_{i-1}^n \in K \diagup \ker F$. Это всегда возможно потому что $\dim(K \diagup \ker F)=\dim L$. Составим систему уравнений для произвольного фиксированного $x \in K$

$$x=\sum_{i=1}^n b_i(x) e_i. \tag{2}$$

Примем к равенству (2) оператор F и запишем в координатном виде

$$f_k(x)=\sum_{i=1}^n b_i(x) f_k(e_i), \quad k=1, 2, \ldots, n. \tag{3}$$

Система (3) имеет единственное решение относительно коэффициентов $b_i(x)$ (оператор F переводит линейно независимую систему $\{e_i\}_{i=1}^n \in K \setminus \ker F$ в линейно независимую). Кроме того, не может для любого выполняться $b_i(x) e_i \bar{\in} K$, поскольку $x \in K$, $\{e_i\}_{i=1}^n \in K$. С другой стороны, равенство (2) не может иметь место при всех $\{b_i(x) e_i\}_{i=1}^n \in K$. Это означает, что множество индексов распадается на два подмножества $I(x)=\{i{:}b_i(x) e_i \bar{\in} K\}$ и множество $\overline{I}(x)=I \setminus I(x)$. Обозначим

$$a_i(x)=\begin{cases} b_i(x), & i \bar{\in} I(x) \\ -b_i(x), & i \in I(x), \end{cases} \tag{4}$$

очевидно $a_i(x)$ является решением системы.

$$f_k(x)+\sum_{i \in I(x)} a_i(x) f_k(e_i)=\sum_{i \in \overline{I}(x)} a_i(x) f_k(e_i), \quad k=1, 2, \ldots, n. \tag{5}$$

Кроме того, $a_i(x) e_i \in K$ для любого i. Система (5) эквивалентна равенству

$$E\left(x+\sum_{i \in I(x)} a_i(x) e_i, \sum_{i \in \overline{I}(x)} a_i(x) e_i\right)=1. \tag{6}$$

Теперь установлено, что предикат $E(x, y)$ удовлетворяет свойству n-мерности, если существует такая система элементов $\{e_i\}_{i=1}^n$, что для любого $x \in K$ найдется единственный набор $\{a_i(x)\}_{i=1}^n \in G$, $\{a_i \times \times (x) e_i\}_{i=1}^n \in K$ и единственное собственное подмножество индексов $I(x)$, для которого выполнено соотношение (6). Сформулируем свойство однородности. Если $E(x, y) = 1$, то либо $E(\lambda x, \lambda y) = 1$, либо $E(-\lambda x, -\lambda y) = 1$ для любых x, $y \in K$ и $\lambda \in G$, причем, если $\lambda x \in K$, то $I(x) = I(\lambda x)$. Аддитивность. При любых x x', y, $y' \in K$ из равенства $E(x, y) = E(x', y') = 1$ вытекает $E(x + x', y + y') = 1$ и $E(x + y', y + x') = 1$. Назовем предикат полуаддитивным, если для любых x, y, $z \in K$ из равенства $E(x + z, y + + z) = 1$ следует $E(x, y) = 1$. В дальнейших рассуждениях будет существенно задействовано одно утверждение, докажем его.

Лемма. *Пусть на конусе K линейного пространства L задан линейный функционал $f(x)$, тогда его можно однозначно продолжить до линейного функционала на всем пространстве L.*

Доказательство. Пусть $y \in L$, зададим

$$x_1 = \begin{cases} y + c, & y \in K \\ c, & -y \in K, \quad c \in K, \end{cases} \qquad x_2 = \begin{cases} -y + c, & -y \in K \\ c, & y \in K. \end{cases}$$

Заметим, что построенные x_1, $x_2 \in K$, при этом очевидно выполняется $y = x_1 - x_2$. Положим $f(y) = f(x_1) - f(x_2)$. Это определение корректно, так как если $y = x_1 - x_2 = x_1' - x_2'$, то, $x_1 + x_2' = x_2 + x_1'$. Обе суммы принадлежат конусу на котором функционал аддитивен, значит $f(x_1) + f(x_2') = f(x'_1) + f(x_2)$ или $f(x_1) - f(x_2) = f(x_1') - f(x_2')$.

или $f(x_1) - f(x_2) = f(x_2') - f(x_2')$. Очевидно, что построенное продолжение однозначно. Фактически показано, что конус является воспроизводящим множеством. Проверим свойство однородности

$$f(\lambda y) = f(\lambda(x_2 - x_1)) = f(\lambda x_1 - \lambda x_2) = f(\lambda x_1) + f(-\lambda x_2).$$

В силу того, что функционал однороден на конусе, получим

$$\lambda f(x_1) - \lambda f(x_2) = \lambda(f(x_1) - f(x_2)) = \lambda f(x_1 - x_2) = \lambda f(y).$$

Продолженный функционал аддитивен и однороден, определен на L, значит он линеен. Лемма доказана.

Сформулируем теперь условия существования предиката n-мерной линейности заданного на конусе абстрактного линейного пространства.

Теорема. Для того чтобы предикат $E(x, y)$, заданный на $K \times \times K \subset G^n \times G^n$, был предикат n-мерной линейности, необходимо и достаточно выполнение свойств аддитивности, полуаддитивности, n-мерности и однородности.

Доказательство. *Необходимость.* Предикат $E(x, y)$ имеет вид $E(x, y) = D(Fx, Fy)$, где $F{:}K \to G^n$, $Fx = (f_1(x),$

$f_2(x), \ldots, f_n(x))$, $\{f_i(x)\}_{i=1}^n$ — линейные функционалы над K, $\dim(\ker F) < n$. Из $E(x, y) = E(x', y') = 1$ следует $Fx = Fy$, $Fx' = Fy'$. Складывая почленно эти равенства, получим $F(x + x') = F(y + y')$, т. е. $D(F(x + x'), F(y + y')) = 1$, аналогично $D(F(x + y'), F(y + x')) = 1$. Свойство аддитивности доказано. Если $E(x + z, y + z) = 1$, то $F(x + z) = F(y + z)$, или $Fx = Fy$, значит $E(x, y) = 1$. Выполнено условие полуаддитивности. Свойство однородности следует из однородности оператора F и из того обстоятельства, что системы

$$f_k(x) = \sum_{i=1}^n b_i(x) f_k(e_i), \quad \lambda f_k(x) = \sum_{i=1}^n b_i(\lambda x) f_k(e_i),$$

$$k = 1, 2, \ldots, n$$

имеют пропорциональные решения. Это означает, что верно равенство $I(x) = I(\lambda x)$. Необходимость свойства n-мерности доказана ранее при формулировке этого свойства.

Достаточность. Пусть предикат $E(x, y)$ удовлетворяет свойствам перечисленным в теореме. Доказательство проведем в три этапа.

1. Покажем, что введенные в определении n-мерности функционалы $\{a_i(x)\}_{i=1}^n$, $\{b_i\{x\}_{i=1}^n$ —линейны (аддитивны и однородны). Из n-мерности и аддитивности при произвольных $x, y \in K$ имеем

$$E(x + \sum_{i \in I(x)} a_i(x) e_i), \quad \sum_{i \in \overline{I}(x)} a_i(x) e_i) = 1; \tag{7}$$

$$E(y + \sum_{i \in I(y)} a_i(y) e_i, \quad \sum_{i \in \overline{I}(y)} a_i(y) e_i) = 1; \tag{8}$$

$$\begin{aligned} E(x + y + &\sum_{i \in I(x) \cap I(y)} (a_i(x) + a_i(y)) e_i + \sum_{i \in I(x) \setminus I(y)} a_i(x) e_i + \\ &+ \sum_{i \in I(y) \setminus I(x)} a_i(y) e_i; \quad \sum_{i \in I(x) \cap \overline{I}(y)} (a_i(x) + a_i(y)) e_i + \\ &+ \sum_{i \in I(x) \setminus I(y)} a_i(y) e_i + \sum_{i \in I(y) \cap I(x)} a_i(x) e_i) = 1. \end{aligned} \tag{9}$$

Через $I(x)$ обозначено множество индексов, равно и использовано равенство $I(x) \setminus I(y) = \overline{I}(y) \setminus \overline{I}(x)$.

Введем теперь следующие множества:

$$N_1 = \{i \in I(x) \setminus I(y) : a_i(x) e_i \in K, \ -a_i(y) e_i \in K\};$$

$$N_2 = \{i \in I(x) \setminus I(y) : a_i(y) e_i \in K, \ -a_i(x) e_i \in K\};$$

$$N_3 = \{i \in I(y) \setminus I(x) : a_i(y) e_i \overline{\in} K, \ -a_i(x) e_i \in K\};$$

$$N_4 = \{i \in I(y) \setminus I(x) : a_i(x) e_i \in K, \ -a_i(y) e_i \in K\}.$$

Воспользуемся полуаддитивностью, тогда равенство (9) примет вид

$$E\Big(x+y+\sum_{i\in I(x)\cap I(y)}(a_i(x)+a_i(y))e_i+\sum_{i\in N_1}((a_i(x)-a_i(y))e_i+$$

$$+\sum_{i\in N_3}((a_i(y)-a_i(x))e_i; \qquad (10)$$

$$\sum_{i\in \bar I(x)\cap \bar I(y)}(a_i(x)+a_i(y))e_i+\sum_{i\in N_2}(a_i(y)-a_i(x))e_i+$$

$$+\sum_{i\in N_4}(a_i(x)-a_i(y))e_i\Big)=1.$$

Заметим, что множества $I(x)\cap I(y)$, $\bar I(x)\cap \bar I(y)$, $\{N_i\}_{i=1}^4$ — непересекающиеся и в объединении дают все множество индексов I. В этом случае из n-мерности и равенства (10) вытекает

$$I(x+y)=I(x)\cap I(y)\cup N_1\cup N_3; \qquad (11)$$

$$a_i(x+y)=\begin{cases} a_i(x)+a_i(y), & i\in I(x)\cap I(y)\cup \bar I(x)\cap \bar I(y)\\ a_i(x)-a_i(y), & i\in N_1\cup N_4\\ a_i(y)-a_i(x), & i\in N_2\cup N_3.\end{cases}$$

Так как $b_i(x)=\begin{cases} a_i(x), & i\in I(x)\\ -a_i(x), & i\in \bar I(x)\end{cases}$, рассмотрев $b_i(x+y)$, получим $b_i(x+y)=b_i(x)+b_i(y)$. Действительно, пусть $i\in I(x)\cap I(y)$, тогда $i\in I(x+y)$ и $b_i(x+y)=-a_i(x+y)=-a_i(x)-a_i(y)=$ $=b_i(x)+b_i(y)$. Допустим $i\in N_2$, значит $i\in \bar I(x+y)$, тогда $b_i(x+y)=a_i(x+y)=a_i(y)-a_i(x)=b_i(y)+b_i(x)$, так как $i\in I(x)\diagdown I(y)\subset I(x)$ в силу определения N_2. Рассмотрев подобным образом все шесть случаев, легко убедиться, что при любом индексе выполняется равенство (13), причем для произвольных. Отметим еще одно свойство функционалов $\{a_i(x)\}_{i=1}^n$. На основе равенства (7) и свойства однородности получим

$$E\Big(\lambda x+\sum_{i\in I(x)}\lambda a_i(x)e_i,\quad \sum_{i\in \bar I(x)}\lambda a_i(x)e_i\Big)=1. \qquad (14)$$

Кроме того, запишем свойство n-мерности для элемента $\lambda x\in K$

$$E\Big(\lambda x+\sum_{i\in I(\lambda x)}a_i(\lambda x)e_i,\quad \sum_{i\in \bar I(\lambda x)}a_i(\lambda x)e_i\Big)=1. \qquad (15)$$

Сравнивая равенства (14), (15) и учитывая, что $I(x)=I(\lambda x)$ при $\lambda x\in K$, получаем свойство однородности функционалов $a_i(x)$, а значит и $b_i(x)$, $i=1, 2, ..., n$. Теперь ясно, что функционалы $\{b_i(x)\}_{i=1}$ удовлетворяют условиям леммы и их можно однозначно продолжить до линейных функционалов, определенных на всем L.

2. Покажем, что предикат $E(x, y)$ обладает также свойствами рефлексивности, симметричности, транзитивности. Из равенства (7) и свойства аддитивности получаем $E(x+\sum\limits_{i\in I}a_i(x)e_i,\ x+\sum\limits_{i\in I}a_i(x)e_i)=1$. Отсюда, применяя полуаддитивность, выводим $E(x, x)=1$. Пусть $E(x, y)=1$, кроме того $E(y, y)=1$ (по только что доказанному), тогда по аддитивности $E(y+y,\ x+y)=1$. Используя полуаддитивность, имеем $E(y, x)=1$. Аналогично доказывается транзитивность предиката.

3. Покажем, что предикат имеет вид $E(x, y)=D(Fx,\ Fy)$.

Пусть $E(x,\ y)=1$. Используя перечисленные выше свойства, запишем следующие равенства: $E(x+\sum\limits_{i\in I(x)} a_i(x)e_i,\ y+\sum\limits_{i\in I(x)} a_i\times$ $\times(x)e_i)=1$, $E(x+\sum\limits_{i\in I(x)} a_i(x)e_i,\ \sum\limits_{i\in I(x)} a_i(x)e_i)=1$. Применив аддитивность и полуаддитивность, имеем $E(y+\sum\limits_{i\in I(x)} a_i(x)e_i,$ $\sum\limits_{i\in I(x)} a_i(x)e_i)=1$. Из единственного набора $I(x)$ и коэффициентов $\{a_i(x)\}_{i=1}^n$ получим, что $a_i(x)=a_i(y)$ и $I(x)=I(y)$. Это в свою очередь, означает, что $b_i(x)=b_i(y)$, $i=1, 2, \ldots, n$. Рассуждения можно провести и в обратном порядке, тем самым установлен

$$E(x,\ y)=D(Fx,\ Fy),\ x,\ y\in K,\ F: K\to G^n;$$
$$Fx=\{b_1(x),\ b_2(x), \ldots,\ b_n(x)\},\ \{b_i(x)\}_{i=1}^n$$

набор линейно независимых функционалов. Заметим, что $\dim(\ker F)<\dim K=\dim L$, в противном случае оператор был бы нулевым, что противоречит условию теоремы. Доказательство завершено.

Теорема устанавливает общий вид линейной системы и свойства, которым она должна удовлетворять, если множество входных сигналов представляет собой конус абстрактного линейного пространства. При этом указанные свойства могут проверяться с высокой степенью точности.

Чаще всего в теории цветового зрения используется гильбертово пространство $L_2\ [c, d]$. В этом случае линейные функционалы $b_1(x), \ldots, b_n(x)$ будут иметь следующий вид:

$$b_i(x)=\int\limits_c^d K_i(\tau)\,x(\tau)\,d\tau,$$

где $K_i(\tau)$ — спектральные характеристики идентифизируемой системы. Приведенная выше методика была использована авторами при изучении различных свойств цветового зрения человека и для совершенствования работы автоматических устройств классификации цветовых оттенков [3]. Данная модель при $n=3$ наиболее адекватно описывает процедуру распознавания цветов органом зрения человека, это позволяет более точно найти спектральные характеристики светофильтров объективных калориметров. Усовершенствованная методика построения объективных калориметров, предложенная авторами, приведена в работе [3].

Список литературы: 1. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Х., 1987. С. 142. 2. *Гельфанд И. М.* Лекции по линейной алгебре. М., 1971. С. 271. 3. *Люстерник Л. А., Соболев В. И.* Элементы функционального анализа. М., 1965. С. 520.

Поступила в редколлегию 03.05.89

УДК 510.62

В. А. ЧИКИНА, канд. техн. наук, *Ю. В. КОВАЛЕВ*

ДЕКОМПОЗИЦИЯ УРАВНЕНИЙ АЛГЕБРЫ КОНЕЧНЫХ ПРЕДИКАТОВ МЕТОДОМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Простой и эффективный метод декомпозиции уравнений алгебры конечных предикатов (АКП) путем введения вспомогательных переменных предусматривает обозначение выделенных участков формул произвольных переменных и запись полученных предикатов в виде системы уравнений [1]. При схемном решении [2] возникает самостоятельная задача построения схем, соответствующих заданным уравнениям из обратимых элементов, которые могут реализовывать отношения на две и более переменные.

Построение обратимых элементов на четыре и более переменных затруднено из-за высокой сложности получаемых подсхем. Реализация же их на два и три входа достаточно проста.

В данной работе предлагается процедура декомпозиции на бинарные и тернарные отношения, которые могут быть реализованы простейшими обратимыми элементами на два или три входа.

Полагаем, что декомпозируемое уравнение задается произвольной скобочной формой. Никаких иных ограничений на структуру формулы не налагается. Пусть исходное уравнение представлено строкой символов из алфавита σ и имеет произвольную длину, выходные данные — также строки символов. В каждой такой строке будет записано одно-, двух- или трехместное уравнение.

Процесс декомпозиции разделим на три этапа [3]: лексический анализ исходной строки с целью построения структуры декомпозируемого уравнения; синтаксический анализ правильности построения структуры уравнения; вычленение простейших отношений и их запись в выходной регистр.

Остановимся подробно на каждом из этих этапов.

Результатом этапа лексического анализа является список лексем. Введем переменные:

входной регистр $S=\{S_1, S_2, \ldots, S_i, \ldots, S_{k_S}\}$, где S_i — i-я переменная регистра с областью определения σ, k_S — длина входной строки или же число переменных в регистре;

регистр лексем $L=\{L_1, L_2, ..., L_l, ..., L_{k_L}\}$, $L_i=\{L_{i1}, ..., L_{il}, ..., L_{ik_{L_i}}\}$, где L_i — i-я переменная, определенная на множестве лексем σ_L, k_L — число лексем, L_{ij} — j-я буква лексем, определенная на множестве букв σ;

вспомогательный регистр $R=\{R_1, R_2, ..., R_i, ..., R_{k_R}\}$, где R_i — i-й разряд регистра, k_R — число разрядов вспомогательного регистра

$$k_R=\max(k_{L_i}),\ i\in\{1, 2, ..., k_L\};$$

вспомогательная булева переменная $FL=\bigvee\limits_{i=1}^{k_R}\overline{R_i^-}$;

дискретное время, определенное на множестве целых чисел t.

Введем вспомогательные предикаты:

$$z(x)=\begin{cases}1, \text{ если } x \text{ есть знак операции,}\\ 0 \text{ — в противном случае,}\end{cases}$$

$$z(x)=x^{-}\vee x^{\vee}\vee x^{8}\vee x^{\otimes}\vee x^{=}\vee x^{\sim}.$$

Знаки операций, стоящие в показателях узнаваний, следует понимать как символы.

$$P_3(x, y)=\bigwedge\limits_{i+1}^{k_x}x^{i+1}y^{i},$$

где k_x — число значений x. Если $P_3(x, y)=1$, то переменная x на единицу больше y.

Предикат $P_1(i, j)=1$, если значение 1-го разряда j-го регистра лексем равно значению i-й переменной входного регистра S:

$$\begin{cases}\overline{L}_{t=1,1,l}i^{\varnothing}_{t=1}i^{\varnothing}_{t=\varnothing}=1,\\ L_{t=1,1,l}\sim S_i;\ \text{при } t>1,\\ P_3(i_{t+1}, i_t)=1,\\ P_3(j_{t+1}, j_t)=1.\end{cases}$$

Предикат $P_2(k)=1$, когда значение k-го регистра лексем равно значению вспомогательного регистра R:

$$\begin{cases}L_{t+1,k}\sim R_t,\\ P_3(k_{t+1}, K_t)\,FL_{t+1}.\end{cases}$$

Предикат $P_5(i)$ описывает операцию конкатенации:

$$\begin{cases}\overline{R_{t,j}^-}\supset(R_{t+1,j}\sim R_{t,j}),\\ R_{t,j}\supset(R_{t+1,j}\sim S_i),\end{cases}$$

где $j=\overline{1, k_R}$, k_R — число переменных в регистре R.

Предикат $P_6(k)=1$, если вспомогательная переменная установлена в единицу ($FL=1$), а значение первой буквы вспомогательного регистра равно значению k-го разряда входного регистра:

$$P_6(k)=FL_{t+1}(R_{t+1,1}\sim S_k)\left(\bigwedge_{j=1}^{k_R} R_{t+1,j}\right);$$

$$Б(x, y)=\begin{cases}1, \text{ если } x>y,\\ 0 \text{ — в противном случае;}\end{cases}$$

$$Б(x, y)=\bigvee_{i=1}^{k_x}\bigvee_{j=1}^{i-1} x^i y^j,$$

где k_x — число возможных значений переменной x.

Предикат $P_8(i, x, y)$ обращается в единицу, если $x_j=y$, а переменная i получает значение j:

$$P_8(i, x, y)=\bigwedge_{j=1}^{k_x}(x_j^y\supset i_{t+1}^j);$$

$$P_7(x, y, z)=\exists i P_8(i, x, y)\,Б(i, z);$$

$$P_9(x, y, z)=\exists i P_8(i, x, y)\,\overline{Б(i, z)}(i\oplus z).$$

Приведем правила, описывающие закономерности образования лексем.

1. Поскольку лексема может состоять из многих символов, то необходима вспомогательная переменная для определения, к какой лексеме следует отнести очередной символ входной строки. Положим $FL_{t=0}=\varnothing$.

2. Считаем содержимым регистров лексем пробелы

$$L^{\overline{\ }}_{t=0,j}=1;\ (j=\overline{1,\ k_L}).$$

3. Для всех моментов дискретного времени $t>0$ справедливы следующие правила выделения лексем: если очередной символ входной строки — знак операции ($\neg$ — знак отрицания, $\vee$ — знак дизъюнкции, & — конъюнкции, $\supset$ — импликации, $\oplus$ — знак суммы по модулю; 2, $\sim$ — знак эквиваленции) и вспомогательная переменная равна нулю, что равносильно пустому вспомогательному регистру (предыдущая последовательность символов распределена по лексемам), то очередная лексема есть выделенный символ

$$z(S^i)\,\overline{FL}\supset P_1(i, j),$$

где i — номер буквы входного регистра, j — номер очередной лексемы.

4. Если очередной i-й символ — знак операции и предыдущая последовательность символов могла образовать лексему (н/п X : : A&), то необходимо эту последовательность символов обозначить лексемой. Увеличим счетчик лексем на единицу. Очередной

лексемой будет i-й символ, а значение вспомогательной переменной следует установить в ноль, так как текущая последовательность символов уже распределена по регистрам лексем

$$z(S_i)\,FL \supset P_2(i)\,P_1(i,\ j).$$

5. Если текущий символ — пробел, то он указывает лишь на то, что предыдущая последовательность символов должна быть распределена по лексемам

$$(\text{н/п } A \& X : A\_), \quad S_i^{-}\,FL \supset P_2(i).$$

6. Если некоторая предыдущая последовательность символов включена в состав очередной лексемы и текущий символ — скобка, а в текущей последовательности уже есть и открывающаяся и закрывающаяся скобки (н/п $X(A)$)), то текущий символ есть операторная скобка. Она служит для указания порядка выполнения операций в транслируемой формуле. Реакцией системы должно быть выделение такой скобки в отдельную лексему

$$S_i^{),(}\,FL\,P_7(R_t,\ (,\ 1)\,P_7(R_t,\ ),\ 1) \supset P_2(i)\,P_1(i,\ j).$$

7. Если предыдущая последовательность символов может составлять лексему ($FL=1$), очередной символ — открывающаяся скобка и в последовательности есть двоеточие — указание на степень узнавания, то реакция системы аналогична рассмотренной в п. 2

$$S_i^{(}\,FL\,P_7(R_t,\ :,\ 1) \supset P_2(i)\,P_1(i,\ j).$$

8. Если очередной символ во входном регистре — открывающаяся скобка, $FL=1$ и отсутствует двоеточие в регистре R (н/п$'X(')$, эту скобку необходимо включить в R.

9. Если очередной символ — скобка и $FL=0$ (н/п$'X{:}A \vee X{:}B'$), то скобку необходимо обозначить новой лексемой:

$$S_i^{),(}\,FL \supset P_1(i).$$

10. Если очередной символ — закрывающаяся скобка, предыдущие символы объединены в лексему и среди них имеется открывающаяся скобка (н/п$'X(A)'$), то эту скобку необходимо присоединить к имеющимся символам

$$S_i^{)}\,FL\,P_7(R_t,\ (,\ 1) \supset P_5(i).$$

11. Если очередной символ — не знак операции, не пробел, не скобка и $FL=1$, то этот символ необходимо присоединить к предыдущим символам:

$$P_{10}\,FL \supset P_5(i),$$

где вспомогательная переменная $P_{10} = \overline{z(S_i) \vee S_i^{-,(,)}}$.

12. Если же $FL=0$, то этот символ будет первым символом очередной лексемы:

$$P_{10}\,\overline{FL} \supset P_6(i).$$

Перейдем к описанию этапа синтаксического анализа. Введем регистр типов лексем

$$TL=\{Tl_1,\ Tl_2,\ \ldots,\ Tl_{k_l}\},$$

где Tl_i — тип i-й лексемы, $i=\overline{1,\ k_l}$. В качестве типа лексемы может выступать переменная, скобка открывающаяся, скобка закрывающаяся, знаки операций:

$$TL_l^{(,),\text{п}} \vee z\,(L_i)(Tl_i \sim L_l)=1.$$

Предикат $P_{11}(L, TL)$ формализует определение типа лексем:

$$(z\,(L_{l,i}) \vee L_{i,t}^{(,)}) \supset (Tl_{i,t+1} \sim L_{i,t});$$

$$L_{i,t}^{),(} \vee z\,(L_{i,t}) \supset Tl_{i,t+1}^{\text{п}},$$

где $i=\overline{1,\ k_l}$.

Введем предикат синтаксически правильной формулы Син(x). Аргумент x — регистр типов лексем, x_i — $(i=1,\ n)$ — i-я переменная в регистре, n — число переменных в регистре:

$$x_1^{\text{п}}D_0\,(x_2) \vee x_1^{(}\,(x_2^{-} \vee x_2^{\text{п}} \vee x_2^{(}) \vee x_1^{-}x_2^{\text{п}}=1;$$

$$\bigwedge_{i=2}^{n-1}[x_i^{\text{п}}\,(z'(x_{i-1}) \vee x_{i-1}^{(})(x_{i+1}^{)} \vee D_0\,(x_{i+1})) \vee x_i^{-}\,(x_{i-1}^{(} \vee$$

$$\vee D_0\,(x_{i-1}))\, x_{i+1}^{\text{п}} \vee D_0\,(x_i)(x_{i-1}^{\text{п}} \vee x_{i-1}^{)})\, x_{i+1}^{\text{п},(,-} \vee x_i^{(}x_{i-1}^{\text{п}}\overline{D_0\,(x_{i+1})} \vee$$

$$\vee\, x_i^{)}\overline{x_{i+1}^{\text{п}}}\,\overline{D_0\,(x_{i-1})}\,\overline{x_{i+1}^{-}}]=1;$$

$$x_n^{\text{п}}z\,(x_{n-1}) \vee x_n^{)}\,(D_0\,(x_{n-1}) \vee x_{n-1}^{-})=1.$$

Предикат $P_{12}(TL, uw)$ формализует подсчет уровней вложенности лексем:

$$S_k(Tl,\ i,\ p,\ q)=1,\quad Tl_{i,t}^{(}uw_{i,t+1}^{p-q+1} \vee Tl_{i,t}^{)}uw_{i,t+1}^{p-q} \vee \overline{Tl_{i,t}^{(,)}}uw_{i,t+1}^{\varnothing}=1,$$

где

$$S_k(Tl,\ i,\ p,\ q)=\begin{cases} t=\overline{0,\ k_l};\ i=\overline{1,\ k_l}, \\ P_{t=0}^{\varnothing}q_{t=0}^{\varnothing}=1, \\ Tl_{i,t}^{(} \supset \text{Сл}_1\,(P_{t+1},\ P_t), \\ Tl_{i,t}^{)} \supset \text{Сл}_1\,(q_{t+1},\ q_t), \\ \text{Сл}_1\,(x,\ y)=\bigvee_{i=1}^{k_x} x^i y^{i-1}. \end{cases}$$

Регистр uw — уровни вложенности лексем:

$$uw=\{uw_1,\ \ldots,\ uw_{k_l}\};$$

$$uw_i^{\varnothing} \vee \ldots \vee uw_i^m=1,$$

где uw_i — уровень вложенности i-й лексемы, m — максимально допустимый уровень вложенности лексемы.

Проверка на ошибки в следовании скобок осуществляется следующим образом: если уровень вложенности какой-либо лексемы меньше 0, то в выражении от первой лексемы до рассматриваемой число закрывающихся скобок больше числа открывающихся:

$$M(uw_{t,i}, \varnothing) \supset ER^{\text{следование}}, \; i = \overline{1, k_t},$$

где $M(x, y) = \overline{Б(x, y)}(x \otimes y)$, ER — переменная, указывающая на вид ошибки в выражении.

Для нахождения самой приоритетной операции [3] необходимо выделить фрагмент входного регистра, имеющий самую большую вложенность. Введем следующие переменные: muw — максимальный уровень вложенности, переменная определена на множестве целых чисел; sbo — номер лексемы типа открывающаяся скобка с самым большим уровнем вложенности:

$$i^1 \supset muw_{t+1} \sim uw_{t,i},$$
$$\overline{i^1} \supset (Tl_i^{(}Б(uw_{t,i}, \; muw_t \supset (muw_{t+1} \sim uw_{t,i})\, sbo^i.$$

Для формализации поиска закрывающейся скобки с самым большим уровнем вложенности введем переменную sbz — номер лексемы типа закрывающаяся скобка с самым большим уровнем вложенности. Правило определения значения sbz следующее. Первая скобка, которая стоит после открывающейся скобки с самым большим уровнем вложенности:

$$i^{sbo+1} \supset LV_t; \;\; (i = \overline{sbo + 1, \; k_t});$$

$$LV_t\, Tl_{ti}^{)} \supset sbz^i\, \overline{LV}_{t+1},$$

где LV — вспомогательная булева переменная.

Определение самой приоритетной операции заключается в анализе выделенного ранее фрагмента на предмет наличия знака операции, а именно, отрицания, конъюнкции, дизъюнкции, импликации, неравнозначности, эквивалентности. Запишем соответствующую систему уравнений:

$$\left|\begin{array}{l}
P_{12}(p, q, z) = \overline{\bigvee_{i=p}^{q} Tl_t^z(i)}, \; P_{13}(p, q, z) = \bigvee_{i=p}^{q} Tl_t^z(i) \supset S_p^i, \\
\left(\bigwedge_{z \in \{-, \&\}} P_{12}(sbo, sbz, z)\right) P_{13}(sbo, sbz, \vee), \\
\left(\bigwedge_{z \in \{-, \&, \vee\}} P_{12}(sbo, sbz, z)\right) P_{13}(sbo, sbz, \supset), \\
\left(\bigwedge_{z \in \{-, \&, \vee, \supset\}} P_{12}(sbo, sbz, z)\right) P_{13}(sbo, sbz, \oplus), \\
\left(\bigwedge_{z \in \{-, \&, \vee, \supset, \otimes\}} P_{12}(sbo, sbz, z)\right) P_{13}(sbo, sbz, =), \\
\left(\bigwedge_{z \in \{-, \&, \vee, \supset, \otimes\}} F_{13}(sbo, sbz, z)\right) us(L_t, L_{t+1}, sbo, sbz, k_t).
\end{array}\right.$$

Следующим этапом является выдача в регистр выходной информации очередного простейшего уравнения. Переменная W служит дпя описания входного регистра, W_i — i-я переменная регистра, определенная на множестве всех букв $(i=\overline{1,\ k_W})$, k_W — число переменных в регистре. Если выделенная операция — отрицание, то у такой операции всего один аргумент, у всех остальных — по два. Следует также учесть необходимость модификации исходного уравнения с учетом вычленяемого отношения.

В случае короткого уравнения (на две или три переменные), либо когда уже были выделены имеющиеся отношения, а это — последнее, тогда необходимо выдать заключительное уравнение (или единственное) и остановиться. Для этого введем признак окончания:

$$\begin{cases} \mathrm{PO}^{\text{да}} \vee \mathrm{PO}^{\text{нет}} = 1,\ \overline{i^{sp}} z\,(L_{t,i})\, L^{\sim}_{t,i} \supset \mathrm{PO}^{\text{нет}}_t, \\ \overline{i^{sp}}\, \overline{z\,(L_{t,i})} \supset \mathrm{PO}^{\text{да}}_t,\ (i=\overline{1,\ k_l}), \\ L^{-}_{t,sp}\mathrm{PO}^{\text{да}}_t \supset W^{-}_{t+1,1}\,(W_{t+1,2}\sim L_{t,sp+1})\, W^1_{t+1,3} W^{-}_{t+1,4}, \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} & z\,(L_{t,sp})\, L^{=}_{t,sp}\mathrm{PO}^{\text{да}} \supset (W_{t+1,1}\sim L_{t,sp})(W_{t+1,2}\sim L_{t,sp-1})(W_{t+1,3}\sim \\ & \qquad \sim L_{t,sp+1})\, W^1_{t+1,4}, \\ & L^{-}_{t,sp}\mathrm{PO}^{\text{нет}} \supset (W_{t+1,1}\sim L_{t,sp})(W_{t+1,2}\sim L_{t,sp+1})\, W^t_{t+1,3} W^{-}_{t+1,4}, \\ & \overline{L^{-}_{t,sp}}\mathrm{PO}^{\text{нет}} z\,(L_{t,sp}) \supset \bigvee_{i=1}^{3} (W_{t+1,i}\sim L_{t,sp-1+i})\, W^t_{t+1,4}. \end{aligned} \right.$$

t	L_t, W_t
0	$L_0=''$, $W_0=''$
1	$L_1=\{X{:}A.\ \&,\ (,\ Y{:}A,\ V,\ C(X),\ ),\ V,\ Y{:}A,\ \&,\ Z{:}B,\ \sim,\ V(1)\}$. $W_1=''$
2	$L_2=\{X{:}A,\ \&,\ (M_1,\ ),\ Y,\ Y{:}A,\ \&,\ Z{:}B,\ \sim,\ V(1)\}$, $W_2=\{Y:A,\ V,\ C\ (X),\ M1\}$
3	$L_3=\{M2,\ V,\ Y{:}A,\ \&,\ Z{:}B,\ \sim,\ V(1)\}$, $W_3=\{X{:}A,\ \&,\ M1.\ M2\}$
4	$L_4=\{M2,\ V,\ M3,\ \sim,\ V(1)\}$, $W_4=\{Y{:}A,\ \&,\ Z{:}B,\ M_3\}$
5	$L_5=\{\varnothing\}$ $W_5=\{M2,\ V,\ M3,\ V(1)\}$

Теперь произведем корректировку таблицы лексем, исключив имена, которые вошли в сгенерированное уравнение:

$$\mathrm{PO}^{\text{нет}} L^{-}_{t,sp} \supset L^t_{t+1,sp} \bigwedge_{j=sp+1}^{k_l-1} (L_{t+1,j}\sim L_{t,j+1});$$

$$\mathrm{PO}^{\text{чет}}\overline{L_{t,sp}} \supset L^{t}_{t+1,sp} \bigwedge_{j=sp}^{k_t-2} (L_{t+1,j} \sim L_{t,j+2}).$$

Может встретиться такой случай, когда в скобках останется всего один операнд

$$(\text{н/п } S_t = 'A\,(B \vee C) \sim T' \Rightarrow W' = 'B \vee C \sim M',$$

$$S_{t+1} = 'A\,(M) \sim T'),$$

тогда необходимо удалить эти, ставшие ненужными, скобки:

$$\bigwedge_{i=1}^{sbo-1} (L_{t+1,i} \sim L_{t,i+1}) = 1;$$

$$\bigvee_{i=sbz-1}^{k_t-2} (L_{t+1,i} \sim L_{t,i+1}) = 1.$$

В заключении приведем небольшой пример декомпозиции уравнения:

$$x^a \,\&\, (y^a \vee c\,(x)) \vee y^a z^b \sim V^1;$$

$$S = 'X : A \,\&(Y : A \vee C(X)) \vee Y : A \,\&\, Z : B \sim V\,(1).$$

Таким образом, в результате получим систему уравнений:

$$y^a \vee c\,(x) = M_1,$$

$$x^a M_1 = M_2,$$

$$y^a z^b = M_3,$$

$$M_2 \vee M_3 = V^2.$$

Список литературы: 1. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 144 с. 2. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Технические средства. Х., 1986. 132 с. 3. *Вайнгартен Ф.* Трансляция языков программирования. М., 1977. 190 с.

Поступила в редколлегию 09.01.90

УДК 62.506.2

Ю. Н. МАРЧУК, д-р филол. наук

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СИНТАКТИКО-СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ МАШИННОМ ПЕРЕВОДЕ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ В НОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Новая технологическая среда для старой проблемы машинного перевода (МП), насчитывающей уже более тридцати лет своего развития, складывается из ряда факторов. Одним из таких факторов является дальнейшее развитие формального аппарата математического и программного обеспечения для МП. Последняя всемирная конференция по прикладной и вычислительной лингвистике КОЛИНГ в Будапеште в 1988 г. продемонстрировала прогресс в этом направлении. Имеет место дальнейшее развитие средств математической логики, например, появление дефолтной логики, разработаны механизмы для оценки хорошо известных формализмов, таких, как грамматики зависимостей и грамматики непосредственно составляющих, предложены новые модификации формальных аппаратов. Несмотря на то, что проблема разрыва между теорией и практикой языкового анализа остается, поскольку теория рассчитана только на общие и регулярные случаи, а практика как бы сплошь состоит из исключений, не «влезающих» в общую теорию, и на то, что прямых приложений чистых теорий достаточно мало, тем не менее следует констатировать, что многие новые теории уже в большей степени приблизились к языковым фактам, чем это имело место ранее. По крайней мере само осознание разрыва между математической теорией и языковой реальностью уже есть определенный сдвиг в полезном направлении.

Другим моментом является появление персональных компьютеров и совершенствование программного обеспечения, в связи с этим использование новых языков программирования, более, чем прежние, удобных для человека и для лингвистических задач. Затем, дифференцировались дальнейшим образом потоки информации, подлежащей переводу. Этому способствовало не только и не столько учение о подъязыках, которое тоже внесло свой вклад в эту проблему, сколько реальная языковая информационная практика, в ходе которой происходит дифференциация документов по видам. МП сегодняшнего дня в большей степени отвечает информационной реальности, чем прежние проекты высококачественного МП любых текстов без редактирования. Давно стало очевидным, что разные тексты в разной степени пригодны для МП, и экономическая целесообразность МП зависит как от типа текста, так и от типа перевода, которому эти тексты подвергаются.

Значительно расширились возможности редактирования. Если раньше, при пакетной обработке текстов преобладало пост- или, реже, предредактирование, то теперь интерактивный режим дает возможность так или иначе вмешиваться в процесс перевода, или, иногда, в процесс изготовления документа на другом языке в рамках современной информационной технологии.

Накопленный в исследованиях по искусственному интеллекту (ИИ) опыт не может быть напрямую приложен к МП вследствие несоизмеримо большой сложности последнего, тем не менее в части отдельных программных и формальных решений он способствует повышению эффективности МП.

Таковы кратко новые компоненты изменившейся технологической среды для машинного перевода. Наиболее важной частью системы МП является синтактико-семантический анализ, который несет основную ответственность за качество перевода. В ряде систем МП синтаксический и семантический компоненты существуют раздельно. Это не дает достаточного эффекта и в действующих системах синтаксис процедурно не отделен от семантики. Нет необходимости говорить о том, что упрощенные лексические системы МП обладают большими ограничениями по качеству и пригодны только для весьма специфических видов текстов. Даже для сравнительно ограниченных видов текстов необходим аппарат семантического анализа [1].

Основной единицей, которой обычно приписывается синтаксическая и семантическая информация, является слово. После того, как в результате работы алгоритмов морфологического анализа и лемматизации слово выделено в тексте и опознано в словаре, к работе подключаются хранилища словарной информации — машинные словари. Машинная лексикография, особенно в той ее части, которая относится к словарям естественного языка, предназначенным для автоматической обработки текстов, а не для автоматизированных лексикографических работ обычного типа, давно уже обозначила автономность машинного словаря в аспекте состава и структуры, в противопоставление комплементарности словаря обычного типа. Машинный словарь должен содержать всю необходимую информацию для полного анализа лексической единицы, распознанной в тексте. Составление такого словаря — не менее ответственная, а, может быть, и более важная работа, чем составление машинной грамматики. Две основные проблемы словаря — это объем словарной информации и соотношение статического и динамического описаний в составе и структуре словаря.

Объем словарной информации связан с технологичностью современного МП. К слову может быть «привязано» практически необъятное количество словарной информации, полезной и необходимой для анализа текста. Однако по условиям технологичности и совместимости разного вида информации, а также с учетом типа эксплуатации, при котором пополнение словаря является необходимой компонентой режима работы, обычно устанавливается некоторый допустимый объем информации, превышение которого нежелательно.

Трудности машинного перевода иногда приписывают тому обстоятельству, что моделирование для МП идет не по пути воспроизведения речемыслительного процесса, а собственным путем. Представление синтактико-семантических структур продолжает осуществляться в двух основных системах: системе непосредственно составляющих и системе зависимостей. Многолетний спор о том, какая система предпочтительнее, решается практическим способом, а именно берется та, которая удобна для заданной задачи. Следует отметить, однако, что разные предложения относительно грамматики зависимостей для МП имплицитно базируются на том, что синтаксическая структура задана. В то же время в большинстве практических задач автоматической обработки текстов синтаксическую структуру приходится обнаруживать.

Для последнего наиболее эффективны способы локального ее определения. Основные семантические категории, лежащие в основе деления входного словаря на семантико-синтаксические классы и подклассы, категории и группы, фундируют алгоритмы обнаружения смысла, причем вновь отмечается тенденция создания хотя бы ограниченного языка-посредника, семантические категории которого могли бы быть использованы в методике создания специального семантического компонента по типу экспертных систем [2]. Есть также системы, где язык-посредник существует самостоятельно, в виде языка эсперанто, с помощью которого производится перевод на многие другие естественные языки [3]. В обоих случаях, однако, на этом пути нет существенных практических достижений.

Наиболее важным в современных системах МП является этап трансфера, включающий в себя систему переводных соответствий для конкретной языковой пары и некоторые механизмы указаний на то, к каким группам соответствий следует обратиться при разрешении той или иной неоднозначности. С использованием новых и новейших концепций языков программирования разрабатываются интеллектуальные интерфейсы, цель которых заключается в оптимизации работы этапа трансфера. Методы и теория представления знаний, разработанные в ИИ [4], могут быть, таким образом, использованы в МП. Трудности при этом связаны в основном с тем, что предметная область для МП, как правило, состоит из двух частей: собственно предметной области, к которой принадлежат подлежащие переводу тексты, и общеязыковой «предметной области», составленной из единиц плана содержания «общеязыковой» семантики — набора основных лингвистических единиц (семантика глаголов движения, чувствования; семантика таких общеупотребительных слов как «стол», «рука», «предмет» и пр.). Можно утверждать, что трудность высококачественного МП состоит, во-первых, в формализации этой общеязыковой семантики, и, во-вторых, в оптимизации взаимодействия описаний этой семантики и семантики предметной.

Большинство действующих систем МП реализовано на больших ЭВМ с высокими параметрами объема памяти и быстродействием [5]. Появление современных персональных компьютеров высокой мощности и больших интеллектуальных возможностей поставило в повестку дня задачу перенесения алгоритмов МП на эти перспективные машины с целью приблизить технику к потребителю и дать последнему новые удобства технической реализации в трудоемком процессе перевода с одного естественного языка на другой.

В данном исследовании рассматриваются некоторые основные проблемы создания интерактивной системы МП с английского языка на русский на базе персонального компьютера отработать новые средства математического и программного обеспечения для повышения качества МП, изучить и модернизировать возможности интерактивного режима, сделать систему МП обратимой т. е. создать возможность ее использования в оба конца языковой пары, попытаться проанализировать возможно больший отрезок предложения с синтактико-семантической точки зрения, сделать основные этапы перевода наглядными и предусмотреть учебную направленность системы. Такие параметры промышленной системы перевода, как скорость, максимальный охват предметной области словарем и прочее в данном случае нерелевантны.

Программное обеспечение данной системы строится на базе разработанной В. И. Шлейниковым параметрически настраиваемой системы ЛИНГВИК, приспособленной для решения широкого круга задач преобразования естественно-языковых текстов. Функционирование этой системы зависит от настройки на конкретный вид лингвистической переработки текста, определяемой при помощи параметрически задаваемого системе описания закономерностей распознавания фраз входного текста и преобразования их в соответствующие фразы выходного текста. Описание это состоит из четырех взаимосвязанных компонент: описания словаря входного языка (лексический компонент); описания синтактико-семантической структуры фраз входного языка (синтакти-семантический компонент); описания правил вычисления атрибутов при проведении синтактико-семантического анализа; описания правил синтеза фраз выходного языка (компонент семантического синтеза).

Описание синтактико-семантической структуры входного языка базируется на понятии атрибутной трансляционной грамматики, однако это понятие в данном случае существенно модифицировано и расширено, что позволило получить принципиально новые возможности для построения на базе ЛИНГВИК разнообразных транслирующих систем. В принятой интерпретации атрибутная транслирующая грамматика состоит из правил следующих трех видов: правила контекстно-свободной грамматики, при помощи которого система строит дерево вывода для транслирующих предложений; правила вычислений и согласования атрибутов; правила генерации выходного текста — результата работы транслирующей системы.

Важная роль в атрибутной трансляционной грамматике принадлежит понятию атрибут. Атрибуты — это элементы некоторого множества, отражающие те или иные признаки обрабатываемых слов, правил и пр. Атрибутная трансляционная грамматика — это грамматика, строящая из множества терминальных и нетерминальных символов, а также из множества операционных символов цепочку высказывания и обладающая следующими свойствами: каждому терминальному или нетерминальному символу может соответствовать некоторый атрибут или набор атрибутов из определенного в системе множества атрибутов; все атрибуты могут быть либо унаследованными, либо синтезированными; значения унаследованных и синтезированных атрибутов вычисляются в процессе проведения синтактико-семантического анализа транслируемого текста по специально заданным правилам [6].

Для того чтобы описать любое предложение естественного языка средствам атрибутной грамматики, прежде всего необходимо выявить типичные составляющие предложения и описать их соответствующими правилами. В общем случае это становится возможным благодаря структурному подходу, когда язык представляется совокупностью составных частей, связанных определенными отношениями. Будем считать, что основной единицей, выражающей смысл, является предложение. По структуре смысл предложения можно трактовать как систему понятий, отражаемых словами. Эти слова-понятия могут объединяться в словосочетания по правилам формирования отношений между понятиями, образуя новые понятия. Отсюда получается следующая система отношений между структурными единицами языка:

<предложение>
<словосочетание>
<слово>

В данной грамматике составляющая является промежуточным звеном между словом и предложением. Это отличает данный подход от тех систем, в которых за основу берется только синтагма — сочетание двух слов, связанных определенным отношением, и в которых анализ производится путем выявления всех входящих в него синтагм и построения на этой основе дерева зависимостей. Подход системы ЛИНГВИК позволяет решать эти же задачи и, кроме того, открывает возможности для решения других, более сложных задач.

Блок-схема алгоритма МП в данном случае может быть представлена следующим образом (рисунок). Прежде чем разработать алгоритм анализа, необходимо провести тщательное исследование и описание типичных структур входного языка.

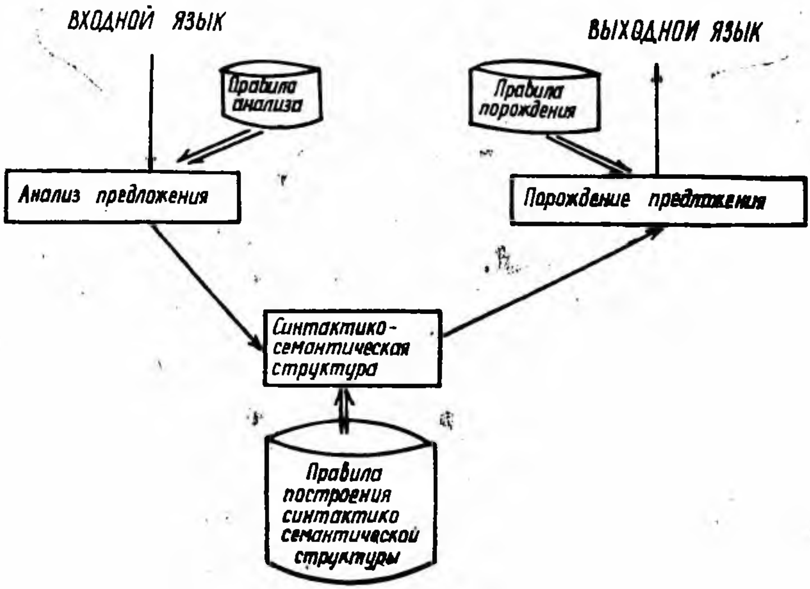
Можно принять, что основным элементом описания предложения является составляющая. Тогда главная лингвистическая задача состоит в определении типичных структур входного языка. Но любая грамматика, адекватно описывающая язык, должна иметь дело практически с каждым правильно построенным предложением естественного языка. Вопрос о том, как при этом быть с единичными явлениями, решается посредством описания таких конструкций и анализа их по специально созданным правилам. Единичное можно задать только перечислением, поэтому достаточно гибкая система должна позволять учитывать и такие случаи. Однако в целом грамматика должна оставаться системой правил, охватывающих бесконечно большое множество структур входного языка.

Общие требования к построению правил грамматики.

Ориентация на разнообразный текстовый материал рассматриваемой области. Полнота может быть обеспечена за счет большого количества текстов.

Принцип экономичности, который подразумевает создание рационального количества правил. Устранение избыточности.

Непротиворечивость — необходимое условие разграничения подобных и разных структур. Правила грамматики не должны противоречить друг другу.



Блок-схема алгоритма МП

Запись правил должна быть удобна и легка в употреблении.

Соблюдение принципов оптимальной автоматической обработки правил — скорость, четкая форма и прочие требования, относящиеся уже не к лингвистической части, как первые четыре требования, а к программной реализации.

Список литературы: 1. *COLING-88.* COLING BUDAPEST. Proceedings of the 12 th International Conference on Computational dinquistics//John von Neuman Society for Computing Sciences. Budapest. 22—27 Auqust. 1988. 1, 2, P. 1—18. 2. *Boitet, Ch.* Pros and Cons ot the Pivot and Transfer Approaches in Multilingual Machine Translation. In: New Directions in Machine Translation/Ed. by Dan Maxwell, Klaus Schubert, A. P. M. Witkam. Budapest, 18/19—8—1988. P. 1—15. W. Tohn Hutchins, Recent developments in Machine Translation. In: op. cit. P. 3—57. 3. *Ihe architecture* of DLT-Interlinqual or Double Direct? Klaus Schubert, op. cit. P. 1—13. 4. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта—проблемы и перспективы. Х., 1987. 158 с. 5. *Марчук Ю. Н.* Проблемы машинного перевода. М., 1983. 232 с. 6. *Шлейников В. И.* Лингвистический инструментальный комплекс «Лингвик» (рукопись). 4 с.

Поступила в редколлегию 02.10.89

УДК 62.506.2

И. Г. БАГИРОВ, М. М. МУРТУЗАЛИЕВ, И. М. КАНАЕВ, К. Д. КУРБАНМАГОМЕДОВ, Т. Г. ВЕЗИРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ В БИОКИБЕРНЕТИКЕ И ПРОБЛЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Философская проблематика интеллекта, в первую очередь, связана с имитацией мыслительной деятельности человека, которая получила название «искусственный интеллект».

Это новое научное направление, которое формируется на стыке кибернетики, биологии, медицины, математической психологии и структурной лингвистики. Можно было бы, конечно, показать, что и более сложная проблема — проблема сознания — также не чужда кибернетическому подходу, ибо кибернетическое исследование этой проблемы проливает новый свет на решение основного вопроса философии, показывает неправомерность идеалистических и других подходов к его решениям [1].

Важнейшими особенностями, отличающими кибернетическое моделирование от других видов моделирования, являются их информационность, управляемость, абстрактность, гемоморфизм и т. д. Как сложен объект исследования, так же сложен и процесс его познания. Моделирование сочетает в себе аналитическую и синтетическую деятельность познающего субъекта. Нельзя абсолютизировать какую-то сторону моделируемого объекта в процессе их отражения. Здесь необходимо также учитывать то, что кроме вещественных моделей мы в кибернетическом моделировании сталкиваемся с абстрактными моделями управления. Основная задача последних — указать пути управления внешними функциями оригинала. Если обычно в научном познании модель является средством предварительного объяснения явления на уровне рабочей гипотезы, то в кибернетике с их помощью мы можем упорядочить поведение объектов, внутренняя природа которых не совсем ясна. Такая модель носит название «черного ящика» и выход системы здесь рассматривается как функция от ее входа и информации о внутреннем состоянии системы, причем эта зависимость является дискретным элементом поведения объекта, характеризующим его состояние в данный момент времени. Это говорит об информационной сущности «черного ящика» и возможности его превращения в «белый ящик» или «вещи для нас». Поэтому правомерность такой модели не вызывает сомнения и возражений, ибо «никаких иных путей изучения внутреннего строения вещи иначе, чем по способу ее поведения, нет и не может быть с точки зрения материалистической диалектики» [2]. Тем более это необходимо для случая, когда дело касается структуры такой сверхсложной системы, как человеческий мозг.

Созданные эвристические программы отражают в основном узкоспециализированные типы психической деятельности человека, а задача состоит в том, чтобы приложить усилия вокруг выяснения фундаментальных (основных и общих) механизмов деятельности мозга. Эвристическое моделирование (программирование) устраняет намного ограниченность математического моделирования. Оно является как бы упрощением упрощения, ибо наводит на мысль — какие из возможных решений задачи следует сначала проверить, какие из них можно исключить, какие возможны, а какие — нет. Решение простых (общих) задач при этом предшествует решению сложных (уже в деталях).

Сходство мозга и ЭВМ в циркуляции информации — весьма необходимое условие для кибернетического моделирования. Но не менее важным является выяснение различия между этими системами. Наряду с субстратными и многими другими отличиями имеется существенное различие и в их структуре. Мозг в отличие от ЭВМ имеет такое строение, что работа его, вероятно, не зависит от точности микроструктуры, тогда как снятие какой-нибудь мельчайшей детали в машине может привести ее к бездеятельности. Отличие мозга от ЭВМ имеется и в отношении объема памяти, что объясняется существованием в нем ассоциативных слоев памяти, при которых каждый элемент более высокого порядка памяти является обобщением набора элементов более низкого уровня.

Если в блоке памяти ЭВМ наличие большого объема информации (памяти) затрудняет извлечение ее в нужный момент, то в человеческом мозгу, наоборот, избыточность информации, видимо, сочетает дискретные (цифровые) и непрерывные (аналоговые) принципы. Современные поколения компьютеров не способны воспроизвести память человека и столь же быстро (как человек) решать задачи распознавания образов.

Сегодняшние компьютеры 4-го поколения, изготавливаемые с применением сверхбольших интегральных схем, обеспечивают обработку больших объемов числовых и информационных данных, «не имея ни малейшего представления» о том, что это за данные.

Работа по проекту создания ЭВМ 5-го поколения дала определенные положительные результаты. Необходимым условием при этом является обеспечение возможности общения пользователей с вычислительной средой на ограниченном естественном языке. Рассмотрим одну из проблем искусственного интеллекта — проблему общения.

Развитие программирования показало, что общение пользователя с ЭВМ — важное звено в эффективности решения задач. Появление развитых диалоговых систем, языков общения и специальных средств редактирования и отладки недвусмысленно говорит об этом. Переход к системам, в памяти которых хранятся не только процедуральные знания, но и декларативные, требует нового подхода к проблеме общения. Для человека идеальным было бы общение на обычном, естественном языке. Кроме того, естественный язык — это, пожалуй, единственная известная нам на сегодня моделирующая система, средствами которой можно описать многообразный окружающий мир. Отсюда большой интерес специалистов в области искусственного интеллекта для описания действительности и средства коммуникации между человеком и системой. Основными задачами в этой области являются: а) синтаксический анализ текстов на естественном языке; б) переход от языковых представлений к языку описания знаний; в) понимание вопросов; г) формирование ответов, интересующих человека; д) извлечение знаний из текстов на естественном языке.

Нерешенных проблем здесь пока предостаточно, но уже сегодня начинают появляться диалоговые системы общения, базирующиеся на естественном языке.

В принципе общаться с системой искусственного интеллекта можно и другими способами. Например, с помощью рисунков и картинок. Поэтому в искусственном интеллекте разрабатываются системы извлечения информации не только из текстов на естественном языке, но и из изображений.

Исследуются также смешанные рисуночно-текстовые объекты. Здесь происходит смыкание искусственного интеллекта с теорией распознавания образов.

Кроме рассмотренной выше проблемы искусственного интеллекта существуют еще три проблемы.

Проблема представления знаний. Представление знаний — ключ к созданию эффективных систем искусственного интеллекта. Уже созданы специальные способы описания структурированных знаний — реляционные и фреймовые языки, строятся алгебраические модели для них.

Проблема планирования. При построении конкретных процедур решения задач системы искусственного интеллекта должны построить план своей деятельности. В зависимости от языка представления знаний процедуры планирования могут основываться либо на поиске логического вывода, либо на поиске путей заданного типа в некоторых сетевых структурах.

Проблема организации поведения. Эта проблема наиболее молода по времени возникновения. Появление технических устройств кардинально изменило положение дел. Возникает необходимость нахождения и имитации метапроцедур, обеспечивающих, с точки зрения человека, приемлемое поведение системы искусственного интеллекта.

Многие из тех полезных функций, которые легко осуществляет мозг, но которые достаточно трудны для вычислительной машины, попадают в категорию распознавания образов. Задачи идентификации слов в письме или в устной речи относятся к области распознавания образов. Разумеется, распознавание образов не ограничивается только распознаванием слов. Системы искусственного распознавания образов называют «ушами и глазами вычислительных машин». Как заметил Оливер Селфридж, без распознавания образов «интеллект» вычислительных машин — нереальное, эфемерное свойство [3]. Иначе говоря, распознавание образов — это особый тип интеллекта; ввод и вывод данных в таких системах осуществляется в текстовом и цифровом виде.

Искусственное распознавание образов вводит вычислительную машину в тесный контакт с реальным миром. Исследования в области роботики также направлены на то, чтобы дать машине возможность непосредственно взаимодействовать с реальным миром. Эти два направления придают искусственному интеллекту особый характер, весьма отличный от всего достигнутого ранее.

В последнее время наибольшее развитие получило распознавание речевых образов. Почти 40 лет ведутся исследования по фонемному распознаванию речевых образов. Одна из проблем данных исследований — фонемное сегментирование, т. е. решение вопроса о том, где кончается одна буква и начинается другая. Различие способностей машины и человека — это различие в организации. Различие замечается, разумеется, и в плане социальной сущности человеческого мозга, но не столько контрастное, как это представляют некоторые авторы. Ведь ЭВМ также является результатом образования и развития общества и служит последнему в содружестве, но при доминирующей роли прогрессивного функционирующего мозга.

Вот эти и многие другие превосходства естественной управляющей системы (мозга) над искусственной системой (ЭВМ) и вызывают необходимость новых подходов к моделированию деятельности мозга. В этом плане важны исследования, проводимые специалистами во всех областях науки и техники, симпозиумы разных уровней. Очередной Всесоюзный симпозиум по проблемам механизмов деятельности мозга проведен в г. Махачкале (сентябрь 1982 г.). На симпозиуме обсуждались вопросы по механизмам пластичности мозга при функциональных и патологических состояниях. Такой подход обеспечивает раскрытие механизмов памяти в организации управляющих и информационных связей между отдельными участками мозга.

Хотя в кибернетическом моделировании, да и вообще в кибернетике, преобладает идея дискретности, большую роль должны сыграть и принципы непрерывности. На подобные недостатки кибернетического моделирования обратили внимание отечественные (Гельфанд И. М., Цетлин М. Л.) и зарубежные (Мак-Коллок, Дж. Фон Нейман) ученые. При этом акцентировалось внимание на тех методах, которые могут устранить (сократить) разрыв в принципах функционирования разбираемых систем. Так, советскими исследователями подчеркивалось, что при моделировании поведения сложных управляемых систем естественно возникает необходимость *выделения простейших форм* такого поведения, *поиски конструкций,* обладающих целесообразным поведением в простейших случаях, и *построние языка,* пригодного для описания взаимодействия простейших конструкций, коллективное поведение которых позволило бы передать существенные черты сложных управляющих систем.

Осуществлением первого из выделенных требований является развиваемый с некоторых пор метод блочного моделирования, где элементами системы служат функционирующие части целого. В этой связи представляется неоправданным строгое деление моделей на материальные (вещественно-агрегатные или физические) и идеальные (информационные). Как известно, для кибернетики субстрактная сторона не столь важна. Поэтому любую модель, названную кибернетической, без всяких оговорок можно считать информационной. Именно воплощением информации являются остальные стороны этих моделей (программы, алгоритмы, технические агрегаты) *.

Иерархичность (в смысле соподчиненность) присуща всем названным сторонам кибернетических систем (программы состоят из подпрограмм, алгоритмы сами таковы и так далее). В рамках кибернетических исследований существуют различные подходы к проблеме деления систем на подсистемы (У. Р. Ушби, Ст. Вир, М. Месарович). Нам представляется более подходящим (наиболее общим) деление на элементы по выполнению ими функций с преобладанием каких-то признаков (по накоплению необходимой для дальнейшего развития информации) общей задачи системы. При этом необходимо непрерывное выполнение системой промежуточных задач. Напомним, здесь большая методологическая роль принадлежит «принципу наименьшего взаимодействия».

В этой связи много еще предстоит сделать в области математики. Алгоритмический подход, разработанный А. Н. Колмогоровым наряду с другими методами: комбинаторным и вероятностным, получает все большее распространение в задачах по определению структурной сложности (количество полезной информации) систем. В рассуждении А. Н. Колмогорова нетрудно заметить связь информации, вернее, ее количества с уровнем сложности: «Известно, что практически важной является задача определения количества информации относительно индивидуального объекта «*у*» на основе информации, заключенной в индивидуальном объекте «*х*». Если эту зависимость «*у*» и «*х*» представить в виде программы (алгоритма), то возможно понятие «относительной сложности» объекта «*у*» при заданных «*х*», которая определяется минимальной длиной 1 «Программы «1» получения «*у*» из «*х*» [4]. Этот подход перспективен и находит применение в информационном моделировании сложной самоорганизующейся системы — человеческого мозга (в сравнительном анализе его с ЭВМ). Он способствует опосредованному изучению структуры

* Хотя эврическое программирование относится к последним успехам кибернетики, некоторые предпосылки его возникновения были созданы еще И. М. Сеченовым и П. П. Павловым, которые разработали объективные способы исследования мозга и анализа сложных функций мышления на основе правил переработки информации.

и функций мозга, позволяет проверить истинность тех или иных гипотез по этим вопросам.

В целях алгоритмизации мыслительной деятельности мозга использованы такие подходы, как физиологический и информационный. Физиологический принцип, базирующийся на моделях нейронного типа, создал ряд неразрешимых проблем. Более эффективным оказался информационный принцип. Для построения алгоритмов работы мозга использовался принцип иерархичности. Блочное моделирование мыслительной деятельности, основанное на эвристическом программировании и алгоритмизации, позволило получить обнадеживающие результаты, которые в дальнейшем можно использовать в системах искусственного интеллекта.

Как известно, человеческий мозг устроен так, что деятельность правого и левого полушарий отличается друг от друга. В первом из них происходит процесс мышления на уровне известных образов, которые в словах не выражаются, а во втором — реализуется мышление с помощью слов. Поэтому восприятие мира будущим поколением систем искусственного интеллекта, главным образом, связано с проблемой сложности имитации деятельности правого полушария. И в этом плане затруднены все виды моделирования работы мозга (эвристическое, на формальных «нервных нейроподобных структурных сетях» и эволюционное). Ни один из них в отдельности целостной картины работы не дает. Однако следует ожидать положительных результатов, если от дискретных и детерминированных подходов перейти к непрерывным и стохастическим процессам, характерным для самых модулирующих систем. Стохастические явления стали предметом познания относительно недавно. Развитие науки представляет собой переход от изучения простых явлений, зависящих от небольшого числа причин, к сложным, требующих создания стохастических моделей. Растригин Л. А. считает [5], что использование стохастических моделей в борьбе с негативными последствиями случая, от которого сильно зависит человек, можно, живя в вероятностном мире. Для этого необходимо создание машин с меняющимися структурами, а это, по его мнению, возможно только методами адаптации структуры связей и функций элементов машины. Сказанное выше касается технической основы создания гибких, приспосабливаемых к меняющимся средам сложных систем. На практике такие системы требуют математического их обеспечения. Для этого, пожалуй, необходимы новые разделы математики и иные подходы к построению ЭВМ (параллельные ЭВМ и параллельное программирование). В частности, создание нового, более мощного, описательного аппарата, чем классическая математика, знание семантики языка для описания мыслительной деятельности человека, а также описание внешней среды.

Заметным вкладом в создание таких теорий является развиваемая А. Н. Колмогоровым вероятностная теория алгоритмов. Математика, как и любая другая наука, вызванная практической необходимостью, развивается и отражает закономерности, присущие действительности. Поэтому вопрос об ограниченности возможностей математики и кибернетики можно считать не очень существенным, так как этих ограничений в принципе нет. Если даже они встречаются, то развитие кибернетического моделирования самоорганизующихся и обучающихся систем не остановится. По справедливому замечанию Б. В. Бирюкова, принципиально такой вид систем и алгоритмов, как природные процессы — реальные развивающиеся человеческие знания. Это следует из результатов теоретической кибернетики, свидетельствующих о возможности построения самоорганизующихся и самообучающихся систем кибернетических и «размножающихся» автоматов [6].

Поэтому пессимистическое отношение некоторых философов и психологов (скажем, Брушлинского) к созданию «искусственного интеллекта» представляется спорным. Дело в том, что вопрос, возможно ли в принципе теоретически (математически) реализовать остается открытым. По утверждению некоторых авторов, в частности У. С. Маккаека и У. Питтса, которые выдвинули теорию первых сетей, т. е. физиологический принцип моделирования, доказали ряд теорем, показывающих, что нейронные сети можно описать средствами исчисления высказывания. И здесь необходимо отметить, что моделирование процессов и описание функционирования это не одно и то же.

Другое направление — моделирование переработанной информации, т. е. эвристическое моделирование. Эвристическое программирование имеет прямое отношение, нацелено на решение проблемы «искусственного» интеллекта. Эвристическое моделирование проводится на уровне информационных процессов, протекающих в мозгу, и стремится воспроизвести их. Однако успехи эвристического моделирования пока еще очень скромны, но тем не менее получены довольно обнадеживающие результаты.

Одним из направлений искусственного синтеза является эволюционное моделирование, которое в отличие от бионического и эвристического стремится заменить процесс моделирования человеческого интеллекта моделированием процесса его эволюции. Другими словами, оно не ограничивается прошлым и настоящим, а на их основе предсказывает будущее состояние окружающей среды. Основным элементом данного вида моделирования является предсказание, которое в сочетании с умением подобрать реакцию на него дает возможность эффективно двигаться к достижению заданной цели. Для современных автоматов как эволюционирующих моделей достаточна постановка цели, а процедура принятия решения будет создаваться самим автоматом. В результате развития этого процесса автомат способен не только успешно решать поставленную задачу, но и описать пути достижения этого решения. Вот эти внутренние построенные идеальные модели «самого себя» и окружающей среды и обеспечивает «выживание» этих моделей, их самоорганизацию и саморазвитие.

Кибернетическое моделирование применимо и в области социально психологических явлений. Основой моделирования социальных процессов, как и во всех других случаях, служит сочетание принципов кибернетики и других наук, а не «механическое перенесение понятий и методов естественных и технических наук на область общественных явлений» [7]. К ним относятся, в частности, принципы: иерархичности и многоуровненности, дискретности и непрерывности, детерминированности и стохастичности. Чем сложнее система, тем больше необходимости применения метода блочного моделирования и агрегирования. Хорошим примером этому служит модель расширенного производства К. Маркса, включающая в себя не только производство средств производства, но и производство средств потребления. Однако надо отметить, что агрегирование не решает всю проблематику прогнозирования развития экономических систем и тем более общества в целом.

Точно также моделирование психических процессов на информационном уровне должно опираться на достижение биологических, психолого-педагогических и социальных наук. Это очень важно, ибо богатая научная информация ведет к созданию более глубоких и адекватных информационных моделей человеческого поведения. Правда, здесь необходимо соблюдать принцип перехода от простого к сложному, другими словами, надо стремиться иметь цепочку постепенно усложняющихся моделей поведения. Не вызывает сомнения и тот факт, что это усложнение произойдет за счет усложнения, в основном, внутренней модели, выраженной в программах и алгоритмах, в создании «моделей мира» и отношение последних с самой действительностью. А это проблема пока не разрешима из-за одноплановости языка ЭВМ, и, как уже отмечалось, дуальности нашего мышления.

Итак, информационное моделирование выступает в качестве важного элемента развивающегося познавательного процесса, ориентированного прежде всего на проблему человека. Так, М. С. Каган, исследуя человеческую деятельность как систему, предлагает рассматривать ее кибернетическую модель, «которая выявила бы: способ превращения деятельности как процесса в продукт, в котором она объективируется, переходит, говоря словами К. Маркса, из формы движения в форму покоя, зависимость характера деятельности, сочетающей ее внутреннюю детерминацию с регулировкой, осуществляемой обратной связью; характер взаимодействия различных видов, разновидностей, конкретных форм деятельности, обусловленный наиболее эффективным способом достижения ее цели, — закономерности сочетания в деятельности моментов материальных и духовных, физических и психических, внутренних и внешних» [8]. Такая постановка исследования, надо согласиться, хорошо выражает единство исторического, логического и других методов познания.

Таким образом, возможность кибернетического моделирования эволюционных процессов и использование при этом теории информации, которое обосновано, как известно, И. И. Шмальгаузеном, способствует дальнейшему развитию познания функциональных процессов реальности. Однако развитие этой точки зрения происходит не без борьбы с иными взглядами. Так, К. Х. Уодигтон [9] прямо говорит о небезопасности и даже опасности использования теории и информации при изучении связей между генотипом и фенотипом. Тем не менее применение кибернетического моделирования в биологии и социологии в одних случаях дало положительные результаты, а в других позволило наметить пути решения. Это зависит от подготовки кибернетики, с одной стороны, биологии и социологии, с другой.

Проблема познания мозга, его фундаментальных механизмов и молекулярной структуры находится в центре внимания и философов. Это связано с тем, что разумное управление человеческим мозгом, использование законов его деятельности для конструирования различных механических устройств, автоматов с применением ЭВМ будет составлять в будущем основу научно-технического прогресса. В связи с возможностью сочетания естественного и искусственного интеллекта переходят от изучения фундаментальных проблем мозговой деятельности к использованию результатов исследований в технической кибернетике. Однако при этом наталкиваются на серьезные препятствия, поскольку отсутстсвует достаточно полная модель искусственного интеллекта, соответствующая современным представлениям о деятельности мозга в естественных условиях [10].

Проблема естественного и искусственного интеллекта выдвигает ряд вопросов философского направления. Тезис материалистической философии «материя первична, сознание вторично» наводит на мысль о том, что интеллект способен отражать законы неорганического мира. Интеллект животных и интеллект человека (первый в примитивной, второй — в высшей форме) опирается на объективно познаваемые процессы и механизмы.

Некоторые кибернетики, специалисты в области «искусственного интеллекта» в результате долгих поисков пришли к выводу, что интеллектуальные машины должны обладать способностью к предсказыванию. Эта важная способность присуща человеческому мозгу, но даже наиболее совершенная система «искусственного интеллекта» такой способностью не обладает. Кроме как, может быть, некоторых систем искусственного интеллекта, которые могут решать элементарные задачи в известной среде.

Тем не менее в настоящее время существует ряд систем искусственного интеллекта, которые функционируют, создан ряд языков для эвристического программирования.

Законы деятельности мозга, как считает Анохин, могут быть использованы при конструировании систем искусственного интеллекта, т. е. искусственного разума. Результаты прямого переноса нейрофизиологических исследований ЭВМ в настоящее время затруднительны, т. к. современные ЭВМ не способны решить таких задач и пока не совсем ясны процессы, происходящие в мозгу.

Авторы [11] при определении понятия «искусственный интеллект ищут общие термины, логику механизмов составляющих интеллект в целом. Среди этих механизмов на первый план они ставят, например, механизмы принятия решения и, в особенности предсказывания, т. е. формирования цели.

Для познания основных свойств естественного интеллекта и для последующего применения искусственного интеллекта необходимо развитие и выработка (совместно с нейрокибернетиками, медиками, биологами, биофизиками) новых методических, методологических и философских проблем интеллекта.

В настоящее время начат новый этап исследований в области искусственного и естественного интеллекта на основе использования принципов самообучения и использования сверхбыстродействующих ЭВМ вычислительного подхода. Задача вычислительного подхода — создание работающих программ, одновременно выполняющих функции теории познавательной активности человека, прежде всего интеллекта.

Список литературы: 1. *Пушкин В. Г.* Диалектический синтез знаний в кибернетике//Материалистическая диалектика. М., 1985. Т. 3. С. 230. 2. *Баженов Л. Б.* К вопросу о философском истолковании метода «черного ящика»//Философия и физика. Воронеж, 1972. С. 183. 3. *Эндрю А.* Искусственный интеллект. М., 1985. С. 135. 4. *Колмогоров А. Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации»//Пробл. передачи информации. 1985. Вып. 1. С. 5. 5. *Растригин Л. А.* Адаптация сложных систем. Методы и приложения. Рига, 1981. С. 121. 6. *Бирюков Б. В.* Машины и мышление (Три принципа)//Художест. и науч. творчество. Л., 1972. С. 257. 7. *Материалы* XXVII съезда КПСС. М., 1986. С. 1—39. 8. *Каган М. С.* Человеческая деятельность. Л., 1974. С. 49. 9. *Уодигтон П. Х.* На пути к теоретической биологии. М., 1970. С. 57. 10. *Анохин П. К.* Мозг и интеллект. Философский смысл проблемы естественного и искусственного интеллекта//Кибернетика живого. Человек в разных аспектах. М., 1985. С. 29. 11. *Фогель Л., Оуэн А., Уолш М.* Исскусственный интеллект и эволюционное моделирование. М., 1969. С. 230.

Поступила в редколлегию 22.11.89

УДК 681.3:519.762

И. Л. БРАТЧИКОВ, д-р физ.-мат. наук

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИСПРАВЛЕНИЮ ОШИБОК В ФОРМАЛЬНЫХ ЯЗЫКАХ

При применении тех или иных языков общения с ЭВМ неизбежно встает вопрос поиска, диагностики, нейтрализации и исправления ошибок, допускаемых пользователями в процессе формирования и передачи сообщений, предназначенных для ЭВМ. Большая часть ошибок относится к синтаксическим. Они возникают вследствие недостаточного знания синтаксических правил соответствующих языков, а зачастую просто в результате описок или небрежного набора текстов. Поиск и диагностика ошибок осуществляются практически всеми алгоритмами обработки входных текстов. Большинство этих алгоритмов выполняет нейтрализацию ошибок, что необходимо для продолжения работы с текстами. Гораздо реже применяются методы, включающие также и исправление найденных ошибок, хотя именно они позволяют наилучшим образом решить весь комплекс проблем, связанных с обработкой ошибок. Если удастся правдоподобно исправить ошибки, допущенные в тексте, то возможны и его дальнейший анализ и выдача качественной диагностики пользователю.

Причины малого распространения методов исправления ошибок кроются, во-первых, в недостаточном развитии теоретических основ соответствующего класса алгоритмов (даже само понятие ошибки трактуется различными авторами по-разному) и, во-вторых, в громоздкости и недостаточной эффективности большинства предложенных методов.

В настоящей статье формулируются различные варианты задачи исправления текстов и приводятся оригинальные алгоритмы их решения для конечных и регулярных языков, основанные на методе направленного перебора.

Введем некоторые обозначения и определим используемые понятия и объекты. Пусть дан конечный алфавит символов V. Через V^* обозначим множество всех цепочек, составленных из символов алфавита V, включая пустую цепочку λ, а V^+ — это множество всех непустых цепочек из V^*. Язык L в алфавите V — это подмножество множества $V^*: L \subseteq V^*$, $|x|$ — длина цепочки x, т. е. количество составляющих ее символов.

Следуя многим авторам, определим элементарную ошибку как пропуск символа, замену символа другим, ошибочным символом или вставку лишнего символа при изображении цепочки некоторого языка. Действия, исправляющие указанные ошибки, соответственно вставку, замену и исключение символа — назовем элементарной коррекцией (ЭК). Так определяются ошибки и действия по их исправлению, например в [3, 8]. В ряде случаев (например, в [1]) элементарной ошибкой считается также перестановка двух соседних символов, однако, она встречается значительно реже других ошибок [2] и поэтому нами не рассматривается. Расстоянием между двумя цепочками $D(x, y)$ будем считать наименьшее число ЭК, с помощью которых цепочка x может быть преобразована в цепочку y. Пусть задан язык $L \subseteq V^*$. Расстоянием между цепочкой $x \in V^*$ и языком L назовем минимальное расстояние между x и цепочками языка: $D(x, L) = \min\limits_{y \in L} D(x, y)$.

Предположим, нам требуется ввести в память ЭВМ цепочку x, однако, при вводе мы допустили элементарную ошибку, в результате чего введенной оказалась цепочка y. Если $D(y, L) = 1$, элементарную ошибку назовем явной, в противном случае, т. е. если $D(y, L) = 0$ (y совпала с некоторой другой цепочкой языка), ошибку назовем неявной. Неявные ошибки вполне могут встречаться при вводе текстов как на естественном языке, так и на языке программирования, либо на другом искусственном языке. Согласпо собранным автором данным около 8 % всех ошибок, допускаемых студентами математико-механического факультета Ленинградского университета в текстах программ на языках ПАСКАЛЬ и АЛГОЛ-68, относятся к числу неявных. Такие ошибки приводят к нарушениям контекстных условий или к семантическим несоответствиям в программах. Понятие неявной ошибки определено в [3], там же приводится алгоритм исправления ошибок в контекстно-свободных языках, который может применяться и для обработки неявных ошибок. В других публикациях этот немаловажный вопрос, по-видимому, не затрагивается.

Функцию расстояния естественно использовать в качестве критерия правдоподобия при исправлении ошибок, допущенных в анализируемых текстах. Для исправления ошибок в цепочке, которая априори должна принадлежать языку L, ищутся цепочки из L, находящиеся на наименьшем расстоянии от анализируемой (но не совпадающие с ней в случае поиска неявных ошибок). Другой часто применяемый критерий основан на функции веса, определяемой на множестве ЭК. При этом исправление сводится к минимизации сумм весов ЭК, с помощью которых анализируемая цепочка преобразуется к цепочкам языка.

Оба приведенных критерия применяются в алгоритмах исправления, которые принято называть глобальными. По причинам, указанным выше, область их применения весьма ограничена — они используются лишь при работе с конечными языками. В других случаях алгоритмы обработки ошибок базируются на критерии близости, который можно назвать принципом максимального правильного начала. Пусть анализируемая цепочка x может быть представлена в виде $x = x_1 a x_2$, где x_1, $x_2 \in V^*$, $a \in V$, причем существует такая $y \in V^*$, что $x_1 y \in L$, но при любой $z \in V^*$, $x_1 a z \notin L$. Тогда x_1 — максимальное правильное начало x и алгоритмы, работающие на основе этого принципа, не ищут ошибки в x_1. Такие алгоритмы обычно называются локальными. Их применение во многих практически важных задачах, например, при трансляции программ, часто затрудняет процесс выявления и исправления ошибок пользователями, так как приводит к неправильной диагностике. Так, простая замена символа «:=» на «=» (вполне возможная вследствие описки) в программе на АЛГОЛЕ-68 в большинстве случаев не будет замечена транслятором в месте ее появления и в дальнейшем приведет к совершенно не соответствующей характеру ошибки диагностике.

Предлагались и другие критерии близости, главным образом с целью повысить эффективность анализаторов [4, 6], но они не являются универсальными.

Из сказанного видно, что проблема разработки эффективных глобальных методов исправления ошибок весьма актуальна. Важной особенностью этих методов в целом и алгоритмов, решающих частные задачи (например, вычисления расстояния), является необходимость просмотра большого числа вариантов. В большинстве предлагавшихся ранее алгоритмов осуществляется их параллельный просмотр, что позволяет избежать возвратов и получить неплохие полиномиальные временные оценки, характерные для детерминированных методов. В частности, к таким алгоритмам относится метод вычисления расстояния, описанный в [8], глобальный метод исправления ошибок в регулярных языках из [7] и некоторые другие. В то же время параллельные алгоритмы имеют и существенные недостатки. Они не столь эффективны на практике, так как их оценки включают большие коэффициенты. Например, оценка времени работы алгоритма из [7] включает квадрат числа состояний распознающего язык конечного автомата. Эти алгоритмы практически не зависят от числа ошибок, допущенных в анализируемых цепочках, хотя интуитивно ясно, что найти одну ошибку гораздо легче, чем несколько. Поэтому представляет интерес рассмотрение методов, основанных не на параллельном, а на последовательном просмотре вариантов анализа. При разработке таких методов были учтены следующие соображения. Во-первых, исправление ошибок в случае, когда их допущено слишком много, не всегда целесообразно. Во-вторых, существенно, требуется ли искать все цепочки языка, ближайшие к анализируемой, либо лишь одну из них. Наконец, следует отдельно рассмотреть задачу поиска неявных ошибок. Это привело к необходимости сформулировать несколько задач анализа цепочек с исправлением ошибок, которые приведены ниже.

Полная задача анализа цепочки x по языку L. Ее решением является подмножество цепочек языка $LL_x=\{y_1, y_2, \ldots, y_m\}$, такое, что $D(x, y_i)=D(x, L)$, $i=1, 2, \ldots, m$ и $D(x, z)>D(x, L)$ для любой $z \in L$, такой, что $z \notin L_*$. Иными словами, для решения полной задачи требуется найти все цепочки языка, ближайшие к анализируемой.

Частичная задача анализа цепочки x по языку L. Ее решением является некоторая $y \in L$, такая, что $D(x, y)=D(x, L)$.

Полная и частичная задачи анализа цепочки по языку ранга k. Если $D(x, L)>k$, то эти задачи не имеют решения, в противном случае их решения совпадают с решением соответственно полной или частичной задач.

Полная или частичная задачи анализа цепочки по языку с заданным расстоянием k. Решением полной задачи является подмножество всех таких цепочек языка $L_xk=\{y_1, y_2, \ldots, y_m\}$, что $D(x, y_i)=k$, $i=1, 2, \ldots, m$; решением частичной задачи является одна из указанных цепочек. Если цепочек, находящихся на расстоянии k от анализируемой в языке, нет, то задачи не имеют решения.

При наличии весовых функций легко сформулировать аналогичные задачи анализа. Приведенные ниже алгоритмы также легко модифицируются для этого случая.

Рассмотрим алгоритмы вычисления расстояния между цепочками. Они являются составной частью анализаторов цепочек по конечным языкам и поэтому их эффективность очень важна. В [8] содержится алгоритм, который является детерминированным и основан на следующем доказанном в данной работе равенстве:

$$D_{i,j}(x, y) = \min(D_{i-1,j-1}(x, y) + D(x[i], y[j]),$$
$$D_{i,j-1}(x, y) + 1, \ D_{i-1,j}(x, y) + 1).$$

Здесь $D_{i,j}(x, y)$ — расстояние между подцепочками, составленными из первых i символов x и первых j символов y. Нетрудно видеть, что при $|x| = m$ и $|y| = n$ реализация этого метода сводится к заполнению матрицы $M[0{:}m, 0{:}n]$, в которой нулевые строка и столбец уже заполнены перед началом работы: $M_{0,i} = i$ и $M_{i,0} = i$. Очевидно, $D(x, y) = M_{m,n}$. Оценка числа сравнений символов имеет вид C_{mn}.

Алгоритм, который предлагается ниже, осуществляет перебор различных вариантов, однако, число сравнений символов, которые он выполняет, также оценивается формулой C_{mn}. При небольших расстояниях (особенно, если $D(x, y) = 1$) он значительно эффективнее приведенного выше. Для описания алгоритма нам потребуется определить понятие трассы: $T(x, y) = x_0, x_1, \ldots, x_l$, где $x_0 = x$, $x_l = y$ и x_i может быть применением одной ЭК, преобразована в x_{i+1}, $i = 0, i, \ldots, l-1$. Длина трассы — это число реализованных в ней ЭК: $|T(x, y)| = l$. Очевидно, существует много различных трасс, преобразующих x в y и $D(x, y) = \min|T_i(x, y)|$. Алгоритм осуществляет перебор трасс для поиска минимальной по длине. В качестве параметра алгоритма задается максимальная длина перебираемых трасс. Иначе говоря, алгоритм вычисляет $D(x, y)$ только в том случае, если это значение не превосходит значения параметра p.

Можно показать, что число трасс, удовлетворяющих приведенному условию, зависит от p, а также от разности длин цепочек x и y, но не от самих длин. Пусть $q = |m-n|$, $A(p, q)$ — число трасс из x в y, длина которых не превосходит p, $r = p+q$. Тогда можно показать, что $A(p, q) = \sum_{i=0}^{r} \binom{r-i}{i} \binom{p}{r-1}$. Эта формула была получена с использованием аппарата производящих функций. При небольших p данное значение невелико, например, $A(1, 0) = 1$, $A(2, 1) = 2$. Однако с ростом p оно быстро возрастает и, например, $A(6, 0) = 141$.

Алгоритм осуществляет посимвольное сравнение цепочек x и y. Если сравниваемые символы не равны, то выполняется перебор возможных в данной ситуации ЭК (замены, исключения и вставки), для чего используется магазинная память. Порядок перебора зависит от разности длин непросмотренных частей цепочек. В процессе работы учитывается минимальная длина уже просмотренных трасс mn: всегда ищутся лишь такие трассы, длина которых не превосходит $mn-1$ (перед началом работы принимается $mn = p+1$). Если $D(x, y) = 1$, алгоритм находит минимальную трассу с первой «попытки» и перебор отсутствует. В случае

$D(x, y) \geqslant 2$ для сокращения перебора применен следующий прием. Пусть сравниваются символы x_i и y_i. Перебрав все варианты дальнейшего анализа цепочек, алгоритм вычислит расстояние между правыми подцепочками цепочек $D(x_i...x_m,\ y_i...y_n)$ и запомнит это значение в специальной таблице. Это позволяет не повторять уже выполненный анализ в случае, если при просмотре других трасс вновь возникает необходимость сравнивать x_i и y_f. Таким образом, каждая пара символов цепочек сравнивается не более одного раза, откуда и следует приведенная выше оценка числа сравнений, выполняемых данным алгоритмом.

Перейдем к задачам анализа цепочек по конечным языкам. Пусть $L=\{x_1,\ x_2,\ ...,\ x_n\}$, x — анализируемая цепочка. Тривиальный метод решения задач заключается в последовательном вычислении $D(x, x_i)$, $i=1,\ ...,\ n$ и построении последовательности индексов цепочек языка, удовлетворяющих необходимым условиям. Ниже рассмотрим алгоритмы, которые требуют вычисления расстояний между x и не всеми, а лишь некоторыми цепочками языка, причем в большинстве случаев количество этих цепочек невелико. Алгоритмы основаны на правиле треугольника (ПТ), которое выполняется для функции расстояния. Аналогичные алгоритмы могут применяться и при наличии весовых функций, не нарушающих ПТ.

Пусть даны произвольные цепочки $x,\ y,\ z \in V^*$. Обозначим $D(x, y)=d_1$, $D(y, z)=d_2$, $D(x, z)=d_3$. ПТ дает неравенства d_1+ $+d_3 \geqslant d_2$; $d_1+d_2 \geqslant d_3$. Из них для любого целого положительного t следуют *утверждения 1, 2:* если $d_1+t<(\leqslant)d_2$, то $t<(\leqslant)d_3$; если $d_1+d_2<(\leqslant)t$, то $d_3<(\leqslant)t$.

Для сокращения перебора цепочек языка при решении полной и частичной задач анализа применим (1). Пусть x — анализируемая цепочка, $y,\ z \in L$, t — некоторый параметр, который будем называть рабочим рангом, определяющим максимальное значение расстояний, которые следует учитывать в процессе работы. Вычислим d_1. Очевидно, при решении полной задачи можно не вычислять d_3, если $d_1+\min(d_1, t)<d_2$, а при решении частичной задачи, если $d_1+\min(d_1 t) \leqslant d_2$. Для проверки этих условий нужно знать d_2. Но так как d_2 — это расстояние между цепочками языка, оно может быть вычислено заранее.

Приведенные соображения позволили разработать методы решения задач анализа, которое можно назвать матричными. Они работают с вычисленными заранее матрицами расстояний между цепочками языков. Учитывая коммутативность расстояния, матрицы можно хранить в треугольном виде без главных диагоналей (поскольку $D(x, x)=0$). В связи со значительным объемом требуемой памяти матричные методы применимы в случае сравнительно небольших языков. Их достоинство в высокой эффективности, мало зависящей от конкретных языков. Алгоритмы решения задач без ранга и с рангами отличаются лишь незначительными деталями: в первом случае перед началом работы рабочему рангу t присваивается большое фиктивное значение (например, 100), а во втором — ранг k. После вычисления каждого расстояния $d_i = D(x, x_i)$, t пересчитывается по формуле: $t_{нов} = \min(d_i, t_{ст})$. Алгоритмы требуют упорядочения словарей как по началам, так и по концам цепочек (путем их инвертирования).

Первый этап работы матричного алгоритма — это обычный бинарный поиск. Если окажется, что $x \in L$, то работа заканчивается. В противном случае производится перебор цепочек языка для вычисления расстояния между ними и x. Пусть x_i — последняя цепочка, с которой сравнивалась x при бинарном поиске. Тогда первыми будут выбраны x_i, x_{i-1} и x_{i+1} (в случае $i=1$ или $i=n$ лишь две из них). Затем выполняется бинарный поиск по концевому порядку и если последней оказалась цепочка x_j, то выбирается она и соседние с ней x_{j-1} и x_{j+1}. Оставшиеся цепочки языка перебираются в порядке их следования в словаре. Каждое расстояние кроме первого вычисляется лишь в том случае, если оно может оказаться подходящим, т. е. для него не выполнено условие из приведенных выше, соответствующее решаемой задаче. Последовательность вычисляемых расстояний определяется с помощью двоичной шкалы, каждый разряд которой соответствует некоторой цепочке языка. Если разряд, соответствующий выбранной цепочке x_h, равен 1, то расстояние вычисляется, при нуле — не вычисляется. Сначала все разряды шкалы единичные, но после вычисления каждого расстояния происходит коррекция шкалы с записью нулей в те разряды, которые соответствуют цепочкам, удовлетворяющим условию. Работа заканчивается, когда шкала окажется нулевой. Мы не касаемся здесь технических деталей алгоритмов — запоминания минимального расстояния, индексов цепочек, входящих в решение задачи и пр.

Для решения задачи анализа с заданным расстоянием, которая позволяет находить неявные ошибки, были использованы утверждения (1) и (2). Из них при $t=k$ следует утверждение: d_3 может равняться k в том и только том случае, если $d_2 - d_1 \leqslant k \leqslant d_1 + d_2$. Это условие проверяется в процессе работы алгоритма для модификации двоичной шкалы. В остальном алгоритме решения этой задачи не отличается от предыдущих, если не считать того мелкого различия, что при $D(x, L)=0$ данный алгоритм не оканчивает работу.

Матричные алгоритмы широко тестировались для ряда языков, таких, как словарь служебных слов языка ПАСКАЛЬ, совокупности случайно выбранных русских слов, модельные языки со свойствами, которые могли бы затруднить анализ. Из-за технических ограничений максимальный объем словарей составил 100 слов. Алгоритмы были реализованы на языке ПАСКАЛЬ. Они показали хорошие результаты. При $D(x, L) \leqslant 2$ и при заданном расстоянии $k \leqslant 2$ в примерно 95 % случаев вычислялось не более шести расстояний, причем мощность языка мало влияла на эту оценку. В случае больших расстояний число вычисляемых значений увеличивалось, но оставалось умеренным. Отметим, что ситуация, когда в определенном контексте ожидаются не все слова данного словаря, а лишь некоторые, моделируется двоичной шкалой с единицами лишь в тех разрядах, которые соответствуют возможным словам. В случае большого по объему словаря (тысячи и более слов) требуется его разбивка на секции, например, по длинам слов и по каким-либо дополнительным признакам внутри совокупностей слов одинаковой длины. При определенных ограничениях каждый элемент матрицы расстояний можно разместить в 2—3-х битах. Эксперименты с большими словарями запланированы на ближайшее время с использованием *IBM*-совместимых персональных ЭВМ.

В заключение упомянем недетерминированный алгоритм анализа ошибок в регулярных языках, разработанный на базе известного алгоритма Вагнера [7]. Его подробное описание выходит за рамки настоящей статьи. Однако следует упомянуть, что он обладает чертами, характерными для алгоритмов, описанных выше: легко модифицируется для решения любой из сформулированных задач, эффективен для наиболее важных с практической точки зрения случаев, когда в цепочках допущены одна — две ошибки. Запоминание результатов уже выполненных вариантов анализа, включенное в алгоритм, позволило получить линейную оценку числа сравнений: C_n, где n — длина анализируемой цепочки. Эта оценка совпадает с оценкой алгоритма Вагнера.

Несомненно, алгоритмы анализа и исправления ошибок, основанные на направленном переборе, требуют дальнейшей разработки.

Список литературы: 1. *Большаков И. А.* ДИСКОР — диалоговая система коррекции текстов//НТИ. 1986. Сер. 2. № 5. С. 8—15. 2. *Большаков И. А.* О чисто автоматической коррекции текстов с опорной на клавиатурную модель типовых ошибок//НТИ. 1987. Сер. 2. № 3. С. 27—31. 3. *Братчиков И. Л., Графеева Н. Г.* Синтаксический анализ ответов при обучении языкам программирования с помощью ЭВМ//Программирование. 1979. № 6. С. 26—30. 4. *Братчиков И. Л., Тетерин А. Н.* Метод идентификации ошибочных кодовых последовательностей в словаре//Вестн. Ленинград. ун-та. 1988. Сер. 1. Вып. 2 (№ 8). С. 100—102. 5. *Долгополов А. С.* Об автоматическом корректоре текстов//НТИ. 1985. Сер. 2. № 3. С. 27—28. 6. *Котов Р. Г., Домбровская И. В., Скокан Ю. П.* Один из вопросов коммуникации человек—машина//Пробл. бионики. 1988. Вып. 40. С. 18—23. 7. *Wagner R. A.* Order-n correction for regular languages//Comm. ACM. 1974. 17, N 5. P. 265—268. 8. *Wagner R. A., Fisher M. J.* The string-to-sfring correction problem//Comm. ACM. 1974. 21, N 9. P. 168—173.

Поступила в редколлегию 18.12.89

УДК 681.3:510.22

Н. Н. БУСЛИК, канд. техн. наук

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАВЕНСТВА АТРИБУТОВ РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Для многих задач проектирования баз данных (БД) и семантического анализа запросов к БД ключевым является вопрос о сходстве атрибутов, принадлежащих одному или разным отнощениям. При его решении в научной литературе и на практике используется широкий спектр понятий от интуитивного понятия «одинаковых по смыслу» атрибутов до строгих теоретико-множественных и формально-логических определений [1, 2]. «Широта» спектра связана с двумя очевидными обстоятельствами. Во-первых, сходство атрибутов имеет несколько типов (степеней), среди которых мы, в частности, будем выделять равенство. (Можно назвать также такие типы сходства, как частичное совпадение значений, взаимная функциональная зависимость и т. д.). Во-вторых, поскольку атрибут задается своим именем и множеством значений, каждый тип сходства, в том числе и равенства, можно рассматривать в различных аспектах. Например, можно говорить о равенстве имен атрибутов, равенстве множеств допустимых значений, равенстве множеств значений в каждом допустимом состоянии БД.

В настоящей работе не ставится задача классификации всех аспектов сходства или равенства атрибутов. Вместо этого выбирается один аспект равенства, а именно, равенство множеств значений атрибутов в каждом допустимом состоянии БД. Такой тип равенства будем называть в дальнейшем вполне равенством и обозначать его символом «$\equiv$». Рассматриваемый аспект равенства оказывается чрезвычайно важным на этапе построения схемы интегрированной реляционной БД. Так, вполне равенство может играть роль статического ограничения на состояния БД и использоваться для устранения дублирования данных [3, 4].

Несмотря на то, что формальные признаки вполне равенства прямо или косвенно вводятся многими авторами, существует необходимость строгого и однозначного толкования этого понятия. Прежде чем перейти к формулировке определений, уточним место вводимого понятия в системе понятий теории реляционных СД. На наш взгляд, различия в подходах к определению равенства атрибутов связаны с различиями концептуальных уровней моделирования БД. Мы будем исходить из того, что определение вполне равенства строится на нижнем концептуальном уровне, каким является уровень логической схемы. Более высокие уровни моделирования БД, такие, как даталогический, инфологический, будем называть в дальнейшем концептуальными, а уровень логической схемы — примитивным. Вводимое ниже понятие вполне равенства ни в коем случае не может заменить понятий «концептуального» равенства атрибутов. Наше определение лишь помогает уточнить, какое место займет то или иное «концептуальное» равенство при его интерпретации на примитивном уровне моделирования. Так, проводя мысленный эксперимент со всеми возможными «правильными» (т. е. допустимыми в концептуальном понимании) экземплярами отношений БД по сопоставлению атрибутов на предмет вполне равенства и получая положительный результат, можно говорить, что для этих атрибутов выполняется предикат концептуального равенства соответствующего типа.

Ввиду сказанного мы не будем пользоваться строгим понятием допустимого состояния БД. В противном случае возникает очевидное противоречие: определение вполне равенства вводится как совокупность некоторых признаков, касающихся всех допустимых состояний БД, в то же время допустимое состояние БД может задаваться с использованием — в качестве ограничения — равенства атрибутов. При разрешении противоречия следует учитывать, что равенство атрибутов как ограничение на состояние БД может объявляться или предполагаться лишь на более высоком концептуальном уровне, поскольку вытекает не из вводимого определения, а из свойств, присущих хранимой (поступающей) в БД информации. Таким образом, объявление ограничения на состояние БД в виде равенства на примитивном уровне является вторичным и может применяться лишь для формализации процедуры контроля поступающей в БД информации (которая в силу ошибок и несанкционированных действий «источника» может не удовлетворять концептуально предполагаемым ограничениям целостности).

Итак, определение допустимого состояния БД является прерогативной концептуального моделирования. В то же время собственно понятие состояния БД, используемое на уровне примитивной модели, хорошо известно в научной литературе [2, 5] (в [2] употребляется термин «реализация БД» и будет использоваться нами в дальнейших определениях без дополнительных пояснений. Допустимое же состояние БД на примитивном уровне понимается как состояние БД, удовлетворяющее концептуальным ограничениям.

Перейдем теперь к определению вполне равенства. Параллельно будет обсуждаться роль вполне равных атрибутов как статических ограничений на состояния БД. Вначале рассмотрим атрибуты одного отношения БД.

Определение 1. *Два атрибута одного отношения БД вполне равны, если, и только если, для каждого допустимого состояния БД значения этих атрибутов в каждом кортеже отношения совпадают.*

Как видим, признак вполне равенства играет в данном определении роль необходимого и достаточного условия, накладываемого на значения атрибутов. Подобный способ определения используется и в дальнейшем.

Из определения 1 однозначно вытекает та роль, которую играет вполне равенство как статическое ограничение на состояние отношения БД. Такое ограничение является более специфическим по сравнению с важнейшим видом ограничений — функциональными зависимостями. Очевидно, из вполне равенства следует взаимная функциональная зависимость атрибутов, обратное в общем случае неверно.

Решение задачи о признаках вполне равенства атрибутов различных отношений проведем в несколько этапов. Трудности определения равенства в этом случае связаны прежде всего с тем, что такого вида статическое ограничение является заведомо более слабым по сравнению с ограничениями, заданными внутри отношений. Таким образом, некорректная декларация равенства атрибутов различных отношений может войти в противоречие с ограничениями на допустимые состояния каждого из отношений. Кроме того, такой признак, как совпадение множеств значений атрибутов различных отношений, не сопровождаемый правилами о порядке сопоставления значений, может служить лишь признаком «эфемерного» равенства. (Заметим, что в соответствии с определением 1 сопоставляются значения атрибутов в одном кортеже отношения).

Таким образом, наша задача состоит в том, чтобы определить, в каких именно кортежах различных отношений БД следует искать совпадающие значения атрибутов, полагаемых вполне равными. По аналогии с определением 1 нам необходимо найти такое отношение, которое включало бы в себя кортежи обоих отношений, где находятся сравниваемые атрибуты. Для получения искомого отношения из двух исходных используем операцию эквисоединения. Напомним, что операция эквисоединения близка операции естественного соединения с тем отличием, что она сохраняет в результирующем отношении все атрибуты исходных отношений [6].

Очевидно, выбираемое нами эквисоединение должно удовлетворять требованию однозначности восстановления исходных отношений при соответствующей его декомпозиции. Нетрудно показать, что это требование выполняется, если соединение осуществляется по «эфемерно» равным атрибутам *. Действительно, если множества значений атрибутов, по которым выполняется соединение, не совпадают, то в соединении теряются кортежи исходных отношений. Единственным атрибутом отношения, значения которого не зависят от значений других атрибутов этого отношения и, следовательно, могут быть декларированы как равные значениям атрибута другого отношения, является ключ. Таким образом, прежде, чем определить вполне равенство произвольных атрибутов различных отношений, необходимо ввести строгое понятие равенства ключей.

Поскольку ключ отношения может быть составным, уточним такие понятия, как значение группы атрибутов и равенство значений. Под значением группы атрибутов понимается кортеж, состоящий из значений этих атрибутов в одном кортеже отношения; порядок расположения элементов кортежа задается произвольно и взаимно однозначно соответствует некоторой перестановке атрибутов в группе. Два значения группы атрибутов называются равными, если и только если при одной и той же перестановке атрибутов соответствующие кортежи совпадают.

Определение 2. *Два ключа двух различных отношений вполне равны, если, и только если, для каждого допустимого со-*

* Речь идет об эквисоединении по условию равенства двух атрибутов — по одному из каждого отношения. Аналогичные рассуждения относятся к соединению по нескольким атрибутам.

стояния БД найдется одна и та же перестановка атрибутов одного из ключей, такая, что множества значений этих ключей будут равными.

Для удобства дальнейшего изложения введем несколько вспомогательных понятий.

Компонентами эквисоединения называются группы атрибутов (атрибуты) каждого из соединяемых отношений, по равенству значений которых осуществляется операция эквисоединения.

Каноническим соединением двух отношений называется их эквисоединение, хотя бы одним из компонентов которого является ключ отношения.

Каноническое соединение называется полным если, и только если, множества значений обоих его компонентов равны.

Все последующие определения вполне равенства используют понятие полного канонического соединения и имеют смысл только в случае, когда такое соединение отношений БД существует.

Определение 3. *Два атрибута двух отношений вполне равны, если найдется полное каноническое соединение с фиксированными компонентами, в котором эти атрибуты вполне равны (в смысле определения 1).*

Фраза «с фиксированными компонентами» в определении означает тот факт, что компоненты соединения в каждом рассматриваемом состоянии БД остаются одинаковыми.

Сформулированный в определении признак вполне равенства соответствует признаку вполне равенства из определения 1 в том смысле, что задается аналогичный порядок сравнения значений двух атрибутов: сравниваются значения из одного кортежа. Естественным является вопрос о единственности сформулированного в определении 3 признака, т. е. о необходимости заданного условия. Нетрудно заметить, например, что атрибуты вполне равных ключей двух отношений попарно вполне равны и, кроме того, не зависят от значений неключевых атрибутов. Можно ли использовать в качестве компонентов канонического соединения отдельные ключевые атрибуты составного ключа? Ответ отрицательный, поскольку значение ключевого атрибута зависит от значения ключа. Поясним это на примере.

Пусть заданы два отношения: ρ_1 с носителем $R_1=A_1B_1C_1$ и ρ_2 с носителем $R_2=A_2B_2C_2$. Пусть, далее, в каждом состоянии БД эти отношения равны в том смысле, что для каждого кортежа из ρ_1 найдется равный ему кортеж в ρ_2, и наоборот. Пусть ключом отношения ρ_1 является группа $K_1=A_1B_1$, а ключом ρ_2 — группа $K_2=A_2B_2$. Зададим теперь конкретный экземпляр отношения ρ_1 как множество кортежей $\{<a_1b_1c_1>, <a_1b_2c_1>, <a_2b_2c_2>, <a_2b_2\times \times c_1>\}$. Экземпляр отношения ρ_2 имеет такой же вид. Рассмотрим эквисоединение ρ_1 и ρ_2 по вполне равным ключевым атрибутам B_1 и B_2. Экземпляр соединения имеет вид:
$\{<a_1b_1c_1a_1b_1c_1>, <a_1b_1c_1a_2b_1c_2>, <a_2b_1c_2a_1b_1c_1>, <a_2b_1c_2a_2b_1c_2>, <a_1b_2c_1a_1b_2c_1>, <a_1b_2c_1a_2b_2c_1>, <a_2b_2c_1a_1b_2c_1>, <a_2b_2c_1a_2b_2c_1>\}$.

Здесь атрибуты A_1 и A_2, C_1 и C_2 оказываются неравными, хотя в соответствии с определением 3 $A_1 \equiv A_2$, $C_1 \equiv C_2$.

Тем не менее условие из определения 3 не является необходимым для вполне равенства атрибутов различных отношений БД. Рассматривая вполне равенство как бинарное отношение на множестве атрибутов, легко убедиться, что в соответствии с определением 1 — это отношение эквивалентности. В то же время из определения 3 не следует свойство транзитивности вполне равенства: поскольку одно отношение БД может иметь несколько ключей, возможна ситуация, когда атрибут этого отношения, вполне равный атрибуту другого отношения, равен атрибуту третьего отношения (равенства $A_1 \equiv A_2$, $A_1 \equiv A_3$ обнаруживаются в соединениях по различным ключам первого отношения). Логично установить, что все три атрибута в описанной ситуации являются вполне равными. Для этого используем понятие полного канонического соединения нескольких отношений как последовательности полных канонических соединений пар отношений.

Определение 4. *Два атрибута двух различных отношений БД вполне равны, если найдется полное каноническое соединение произвольного числа отношений БД, в котором эти атрибуты вполне равны.*

Признак вполне равенства в определении 4 также не является необходимым условием. Поскольку определение вполне равных атрибутов основано на сопоставлении равных ключей, логично расширить это понятие за счет использования функциональных зависимостей атрибутов внутри отношений. А именно, если в отношениях БД заданы функциональные зависимости, то всю БД можно привести в третью нормальную форму (ЗНФ) без потерь информации и с сохранением заданных функциональных зависимостей [6]. Заметим, что в данном случае мы будем использовать не классическое разложение в ЗНФ, а множество всевозможных разложений каждого исходного отношения в ЗНФ, с тем, чтобы получить максимальную возможность сопоставления ключей и выявления вполне равных атрибутов. Заметим также, что получение ЗНФ является пределом разложения отношений для наших целей, так как дальнейшее разложение в нормальную форму Бойса-Кодда не сохраняет заданные функциональные зависимости [6].

Определение. 5. *Два атрибута двух различных отношений БД вполне равны, если, и только если, в ЗНФ БД найдется полное каноническое соединение, в котором эти атрибуты вполне равны.*

Достаточность условия вполне равенства следует из самого определения (фразу «и только если» можно опустить). Интуитивным обоснованием его необходимости служит приведенная выше цепь рассуждений (от определения 1 к определению 5). Для формального обоснования необходимости условия сопоставим его с условием из определения 1, которое служит эталоном вполне равенства.

Теорема. *Если в отношении БД атрибуты вполне равны в смысле определения 1, то при любой декомпозиции этого отношения без потерь информации и с сохранением заданных функциональных зависимостей эти атрибуты будут вполне равными в смысле определения 5.*

Доказательство очевидно, поскольку какова бы ни была последовательность указанных декомпозиций исходного отношения, всегда можно провести обратные действия как операции полного канонического соединения. При этом гарантируется сохранение информации и заданных функциональных зависимостей.

Список литературы: 1. *Хаббард Дж.* Автоматизированное проектирование баз данных/Пер. с англ. М., 1984. 296 с. 2. *Цикритзис Д., Лоховски Ф.* Модели данных/Пер. с англ. М., 1985. 344 с. 3. *Мартин Дж.* Организация баз данных в вычислительных системах/Пер. с англ. М., 1980. 662 с. 4. *Методы* проектирования схемы реляционной базы данных/Н. Н. Буслик, Э. А. Дедиков, А. Н. Жадан и др.//Техника средств связи. Сер. ТЭУ. 1985. Вып. 2. С. 49—51. 5. *Цаленко М. Ш.* Семантические и математические модели баз данных. М., 1985. 208 с. 6. *Ульман Дж.* Основы систем баз данных/Пер. с англ. М., 1983. 334 с.

Поступила в редколлегию 14.06.89

УДК 007:681.3.06

А. Н. АДАМЕНКО, канд. техн. наук,
А. И. ГУБИНСКИЙ, д-р техн. наук,
И. В. КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук, *А. И. НИКОЛАЕВ*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время происходящая в промышленности перестройка диктует резкое сокращение сроков обновления номенклатуры выпускаемой продукции. Эта задача может быть успешно решена только при существенном снижении продолжительности и трудоемкости цикла научно-технической подготовки производства новых изделий.

Одни из путей решения этой задачи — привлечение нетрадиционных методов, лежащих на стыке таких разных областей науки, как АСУ и бионика. Примером такого симбиоза могут служить экспертные системы (ЭС), являющиеся технической реализацией процесса имитации мышления человека.

ЭС представляет собой искусственную систему, способную в данной предметной области эффективно заменять эксперта-человека [1].

Это программно-технический комплекс лингвистических, информационных, программных и технических средств, который обеспечивает организацию, накопление, хранение, обновление и предоставление для использования специально подготовленных композиций знаний как рациональных, прежде всего эвристических, так и строгих — дедуктивных, силлогистических, предназначенных для решения точно определенного класса задач, относящихся к некоторой предметной или проблемной области [2]. ЭС, в отличие от систем, основанных на использовании только строгого, дедуктивного, силлогистического знания, способны решать практические задачи в условиях, когда исходные данные, характеризующие содержание задач, неполны или чрезмерно избыточны. Именно к этому классу задач и относится задача проектирования технологического процесса (ТП).

Как показано в [2], сложность ТП, подлежащих проектированию и использованию в машиностроении, непрерывно растет. Продолжительность, трудоемкость, стоимость проектирования ТП, плата за ошибочные решения, а также дефицит квалифицированных служащих, владеющих всем арсеналом методов и средств, необходимых для разработки высокоэффективных ТП, во многих случаях также возрастают. Все чаще оказывается, что знаний, умения, навыков отдельных проектировщиков недостаточно для успешного проектирования сложных ТП.

Одной из наименее проработанных областей является оценка качества, надежности и эффективности ТП на стадии его проектирования. Особенно сложна оценка качества разрабатываемого ТП при учете характеристик персонала, обслуживающего оборудование.

Для моделирования процесса функционирования (ПФ) организационно-технологических систем (ОТС) используется большое число методов и моделей. Среди методов, получивших широкое распространение, выделяют обобщенный структурный метод (ОСМ) [3, 4].

Основные положения ОСМ сводятся к следующему: процесс функционирования представляется состоящим из ряда типовых функциональных единиц (ТФЕ); каждой ТФЕ приписывается ряд количественных характеристик; на основе разработанных математических моделей определяются показатели эффективности, качества и надежности ПФ в целом, используя данные по отдельным ТФЕ.

Разработанный в рамках ОСМ формализм функциональных сетей позволял моделировать только логико-временную последовательность хода ТП. Совершенствование ОСМ привело к созданию функционально-семантических сетей (ФСС), предназначенных для описания и оценки функционирования эргатических систем, частным случаем которых являются ОТС, с учетом присущих человеку и технике специфических свойств [5].

Знания, заложенные в семантической компоненте сети, позволяют конечным пользователям применять и получать не только количественную информацию о параметрах функционирования ТП, но и качественную, смысловую информацию.

Одним из препятствий, мешающих широкому использованию метода ОСМ и ФСС в практике, является отсутствие знаний в этой области у разработчиков ТП.

Однако в последние годы бурное развитие вычислительной техники и приложений искусственного интеллекта (ИИ) привели к созданию ЭС, оказывающих значительную помощь в преодолении этого препятствия.

Необходимость разработки ЭС обеспечения качества технологических процессов. (ЭС ОКТП) обусловливается еще и тем, что в отличие от этапов проектирования изделий, создания конструкторской документации, разработки технологической документации, этап опытного производства является этапом проб и ошибок, на котором решающую роль играют опыт специалистов и их знания.

ЭС ОКТП предназначена для использования главным инженером, главным конструктором, сотрудниками отдела главного технолога, начальником ОТК, отделом надежности предприятия с целью поддержки принятия решений этими специалистами на этапах проектирования и отладки ТП.

Среди важнейших задач, возникающих при создании систем, интерес представляет разработка средств представления и методов организации в ЭВМ прикладных, математических и программных знаний о данной проблемной области, позволяющих автоматизировать процесс оценки качества ПФ ТП.

Рассмотрим использование ФСС для построения БЗ на примере ТП печатных плат. Среди задач, возникающих перед технологом, выделяют задачу привязки типового ТП к реальному производству. Дело это дорогостоящее и поэтому желательно этот процесс предварительно промоделировать на ЭВМ.

Все существующие разновидности ТП печатных плат изложены в отраслевом стандарте. Согласно этому документу, существует четыре типа ТП, которые применяются в зависимости от нескольких условий.

Рассмотрим эти технологии и введем обозначения: комбинированный позитивный процесс (КП); комбинированный негативный процесс (КН); химический процесс (ХМ); электротехнический процесс (ЭХ).

Обозначим следующие условия применения: жесткие условия эксплуатации (Ж); общее применение (О); в ранее разработанной аппаратуре (Р).

Тогда условия выбора типа ТП можно будет записать в следующем формальном виде:

$$Ж \rightarrow КП \;\&\; КН$$

$$О \rightarrow ХМ$$

$$Р \rightarrow ЭХ$$

Эти условия легко записать на языке ПРОЛОГ и поместить их в виде аксиом интенсиональной части БЗ.

Правила оценки качества ТП и ее выбор в зависимости от условий применения также можно формализовать и занести в БЗ.

Рассмотрим ФСС, моделирующую ТП печатных плат. Последовательность технологических операций может быть представлена следующим алгоритмом:

1) нарезка диэлектрика;
2) подготовка поверхности;
3) термообработка;

.

.

.

16) сдача на склад.

Каждой технологической операции на основании правил, хранящихся в БЗ, может быть сопоставлена типовая функциональная струкутура. Эти правила можно представить в виде продукций, например:

ЕСЛИ в тексте описания технологической операции содержатся фразы типа «входной контроль ...»

ТО данной технологической операции соответствует ТФС «Диагностический контроль с доработкой»;

ЕСЛИ суть технологической операции — изменение состояния изделия или отдельных его параметров;

ТО данная технологическая операция может быть реализована в виде ТФЕ «Рабочая операция».

Кроме этих правил в БЗ могут также находится и описания самих моделей ТФС, из которых будет строится ФСС.

Фрагмент ФСС для описания операций ТП может быть представлен в виде двух компонент: интенсиональной и экстенсиональной.

Экстенсиональная часть реализуется средствами традиционных СУБД и содержит данные о инструменте, оборудовании, заготовках, деталях и т. д. Она соответствует БД, используемых в ранее разрабатываемых АСУ ТП. Экстенсиональная часть создается и обновляется в процессе работы с системой.

Интенсиональная часть содержит редкоизменяемую информацию о сущностях ПО и отношениях между ними, т. е. модель мира. В ней содержатся правила идентификации ФС, соответствующей данной технологической операции, значения о ТП и ЭТС.

Используя данный упрощенный фрагмент ФСС можно ответить, например, на следующие типы запросов: какая функциональная структура соответствует данному ТП; какое должно быть использовано оборудование для данной операции; оценка качества функционирования ТП на основе метода ОСМ (вероятность безошибочного выполнения ТП, среднее время изготовления изделия, дисперсия времени изготовления изделия, вероятный процент брака и т. д.).

Существенное отличие данной реализации от традиционных АСУП — наличие интенсиональной части — БЗ. Это позволяет на основе методов современного логического программирования перейти от запросов типа «поиск информации, сортировка данных и т. д.», характерных для существующих СУБД, к запросам типа «что нужно сделать для того, чтобы ...». Эти запросы требуют наличия в составе системы интеллектуального звена — автоматизированного решателя задач (АРЗ).

Появление языков программирования типа LISP и ПРОЛОГ, а также широкое внедрение персональных ЭВМ с большими объемами оперативной и внешней памяти позволяют перейти к разработке коммерческих вариантов АРЗ, пригодных для работ, в частности, и в составе ЭС ОКТП.

Таким образом, ЭС ОКТП позволят: заполнить пробел между существующими в настоящее время САПР и АСТПП; минимизировать сроки, трудоемкость и стоимость проектирования вновь разрабатываемых ТП; обеспечить удобный интерфейс для специалиста, не знакомого с аппаратом ОСМ и ФСС.

Прототип системы реализован на ЭВМ типа СМ-4, но в перспективе предполагается использовать систему в полном объеме на персональных компьютерах, совместимых с IBM PC.

Интенсиональная часть реализована с использованием языка логического программирования ПРОЛОГ, а экстенсиональная — с использованием СУБД.

Список литературы: 1. *Алексеева Е. Ф., Стефанюк В. Л.* Экспертные системы— состояние и перспективы//Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1984. № 5. С. 153—167. *Ступаченко А. А.* САПР технологических операций. Л., 1988. 234 с. 3. *Губинский А. И.* Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л., 1982. 270 с. 4. *Попович П. Р., Губинский А. И., Колесников Г. М.* Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов. М., 1985. 256 с. 5. *Gubinsky A. I., Adamenko A. N.* Functional — Semantic Nets — the universal Formalism for Defining the Quality of Functioning of Man—Machine Systems// Man — Machine Systems. Analysis, Design and Evaluation. Preprints of the IFAC/IFIP/IEA/IFORS Conference. Oulu, Finland. 1988. 2. P. 393—398. 6. *ОСТ4 Г0.054.058.* Платы печатные. Типовые технологические процессы. Редакция 1—72. 1973. 128 с.

Поступила в редколлегию 12.09.89

УДК 681.5

В. И. ЛАЗАРЕВ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Для решения системы логических уравнений разработаны численные методы. С целью сокращения процесса поиска корней уравнений проводится классификация последних и поиск соответствующих методов решения, учитывающих конкретные особенности задачи [1]. Аналитические методы, дающие решение в виде логической формулы, известны только для частных случаев.

Для системы уравнений, каждое из которых может быть преобразовано в булеву функцию, принимающую значение 1 на корнях этого уравнения, предложен метод нахождения функции, принимающей значение 1 на корнях системы [2].

Исследован класс логических уравнений, обладающих свойствами обращения, найдем критерий обратимости системы уравнений и предложена методика решения задачи обращения для такой системы уравнений [3]. Здесь же дано обоснование целесообразности аналитического решения системы уравнений в общем виде.

В данной статье доказывается возможность аналитического решения системы логических уравнений общего вида и предлагается метод решения этой задачи.

Любое логическое уравнение можно привести к двум уравнениям вида

$$y = a \oplus b \quad (1); \quad a = cx \quad (2).$$

Первое уравнение решается относительно a, b непосредственным применением операции «сложение по модулю 2». Второе уравнение не может быть решено аналогичным образом с помощью операций булевой алгебры. Причину этого можно видеть, рассмотрев геометрическое представление двоичной функции [4]. В этом представлении логическое *И* в формуле (2) не является операцией. Действительно, переменные c и x являются координатами двумерного пространства, cx — точка их пересечения, но функция a, принимающая значение 1 в точке cx, не принадлежит рассматриваемому пространству.

Идентичность геометрического представления всех членов рассматриваемого уравнения может быть достигнута расширением двумерного пространства до трехмерного — c, x и a. В этом представлении переменная a рассматривается как соответствующая координата и функция $a = cx$ представляется набором точек, на которых она существует. Тогда формуле $a = cx$ и ее таблице состояний можно поставить в соответствие следующий набор точек в двоичном трехмерном кубе

$$\begin{matrix} a & c & x \\ \bar{a} & \bar{c} & x \\ \bar{a} & \bar{c} & \bar{x} \\ \bar{a} & \bar{c} & \bar{x}. \end{matrix} \qquad (3)$$

Очевидно, что над этим набором можно выполнять все операции, допустимые для наборов задания булевых функций. Следовательно, (3) можно привести к виду

$$\begin{matrix} a & c & x \\ \bar{a} & & x \\ a & c & . \end{matrix} \qquad (4)$$

Матрица инверсных значений переменных (5) этого набора описывает точки трехмерного куба, в которых рассматриваемая функция не существует

$$N = \begin{vmatrix} \bar{a} & \bar{c} & \bar{x} \\ a & & x \\ a & c & \end{vmatrix} = a\bar{c} \vee a\bar{x} \vee \overline{ac}x. \tag{5}$$

Здесь конъюнкции подпространства N находятся построчным покрытием рассматриваемой матрицы.

С учетом последнего свойства набор (4) определяет все точки трехмерного куба.

Очевидно, что уравнение (1) также может быть приведено к виду (4), (5).

Каждое уравнение системы из m уравнений может быть приведено к виду (4). Пересечение областей существования всех уравнений системы дает область, в которой существует решение каждого из уравнений системы

$$\begin{vmatrix} a_1 & c_1 & x_1 \\ \bar{a}_1 & & \bar{x}_1 \\ \bar{a}_1 & c_1 & \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} a_2 & c_2 & x_2 \\ \bar{a}_2 & & \bar{x}_2 \\ \bar{a}_2 & \bar{c}_2 & \end{vmatrix} \cap \ldots \cap \begin{vmatrix} a_m & c_m & x_m \\ \bar{a}_m & & \bar{x}_m \\ \bar{a}_m & \bar{c}_m & \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} a_1 & c_1 & x_1 & a_2 & c_2 & x_2 & \ldots & a_m & c_m & x_m \\ a_1 & c_1 & x_1 & a_2 & c_2 & x_2 & \ldots & \bar{a}_m & & \bar{x}_m \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_1 & c_1 & x_1 & \bar{a}_2 & & \bar{x}_2 & \ldots & \bar{a}_m & \bar{c}_m & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{a}_1 & \bar{c}_1 & & \bar{a}_2 & \bar{c}_2 & & \ldots & \bar{a}_m & \bar{c}_m & \end{vmatrix}. \tag{6}$$

Рассматривая (4) как набор задания функции x, можно получить решение уравнения (2) относительно x в виде логической формулы. Действительно, определенному значению x соответствует конъюнкция ac. На наборе $\overline{ac}$ функция x имеет неопределенное значение, что в логических схемах с обратной связью может отражать свойство «памяти». Эта область может быть представлена в виде коньюнкции $П\,\overline{ac}$, где переменная $П$ имеет произвольное значение 0 или 1. Аналогично, матрица (5) определяет область, где функция $N\overline{ac}$ не существует. Эта конъюнкция принимает значение N, если $\overline{ac}=1$. Таким образом, решение уравнения (2) относительно x может быть представлено в виде

$$x = ac \vee П\overline{ac} \vee \overline{ac} = ac \oplus П\overline{ac} \oplus \overline{ac}.$$

Из (4) непосредственно следует, что все три области не пересекаются.

С использованием этого свойства аналогичным образом из набора (6) может быть получено выражение любой переменной через другие переменные системы.

Пример (из работы [1]). Дана система из девяти уравнений

$$y_1 = u_1 \vee y_3; \qquad y_6 = y_5 y_8;$$

$$y_2 = \overline{y}_1 \vee y_6; \qquad y_7 = y_3 \vee y_8;$$

$$y_3 = \overline{y}_5; \qquad y_8 = u_3 y_9 \vee \overline{u}_3 \overline{y}_9;$$

$$y_4 = y_1 u_2; \qquad y_9 = \overline{y}_2 \vee y_7.$$

$$y_5 = y_4 \oplus u_3;$$

Требуется найти значения y_1, y_8 и y_9 в зависимости от u_1, u_2 и u_3.

Для y_1 подстановкой можно получить выражение

$$y_1 = u_1 \vee (y_1 u_2 \oplus \overline{u}_3)$$

и привести к виду

$$y_1 (\overline{u}_1 u_2 \oplus 1) = u_1 \oplus \overline{u}_1 \overline{u}_3.$$

Область существования решения

$$\left| \begin{array}{llll} y_1 & (u_1 \oplus \overline{u}_1 \overline{u}_2 u_3) & & \\ \overline{y}_1 & \overline{u}_1 & & u_3 \\ & u_1 & & u_2 u_3 \\ & & & \end{array} \right| = \left| \begin{array}{llll} y_1 & u_1 & & \\ y_1 & \overline{u}_1 & \overline{u}_2 & \overline{u}_3 \\ \overline{y}_1 & \overline{u}_1 & & u_3 \\ & \overline{u}_1 & u_2 & u_3 \end{array} \right|.$$

Следовательно,

$$y_1 = (u_1 \vee \overline{u_2 u_3}) \vee \Pi_1 \overline{u}_1 u_2 u_3 \vee N_1 \overline{u}_1 u_2 \overline{u}_3.$$

Для y_8 и y_9 могут быть получены уравнения

$$y_8 = y_9 \oplus \overline{u}_3; \tag{7}$$

$$y_9 = y_1 \vee y_8 \vee (y_1 u_2 \oplus \overline{u}_3). \tag{8}$$

Области существования решений для этих уравнений

$$\left| \begin{array}{ll} y_8 & (y_9 \oplus \overline{u}_3) \\ y_8 & (y_9 \oplus u_3) \end{array} \right|, \quad \left| \begin{array}{llll} y_9 & (y_1 \vee y_8 \vee (y_1 u_2 \oplus \overline{u}_3) & & \\ \overline{y}_9 & \overline{y}_1 & \overline{y}_8 & u_3 \end{array} \right|.$$

Область существования решения для уравнений (7), (8)

$$\left| \begin{array}{llll} y_8 & y_9 & u_3 & \\ y_8 & y_9 & \overline{u}_3 & \\ y_8 & \overline{y}_9 & u_3 & \overline{y}_1 \\ & & & \end{array} \right| = \left| \begin{array}{llll} y_8 & y_9 & u_3 & y_1 \\ \overline{y}_8 & y_9 & \overline{u}_3 & \\ y_8 & \overline{y}_9 & u_3 & \overline{y}_1 \\ & & u_3 & \overline{y}_1 \end{array} \right|.$$

Отсюда $y_8 = u_3 y_1 \vee \Pi_8 u_3 \overline{y}_1$. Из уравнения (7) $y_9 = y_8 \oplus \overline{u}_3$

Из полученных формул, например, следует, что при комбинации входных сигналов $u_1\bar{u}_2u_3$ выход y_1 находится в неустойчивом состоянии, а выходы y_8, y_9 принимают состояние 0 и 1 соответственно.

Выводы. Доказана возможность представления логической функции n переменных в расширенном двоичном пространстве $n+1$ измерений в виде набора точек с отображением значения функции как одной из координат этого же пространства. Показана целесообразность такого представления для решения системы логических уравнений и обоснован метод решения.

Предложенное представление решения системы в виде логических формул, определяющих три непересекающиеся подпространства независимых переменных, в которых решение определено однозначно, имеет произвольное значение и не существует. Такое представление расширяет возможности анализа логических сетей.

Список литературы: 1. *Закревский А. Д.* Логические уравнения. Минск, 1975. 95 с. 2. *Закревский А. Д.* К решению систем логических уравнений//Принципы построения сетей и систем. М., 1964. С. 48—55. 3. *Бохман Д., Постхоф Х.* Двоичные динамические системы. М., 1986. 401 с. 4. *Поспелов Д. А.* Логические методы анализа и синтеза схем. М., 1974. 368 с. 5. *Лазарев В. И.* Свойства двоичной логической функции и нахождение ее минимальной формы//Управляющие системы и машины. 1987. № 4. С. 18—20.

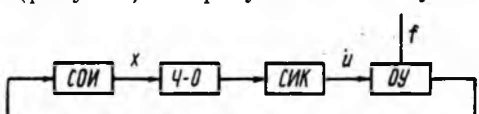
Поступила в редколлегию 04.11.89

УДК 007.51

А. Е. РАДИЕВСКИЙ, канд. техн. наук

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АДАПТАЦИИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Рассмотрим структурную схему исследуемой системы управления (СУ), где ОУ — объект управления, вектор фазовых координат x которого связан с управляющим воздействием u зависимостью $x=F(x, u)$ (рисунок). В результате возмущающего воздейст-



Структурная схема исследуемой системы управления

вия f отмечается нарушение расчетного режима функционирования СУ, появляется отклонение Δx вектора фазовых координат от вектора задающих воздействий $x^{зад}$. Человек-оператор (Ч-О) узнает о нарушении расчетного режима функционирования СУ с помощью средств отображения информации (СОИ). Задачей

Ч-О является формирование и реализация посредством системы исполнения команд (СИК) управляющего воздействия u с целью отработки возникшего отклонения Δx и при условии, что процесс отработки удовлетворяет требуемым показателям.

Деятельность Ч-О в исследуемой СУ связана с двумя типами адаптации. Первый тип обусловливается процессами, связанными с приобретением Ч-О требуемого уровня профессиональной пригодности (обученности) (способность выполнять определенные действия с требуемыми показателями). Ко второму типу относятся процессы, возникающие при перестройке Ч-О своей деятельности в результате изменения условий функционирования СУ. В настоящей статье исследуются вопросы, связанные с первым типом адаптации.

Термин «требуемый уровень профессиональной пригодности (обученности)» предполагает наличие у Ч-О специальных знаний, навыков и умений в рамках имеющегося информационного обеспечения деятельности и его психофизиологических возможностей. Овладение знаниями, возникновение навыков и превращение всех элементов деятельности в умения происходит успешно и экономически оправданно при предварительном обучении и тренаже на специализированном тренажере (СТ). Процесс обучения и тренажа на СТ, как правило [1], строится на основе человеко-машинной обучающейся системы («технические средства (ТС) — инструктор (И)»), предназначенной для реализации процесса управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О. Как показывает отечественный и зарубежный опыт эффективность функционирования системы «СТ — Ч-О — И» в значительной степени определяется тем, насколько верно и полно при ее проектировании решены следующие три вопроса: чему учить (каким знаниям, навыкам и умениям); на чем учить (на каких ТС реализовывать процесс обучения и тренажа); как учить (каким образом строить процесс обучения и тренажа). Решение третьего вопроса связано с разработкой психолого-педагогического обеспечения (ППО), которое должно: основываться на теории управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О, на принципиальном положении данной теории о решающей роли ориентировки личности в успешности человеческой деятельности [2]; являться основой для разработки учебно-методического обеспечения (УМО); способствовать оптимальному использованию ТС в процессе обучения и тренажа.

ППО представляет собой комплект психологических и педагогических материалов. Психологические материалы базируются на инженерно-психологических и психофизических принципах [3], а педагогические — на основных принципах дидактики. Для исследуемой СУ проектирование ППО связано: с психолого-педагогической подготовкой И деятельности в системе «СТ — Ч-О — И»; с разработкой: а) психологической модели процесса управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О; б) психолого-педагогической модели процесса обучения и тренажа; в) УМО.

Психолого-педагогическая подготовка направлена на формирование у И психолого-педагогических принципов деятельности в системе «СТ — Ч-О — И». Содержание программы психолого-педагогической подготовки базируется на профессиограмме И и направлено на усвоение им общих психолого-педагогических принципов концепции управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О и использования методических принципов их реализации. Психологическая модель процесса управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О базируется на таких понятиях, как цель процесса обучения и тренажа, схема и способы представления ориентировочной основы деятельности Ч-О в структуре процесса обучения и тренажа, методика реализации деятельности Ч-О в ходе процесса обучения и тренажа с требуемыми показателями. Конкретизация цели процесса обучения и тренажа производится с позиции требуемого уровня профессиональной пригодности (обученности) и его исходного уровня у Ч-О. Разработка схемы и способов представления ориентировочной основы деятельности позволяет обеспечить гибкое и полноценное овладение Ч-О требуемыми профессиональными характеристиками деятельности. Методически это реализуется посредством разработки: схемы ориентировочной основы деятельности Ч-О в исследуемой СУ, ядром которой являются учебные материалы; учебно-тренировочных и контрольных задач; системы условий, позволяющих организовать процесс обучения и тренажа с использованием ТС.

Психолого-педагогическая модель процесса обучения и тренажа базируется на таких понятиях, как учебное содержание процесса обучения и тренажа, структура учебно-тренировочного занятия, используемые ТС. Основой при построении учебного содержания является принцип неразрывной связи цели и содержания процесса обучения и тренажа.

Реализация данного принципа базируется на таких особенностях функционирования системы «реальный ОУ — Ч-О», как опосредственный контакт с ОУ через СОИ и СИК, циклический управляюще-контролирующий характер деятельности Ч-О с выделением основных этапов деятельности: наблюдение, оценка ситуации, принятие решения, реализация принятого решения, оценка результатов реализации принятого решения. Реализация каждого из перечисленных этапов деятельности Ч-О базируется на функционировании некоторых психических процессов, характеризующих основные уровни психологического построения деятельности: наблюдение — сенсорный (сенсорные навыки), оценка ситуации — наглядно-образного мышления (перцептивные, аттенционные, мнемонические и имажинитивные навыки), принятие решения — интеллектуальный (мысленные навыки), реализация принятого решения — моторный (сенсорно-моторные навыки), оценка результатов реализации принятого решения — сенсорные (сенсорные навыки). Структуирование учебного содержания осуществляется в виде учебных программ (вводно-смысловая, обеспечивающая, основная) и материалов (системно-ориентированные, учебные и контрольные задачи).

Основной «единицей» учебной программы является учебная тема. Учебно-тренировочное занятие — основная «единица» организационного обеспечения процесса обучения и тренажа на СТ, а их комплект представляет собой целостный набор учебных занятий, последовательная реализация которых обеспечивает полноценное усвоение учебной цели. Основными составляющими учебно-тренировочного занятия являются: учебная цель, предварительная и полная ориентировка, процесс усвоения и контроля усвоения учебного материала. Формирование учебной цели осуществляется исходя из представления о процессе обучения и тренажа на СТ как о последовательном процессе управляемого целенаправленного формирования профессиональных характеристик Ч-О. Предварительная ориентировка служит для представления Ч-О цели учебно-тренировочного занятия, его места в общей структуре процесса обучения и тренажа на СТ. Полная ориентировка служит для реализации процесса систематизации схем ориентировок различных уровней.

Организация процесса усвоения учебного материала связана с разработкой и реализацией системы учебных заданий. Организация процесса контроля усвоения учебного материала связана с определением форм и критериев контроля. Принципы использования ТС определяются учебными целями конкретного этапа процесса обучения и тренажа, характером его учебного содержания и способом представления.

УМО предназначается для организационного обеспечения хода процесса обучения и тренажа, строится как открытая система и в ходе процесса обучения и тренажа обеспечивает: его организацию по гибкой программе с изменением временного масштаба (ускорение или замедление) и программное нарастание сложности решаемых задач (по принципу «от простого к сложному») в зависимости от начального уровня знаний, навыков и умений Ч-О, а также степени усвоения им учебного материала; контроль за ходом процесса и оценку деятельности Ч-О. УМО состоит из учебного и методического обеспечения. Основой учебного обеспечения является библиотека учебных материалов. Методическое обеспечение предназначено для управления ходом процесса обучения и тренажа и состоит из двух взаимосвязанных систем: управления и контроля. Система управления ходом процесса обучения и тренажа используется при анализе исходных данных о Ч-О, формировании цели и решаемых задач в ходе процесса обучения и тренажа, выборе методик и программ, а также планировании хода процесса обучения и тренажа. Система контроля хода процесса обучения и тренажа предназначается для организации объективного контроля полученных Ч-О знаний, навыков и умений, а также выявления методологических и методических пробелов в ходе процесса обучения и тренажа. Система контроля строится как человеко-машинная («ТС — И»), реализующая констатирующий и прогнозирующий контроль на основе критериев, учитывающих точностные, временные, энергетические и надежностные аспекты деятельности Ч-О.

Список литературы: 1. *Тренажерные системы*/Под ред. В. Е. Шукшунова. М., 1981. 256 с. 2. *Подольский А. И.* Становление познавательного действия. Научная абстракция и реальность. М., 1987. 175 с. 3. *Справочник* по инженерной психологии/Под ред. Б. Ф. Ломова. М., 1982. 368 с.

Поступила в редколлегию 01.11.89

УДК 62—52 : 681.3.06.2

В. Е. ХОДАКОВ, канд. техн. наук, *В. Г. ШЕРСТЮК*

О ПИКТОГРАФИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕЙСЕ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Использование в операционных системах и оболочках интерфейса пользователя, основанного на окнах, меню, пиктограммах и применении манипуляторов «мышь» (OS macintosh, GEM, MS-windows), для построения диалога дает возможность привлекать в ходе работы интуитивные начала, общаться с системой на неформальном уровне. Команды при этом связываются с перемещениями манипулятора нажатиями клавиш, а состояние изменяемой таким образом среды отображается на экране. Вследствие недостаточной изученности способов организации таких интерфейсов появляются неэффективные системы. В системах GEM и Macintosh на экране располагаются пиктограммы, соответствующие имеющимся внешним устройствам и находящимся на них файлам. Уничтожить файл можно, указав на него курсором и переместив пиктограмму файла к пиктограмме мусорной корзины. Создать новый файл можно, указав на пиктограмму блокнота и дважды нажав клавишу манипулятора [1].

Операции удаления и выбора файлов выглядят с точки зрения пользователя естественно, операции же создания файлов или удвоения пиктограмм — надуманно, неестественно. Кроме того, хаотичное нагромождение окон затрудняет восстановление предыстории их создания и взаимодействия.

В системах такого рода, например в MS-Windows, широко применяются ниспадающие или шторковые меню, при выборе команды, в которых происходят смены или наложения меню на экране, скачки курсора и т. д.

Подобные недостатки приводят к тому, что человек в процессе работы тратит много сознательных усилий на обдумывание, какими действиями можно достичь необходимого результата, замедляется темп работы.

Для построения пользовательского интерфейса, свободного от указанных недостатков, выполнены классификация и анализ объектов, с которыми пользователь работает в операционной среде.

Выделены следующие три класса объектов: файлы, устройства и окна. Каждый из указанных классов имеет свой ограниченный набор команд. Большинство команд совпадают по своим содержательным свойствам, например, копирование или перемещение содержимого файлов, устройств или окон. Очевидно, существует способ реализации ортогонального набора команд для трех объектов. При этом пользователь получает в руки однотипный для различных видов работ инструментарий.

Следовательно, с точки зрения обеспечения необходимых эргономических характеристик возникает потребность в непосредственном интерфейсе пользователя с ортогональным набором команд для иерархически построенного набора объектов.

Рассмотрим пиктографический интерфейс с точки зрения динамики диалога. Пиктограмма — знаковая система, выполняющая обычно следующие функции. 1. В образной форме показывает количественные характеристики какого-либо явления, объекта. 2. Указывает месторасположение объекта. 3. Показывает функциональное назначение органов управления и индикации. 4. Инспирирует определенный тип поведения пользователя показом ситуации или объекта [2]. Цель пиктограммы — обратить вимание на основной факт, не акцентируя его на деталях.

Установлено, что для четкого понимания пиктограмм требуется актуализация ранее приобретенных знаний и опыта, т. е. предъявляются повышенные требования не только к мыслительным, но и к мнемическим процессам — процессам памяти. При этом достаточно большую роль играет воображение. Обратим внимание также на то, что фиксация взгляда пользователя всегда попадает на наиболее информативные элементы пиктограмм, а восприятие и переработка информации возможны лишь во время таких фиксаций.

Из описанного выше следует, что сложность пиктограмм определяют по скорости и точности восприятия и понимания. Для количественной оценки предлагается следующее выражение:

$$s=\sum_{j=0}^{n} fj\left(\frac{1-t^2}{v(lj)\,v(\mu j)}\right),$$

где l_j — время восприятия j-го элемента пиктограммы; μ_j — время понимания j-го элемента пиктограммы; t — показатель точности; v — показатель скорости.

При $t=1$ (абсолютная точность восприятия) оценке сложности s будет соответствовать значение $\varnothing$, что необходимо выбирать в качестве точки начала отсчета.

Точность можно определить статистическими методами на выборке для n пользователей:

$$t=\frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n},$$

где l_i — точность понимания и восприятия пиктограммы j-м пользователем.

Если сложность возрастает (увеличивается количество элементов и связей между ними), увеличивается и время восприятия, а в наиболее структурно сложных пиктограммах, кроме того, ухудшаются и показатели понимания за счет неправильного выбора опорных информативных мест. В то же время уменьшение сложности может привести к неоднозначности понимания [3].

Пиктограммы, показывающие назначение органов управления и индикации, облегчают и ускоряют процесс обучения, уменьшают вероятность ошибок.

Заметим, что пиктограммы способны непосредственно отображать свой денотат, но могут также отображать подмененный денотат. Простые пиктограммы при условии удачной подмены своего денотата очень эффективны по скорости восприятия, но требуют известных умственных усилий для понимания. Последнее, однако, в большой мере компенсируется легкостью запоминания и длительностью сохранения в памяти. Эффективность восприятия пиктограмм зависит от ряда факторов: семантической связи изображения с представляемым понятием; информативности (количества и качества информации о денотате); определенности предметного содержания; меры условности изображения и степени абстрагирования от второстепенных деталей при сохранении признаков означаемого; особенностей структуры: количества графических элементов, способных кодировать смысл, а также композиционно-графического решения (контур, силуэт и т. д.) [2].

Соответственно уровню восприятия и понимания пиктограмм для построения диалога целесообразно разбивать программную среду на несколько (не более 5—6 из условия хорошей ориентации) четко очерченных режимов работы. Например, управление файлами, управление устройствами, установка конфигурации и т. д. При этом режим работы необходимо отразить не только соответствующей экранной средой, но и специальной пиктограммой класса. Наиболее передовым решением являлось бы изменение пиктограммы указателя (курсора) в зависимости от контекста работы и режима. В каждом из режимов работы должно обеспечиваться управление только одним классом объектов, например, только файлами. Тогда текущий набор объектов данного класса может быть отображен набором пиктограмм класса 2 (к примеру, содержимое дискеты — пиктограммами файлов).

Что же касается директив, команд, то анализ показал, что визуализацию в качестве пиктограмм целесообразно осуществлять только для 7—8 наиболее часто употребимых команд, таких, как скроллинг в окне, перемещение курсора и т. д. Остальной набор команд должен быть максимально ортогонален для всех имеющихся режимов и доступен через контекстно-изменяемые «появляющиеся» меню. (Естественно, что команды в этих меню макже могут выражаться пиктограммами класса 3). Такой вариант пострения схемы диалога наиболее динамичен вследствие лучшей различимости объектов и большей направленности действий пользователя, чем в используемых ОС.

Список литературы: 1. *Даниелс Б.* Архитектура персональной ЭВМ Lisa// ТИИЭР. 1980. **72,** № 3. С. 114—126. 2. *Антонов А. В.* Информация: восприятие и понимание. К., 1988. С. 143—184. 3. *Rogourth B. E.* Ihe human visual system: A guide for the display technologist. Proc. Soc. Informat. Display. 1983. **24,** N 3. P. 253—258.

Поступила в редколлегию 18.05.89

УДК 681.3; 681.5 : 007

Н. В. АЛИПОВ, д-р техн. наук

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ К СИНУСОИДАЛЬНЫМ ПОМЕХАМ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ТОЧКИ НА ОТРЕЗКЕ [0, 1]

Многие задачи искусственного интеллекта (узнавание букв некоторого алфавита [1], поиск некоторого элемента множества или точки с определенным признаком на отрезке [0, 1] и др.) решаются путем проведения конечного числа экспериментов. Причем эксперименты так размещают по интервалам неопределенности, чтобы наименьшим их числом получить интервал неопределенности относительно искомого элемента требуемой длины.

Планирование экспериментов и их анализ составляют предмет исследования теории поиска [2]. Известные алгоритмы поиска не являются помехоустойчивыми. Нами [3] синтезированы помехоустойчивые к импульсным помехам алгоритмы поиска точки с характерным признаком на отрезке единичной длины.

В процессе поиска наиболее опасны синусоидальные помехи. Применение в таких случаях известных помехоустойчивых алгоритмов [3] приведет к существенному увеличению погрешности поиска. Последнее можно значительно уменьшить, используя помехоустойчивые к синусоидальным помехам алгоритмы поиска. Рассмотрим такие алгоритмы поиска точки с характерным признаком на отрезке единичной длины.

Для синусоидальной помехи характерно то, что ее амплитуда не изменяется в процессе преобразования, а интервал между импульсами равен нулю.

Если выбрать к тому же длительность хода алгоритма, равную

$$\Delta t = \pi / \omega_{\text{ср}_{\text{н}}},$$

где $\omega_{\text{ср}_{\text{н}}}$ — нижняя частота среза спектральной плотности помехи, то синусоидальную помеху можно считать частным случаем A_2-последовательности [3], для которой $a = \text{const}$, $a \in [0, a_{\max}]$; $l = 1$; $н = 0$.

Этот частный случай импульсной последовательности назовем П (a, 1)-последовательностью, для которой справедлива запись: $B_1B_2B_1B_2$ ..., где B_1 — положительный (отрицательный) импульс последовательности; B_2 — отрицательный (положительный) импульс последовательности.

Действие П ((a, 1)-последовательности можно обнаружить посредством принципа «повторных сравнений» [3]. Действительно, пусть на x аддитивно накладывается П (a, 1)-последовательность, тогда, сопоставляя $X(t)$ с составляющими α-набора на двух соседних шагах алгоритма, получим исходы:

$$a_0)\ X(t_1) \in [x^1_{\gamma_1},\ x^1_{\gamma_1+1});\ X(t_2) \in [x^1_{\gamma_1},\ x^1_{\gamma_1+1});$$

$$a_1)\ X(t_1) \in [x^1_{\gamma_1},\ x^1_{\gamma_1+1});\ X(t_2) \in [x^2_{\beta},\ x^2_{\beta+1});$$

$$a_2)\ X(t_1) \in [x^1_{\gamma},\ x^1_{\gamma_1+1});\ X(t_2) \in [x^2_{q},\ x^2_{q+1});$$

где $\gamma_1 = \overline{0,\ k}$; $\beta > \gamma_1$; $q < \gamma_1$; $t_2 = t_1 + \Delta t$.

Для исхода a_0) $x \in [x^1_{\gamma_1},\ x^1_{\gamma_1+1})$, для исходов a_1), a_2) характерно действие П (a, 1)-последовательности; причем для исхода a_1) B_1 — отрицательный импульс; для исхода a_2) B_1 — положительный импульс. Следовательно, принцип «повторных сравнений» позволяет обнаружить действие П (a, 1)-последовательности и полярность ее первого импульса.

Найдем оптимальные комбинации помехоустойчивых алгоритмов и алгоритмов, используемых принцип «повторных сравнений», корректирующих действие синусоидальных помех (П (a, 1)-последовательностей).

Поскольку для П (a, 1)-последовательности $|B_1| = |B_2|$, то для ее подавления будем исходить из соотношения

$$x = \{X(t_1) + X(t_2)\}/2, \tag{1}$$

где $X(t_1) = x + B_1$; $X(t_2) = x + B_2$, $B_1 + B_2 = 0$; $|B_1| \leqslant a = a_{\max}$.

Для кодирования x, как вытекает из соотношения (1), необходимо определить наименьшее значение $X_{\min}(t)$ и наибольшее $X_{\max}(t)$, для которых справедливо неравенство

$$|X_{\max}(t) - X_{\min}(t)| \leqslant 2a. \tag{2}$$

Так как в процессе преобразования определяется не x, а $X(t)$, необходимо вместо интервала неопределенности [0, 1] ($x \in [0, 1]$) рассматривать интервал $[-a,\ 1+a]$, $X(t) \in [-a,\ 1+a]$. Для этого интервала неопределенности принцип «пересечения отрезков» запишется в следующем виде:

$$\begin{gathered} X(t_1) \in [x^1_{\beta},\ x^1_{\beta+1}),\ \beta = \overline{0,\ k}; \\ X_{\min}(t_1) \in [x^{1,1}_{\beta},\ x^1_{\beta+1});\ X_{\max}(t) \in [x^1_{\beta},\ x^{1,2}_{\beta+1}); \\ x^{1,1}_{\beta} = x^1_{\beta} - 2a;\ x^{1,2}_{\beta+1} = x^1_{\beta+1} + 2a. \end{gathered} \tag{3}$$

Поскольку в процессе преобразования необходимо одновременно кодировать $X_{\min}(t)$ и $X_{\max}(t)$, после совершения первого шага алгоритма интервалом неопределенности относительно $X_{\min}(t)$, $X_{\max}(t)$ будет интервал $[x_{\beta}^{1,1},\ x_{\beta+1}^{1,2})$.

Проанализируем все возможные исходы, возникающие после совершения ρ-го шага алгоритма ($\rho=\overline{2, i}$). Из принципа «пересечения отрезков» [3] вытекает истинность утверждения.

Утверждение 1. Если установлено, что $X(t_{\rho-1}) \in [x_q^{\rho-1},\ x_{q+1}^{\rho-1})$, $X(t_\rho) \in [x_\beta^\rho,\ x_{\beta+1}^\rho)$, то $X_{\min}(t)$, $X_{\max}(t) \in [x_\beta^{\rho,1},\ x_{\beta+1}^{\rho,2})$, где $x_\beta^{\rho,1}$, $x_{\beta+1}^{\rho,2}$ определяются соотношениями:

$$a_1)\quad x_\beta^\rho \leqslant x_q^{\rho-1}$$

$$x_\beta^{\rho,1} = \begin{cases} x_\beta^\rho - 2a, & \text{если } x_\beta^\rho - 2a \geqslant x_q^{\rho-1,1}, \\ x_q^{\rho-1,1}, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$a_2)\quad x_\beta^\rho > x_q^{\rho-1}$$

$$x_\beta^{\rho,1} = \begin{cases} x_\beta^\rho - 2a, & \text{если } x_\beta^\rho - 2a \geqslant x_q^{\rho-1}, \\ x_q^{\rho-1}, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$a_3)\quad x_{\beta+1}^\rho \geqslant x_{q+1}^{\rho-1}$$

$$x_{\beta+1}^{\rho,2} = \begin{cases} x_{\beta+1}^\rho + 2a, & \text{если } x_{\beta+1}^\rho + 2a \leqslant x_{q+1}^{\rho-1,2}, \\ x_{q+1}^{\rho-1,2}, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$a_4)\quad x_{\beta+1}^\rho < x_{q+1}^{\rho-1}$$

$$x_{\beta+1}^{\rho,2} = \begin{cases} x_{\beta+1}^\rho + 2a, & \text{если } x_{\beta+1}^\rho + 2a \leqslant x_{q+1}^{\rho-1}, \\ x_{q+1}^{\rho-1}, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Величину, обратную от длины интервала неопределенности, полученного на i-м шаге алгоритма, обозначим через $\psi^n(i, k)$. Для функции $\psi^n(i, k)$ справедливо утверждение.

Утверждение 2. Для двухшагового алгоритма справедливо соотношение $\psi^n(i, k) = k+1$. Действительно, пусть $X(t_1) \in [x_{\gamma_1}^1,\ x_{\gamma_1+1}^1)$, $X(t_1+\Delta t) \in [x_\beta^2,\ x_{\beta+1}^2)$, $\gamma_1=\overline{0, k}$; $\beta=\overline{0, k}$. Тогда на основании соотношения (1) имеем

$$x \in [(x_{\gamma_1}^1 + x_\beta^2)/2,\ (x_{\gamma_1+1}^1 + x_{\beta+1}^2)/2).$$

Поскольку в силу принципа повторных сравнений $x_q^1 = x_q$ $q=\overline{1, k}$, то $(x_{\gamma_1+1}^1 + x_{\beta+1}^2)/2 - (x_{\gamma_1}^1 + x_\beta^2)/2 = (1+2a)/(k+1)$.

В этом случае для исходного интервала неопределенности $(-a,\ 1+a)$ справедливо соотношение $\Psi^n(2, k) = k+1$.

Пусть не выполняется принцип «повторных сравнений», т. е. $x_q^1 \neq x_q^2$. Тогда из неравномерности распределения составляющих α-набора возможно, что

$$x^2_{\rho_1+1} - x^2_{\rho_1} > (1 + 2a)/(k + 1), \ \rho_1 = 0, \ k,$$

а для исхода

$$X(t_1) \bar{\in} [x^1_{\gamma_1}, \ x^1_{\gamma_1+1}); \ X(t_1 + \Delta t) \in [x^2_{\rho_1}, \ x^2_{\rho_1+1})$$

справедливы соотношения:

$$x \in [(x^1_{\gamma_1} + x^2_{\rho_1})/2, \ (x^1_{\gamma_1+1} + x^2_{\rho_1+1})/2),$$

$$L = (x^1_{\gamma_1+1} + x^2_{\rho_1+1})/2 - (x^1_{\gamma_1} + x^2_{\rho_1}/2, \tag{4}$$

где L — длина интервала неопределенности, полученного после совершения 2-го шага алгоритма.

Преобразуем выражение (4) к виду:

$$L = (x^1_{\gamma_1+1} - x^1_{\gamma_1})/2 + (x^2_{\rho_1+1} - x^2_{\rho_1}).$$

Поскольку

$$x^1_{\gamma_1+1} - x^1_{\gamma_1} = (1 + 2a)/(k + 1);$$

$$x^2_{\rho_1+1} - x^2_{\rho_1} > (1 + 2a)/(k + 1),$$

то, очевидно, что $L > (1 + 2a)/(k + 1)$.

Следовательно, для $i=2$ отступление от принципа повторных сравнений только лишь ухудшает оценку алгоритма, что доказывает утверждение.

Принцип повторных сравнений позволяет не только обнаружить проявление синусоидальной помехи, но и определить полярность B_1 — импульса П $(a, 1)$-последовательности. Действительно, если предположить, что на $(\rho—1)$-м шаге алгоритма выделен интервал $(x_q^{\rho-1}, x_{q+1}^{\rho-1})$, а на ρ-м шаге применен принцип повторных сравнений в сочетании с принципом «пересечения отрезков» ($x^\rho_{\gamma_1} \leqslant x^{\rho-1}_{q+1}$, $x^\rho_\beta \geqslant x^{\rho-1}_{q+1}$, то возможны следующие исходы:

$$\begin{aligned} &\text{а)} \ X(t_{\rho-1} + \Delta t) < x^\rho_{\gamma_1}; \\ &\text{б)} \ X(t_{\rho-1} + \Delta t) > x^\rho_\beta; \\ &\text{в)} \ X(t_{\rho-1} + \Delta t) \in [x^\rho_{\gamma_1}, \ x^\rho_\beta). \end{aligned} \tag{5}$$

Поскольку $X(t_{\rho-1}) \geqslant x_q^{\rho-1}$, $X(t_{\rho-1}) \leqslant x_{q+1}^{\rho-1}$,

то для исходов а), б) возникает противоречие, которое свидетельствует о действии П$(a, 1)$-последовательности.

С учетом соотношений (5) для исхода а) B_1-импульс имеет отрицательную полярность; для исхода б) — положительную полярность. Относительно $X_{\min}(t_{\rho-1}+\Delta t)$; $x_{\max}(t_{\rho-1}+\Delta t)$ возникают интервалы неопределенности:

для исхода а)

$$X_{\min}(t_{\rho-1}+\Delta t)\in[x_q^{\rho-1,1},\ x^{\rho}_{\gamma_1}),$$
$$X_{\max}(t_{\rho-1}+\Delta t)\in[x^{\rho}_{\gamma_1},\ x^{\rho,2}_{\gamma_1}); \tag{6}$$

для исхода б)

$$X_{\min}(t_{\rho-1}+\Delta t)\in[x^{\rho,1}_{\beta},\ x^{\rho}_{\beta}),$$
$$X_{\max}(t_{\rho-1}+\Delta t)\in[x^{\rho}_{\beta},\ x^{\rho-1,2}_{q+1}, \tag{7}$$

где

$$x^{\rho,2}_{\gamma_1}=\begin{cases}x^{\rho}_{\gamma_1}+2a, & \text{если } x^{\rho}_{\gamma_1}+2a\leqslant x^{\rho-1}_{q+1};\\ x^{\rho-1}_{q+1}, & \text{в противном случае;}\end{cases}$$

$$x^{\rho,1}_{\beta}=\begin{cases}x^{\rho}_{\beta}-2a, & \text{если } x^{\rho}_{\beta}-2a\geqslant x^{\rho-1}_{q};\\ x^{\rho-1}_{q}, & \text{в противном случае.}\end{cases}$$

Справедливость соотношений (6), (7) вытекает из принципа пересечения отрезков.

После обнаружения $\Pi(a,\ 1)$-последовательности, определения полярности B_1-импульса и выделения интервалов относительно $X_{\max}(t)$, $X_{\min}(t)$ необходимо применить оптимальный непомехоустойчивый алгоритм в каждом из интервалов.

Следует заметить, что уменьшать интервал неопределенности относительно $X_{\min}(t)$ либо $X_{\max}(t)$ можно только через шаг алгоритма. Эта особенность алгоритма вытекает из свойств $\Pi(a,\ 1)$-последовательности (импульсы положительной и отрицательной полярности чередуются таким образом, что если на ρ-м шаге действовал импульс положительной полярности, то на $(\rho+1)$-м шаге будет действовать импульс отрицательной полярности). Следовательно, если исходы а) и б) возникли на ρ-м шаге алгоритма, то отрезки $[x^{\rho}_{\gamma_1},\ x^{\rho,2}_{\gamma_1}]$, $[x^{\rho,1}_{\beta})$ будут уменьшены в m_1 раз; отрезки $[x^{\rho-1,1}_{q},\ x^{\rho}_{\gamma_1})$, $[x^{\rho}_{\beta},\ x^{\rho-1,2}_{q+1})$ — в m_2 раза;

$$m_1=\begin{cases}(k+1)^{](i-\rho)/2[}, & \text{если } (i-\rho)\text{ — четное число;}\\ (k+1)^{](i-\rho)[+1}, & \text{в противном случае;}\end{cases}$$

$$m_2=(k+1)^{](i-\rho)/2[}. \tag{8}$$

На основании соотношений для m_1 и m_2, а также свойства принципа пересечения отрезков (длина взаимного пересечения отрезков равна $2a$) вытекает истинность утверждения.

Утверждение 3. Если имеет место соотношение $2a=h(k+1)^{]i/2[}$, то оптимальным алгоритмом поиска точки x при действии $\Pi(a,\ 1)$-последовательности будет алгоритм:

$(\rho+1)$-й шаг. Равномерно разместить в интервале $(x_q^\rho, \quad x_{q+1}^\rho)$ составляющие α-набора:

$$x_{\gamma_2}^{\rho+1} = \gamma_2 (x_{q+1}^\rho - x_q^\rho)/(k+1), \ \gamma_2 = \overline{1,\ k};$$

выделить новый интервал неопределенности

$$(x_{\gamma_1}^{\rho+1},\ x_{\gamma_1+1}^{\rho+1}),\ \gamma_1 = \overline{0,\ k};$$

$(\rho+2)$-й шаг. Равномерно разместить в интеревале (x_q^ρ, x_{q+1}^ρ) составляющие α-набора, выделить новый интервал неопределенности $(x_\beta^{\rho+2},\ x_{\beta+1}^{\rho+2})$, $\beta=\overline{0,k}$. Если $\gamma_1=\beta$, то следующие два шага алгоритма совершаются в интервале $(x_{\gamma_1}^{\rho+1},\ x_{\gamma_1+1}^{\rho+1})$ аналогичным образом, как совершались $(\rho+1)$-й, $(\rho+2)$-й шаги алгоритма. Если $\gamma_1 \neq \beta$, то $(\rho+3)$, $(\rho+4)$-й шаги алгоритма выполняются следующим образом:

$(\rho+3)$-й шаг. Составляющие α-набора разместить равномерно в интервале $x_{\gamma_1}^{\rho+1}$, $x_{\gamma_1+1}^{\rho+1}$, выделить новый интервал $(x_{\gamma+3}^{\rho_3};\ x_{\gamma_3+1}^{\rho+3})$;

$(\rho+4)$-й шаг. Равномерно разместить в интервале $(x_\beta^{\rho+2},\ x_\beta^{\rho+2})$, составляющие α-набора, выделить новый интервал $(x_{\beta_1}^{\rho+4},\ x_{\beta_1+1}^{\rho+4})$, $\gamma_3 = 0, k$, $\beta_1 = \overline{0, k}$. Следующие два шага алгоритма совершить аналогичным образом, как совершались $(\rho+3)$-й, $(\rho+4)$-й шаги алгоритма. Этот алгоритм в дальнейшем будем называть C-алгоритмом.

При размещении составляющих α-набора левее x_q^ρ и правее x_{q+1}^ρ, может, как было показано ранее, возникать исход в), для которого справедливо утверждение.

Утверждение 4. Если установлено, что $X(t_\rho) \in [x_q^\rho,\ x_{q+1}^\rho)$, $x_{\gamma_1}^{+2n+1} \leqslant x_q^\rho$, $x_\beta^{\rho+2n+1} \geqslant x_{q+1}^\rho$, $n=0,\ 1,\ \ldots,\ X(t_\rho + (2n+1)\Delta t) \in$ $\in [x_{\gamma_1}^{\rho+2n+1},\ x_\beta^{\rho+2n+1})$, то для искомой точки справедливо соотношение $x \in [x_{\gamma_1}^{\rho+2n+1},\ x_\beta^{\rho+2n+1})$. Действительно, если $x_{\gamma_1}^{\rho+2n+1} = x_q^\rho$ $x_\beta^{\rho+2n+1} = x_{q+1}^\rho$, то истинность утверждения вытекает из принципа повторных сравнений. Для всех других случаев истинность утверждения основывается на утверждении 1.

В процессе поиска x возникает необходимость в распределении составляющих α-набора в интервалах $(x_q^{\rho,1},\ x_q^\rho)$, $(x_q^\rho,\ x_{q+1}^\rho)$, $(x_{q+1}^\rho,\ x_{q+1}^{\rho,2})$. Закономерность распределения составляющих α-набора обосновывает следующее утверждение.

Утверждение 5. Если имеют место следующие соотношения:

$$X(t_\rho) \in [x_q^\rho,\ x_{q+1}^\rho);$$

$$h(\gamma+1)(k+1)^{](i-\rho-(2n+1))/2[} > x_q^\rho - x_q^{\rho,1};$$

$$h(k+2-\beta)(k+1)^{](i-\rho-(2n+1))/2[} > x_{q+1}^{\rho,2} - x_{q+1}^\rho,$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 1, \text{ если } (i-\rho) \text{ — нечетное число;} \\ \leqslant k, \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} k, \text{ если } (i-\rho) \text{ — нечетное число;} \\ \leqslant k, \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

то интервал неопределенности относительно точки x формируется на основании таких соотношений:

для $n \geqslant 1$ и $\gamma < \beta$

$$x^{\rho+1}_{\Delta_1} \in [x^{\rho}_{q}, x^{\rho}_{q+1}), \; x^{\rho+1}_{\Delta_1} \neq x^{\rho}_{q}, \; x^{\rho+1}_{\Delta_1+1} \neq x^{\rho}_{q+1}, \; \Delta_1 = \overline{1, k};$$

для $n = 0$

$$x^{\rho+1}_{\Delta_2} = \begin{cases} x^{\rho,1}_{q} + h\Delta_2 (k+1)^{|(i-\rho-1)/2|}, \text{ если } x^{\rho+1}_{\Delta_2} < x^{\rho}_{q}; \\ x^{\rho}_{q}, \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

$$\Delta_2 = \overline{1, \gamma};$$

$$x^{\rho+1}_{\Delta_3} = \begin{cases} x^{\rho,2}_{q+1} - h(k+1-\Delta_3)(k+1)^{|(i-\rho-1)/2|}, \text{ если } x^{\rho+3}_{\Delta_3} > x^{\rho}_{q+1}; \\ x^{\rho}_{q+1}, \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

$$\Delta_3 = \overline{\beta, k},$$

$$x^{\rho+1}_{\Delta_4} \in [x^{\rho}_{q}, x^{\rho}_{q+1}), \; \Delta_4 = \overline{(\gamma+1), (\beta-1)};$$

для $n > 1$, $\gamma > \beta$; $\beta < 0$ и $\gamma > k$

$$x^{\rho+1}_{1} = x^{\rho}_{q}, \; x^{\rho+1}_{\Delta_5} \in [x^{\rho}_{q}, x^{\rho}_{q+1}), \; \Delta_5 = \overline{2, k-1},$$

$$x^{\rho+1}_{k} = x^{\rho}_{q+1};$$

для $n > 1$, $\gamma = 0$, $\beta < 0$

$$x^{\rho+1}_{\Delta_6} \in [x^{\rho}_{q}, x^{\rho}_{q+1}), \; \Delta_6 = \overline{1, k-1}, \; x^{\rho+1}_{k}, = x^{\rho}_{q+1};$$

для $n > 1$, $\gamma > k$, $\beta \geqslant k+1$

$$x^{\rho+1}_{1} = x^{\rho}_{q}, \; x^{\rho+1}_{\Delta_7} \in [x^{\rho}_{q}, x^{\rho}_{q+1}), \; \Delta_7 = \overline{2, k}.$$

Истинность утверждения основывается на утверждении 3 и соотношениях (8).

Из утверждения 5 следует: принцип повторных сравнений применяется тогда, когда

$$h(k+1)^{|(i-z-2)/2|} \leqslant 2a \leqslant h(k+1)^{|(i-z)/2|}, \qquad (9)$$

где z — первое целое число, для которого справедливо соотношение (9).

На основании утверждения 3 и соотношения (9) сформулируем такое утверждение.

Утверждение 6. Если справедливы соотношения: $x \in [x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_\beta^{\rho+2n+1}, x_{\Delta_1}^{\rho+2n+1} \neq x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_{\Delta_1}^{\rho+2n+1} \neq x_\beta^{\rho+2n+1}, \Delta_1 = \overline{\gamma+1, \beta-1}$, то при выполнении условия $\psi^n(i-\rho-2n, k) > \varphi^n(i-\rho-2n-1, k)$ оценка алгоритма на отрезках $[x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_{\gamma+1}^{\rho+2n+1})$, $[x_{\beta-1}^{\rho+2n+1}, x_\beta^{\rho+2n+1})$ равна оценке $(i-\rho-2n)$-шагового алгоритма на отрезках $[x_0^1 x_1^1]$, $[x_k^1, x_{k+1}^1]$, $x_0^1 = -a$, $x_{k+1}^1 = 1+a$; оценка алгоритма на отрезках $[x_{\Delta_2}^{\rho+2n+1}, x_{\Delta_2+1}^{\rho+2n+1}]$, $\Delta_2 = \overline{\gamma+1, \beta-2}$ равна оценке

$(i-\rho-2n)$-шагового алгоритма на отрезках $[x_{\Delta_3}^1, x_{\Delta_3+1}^1]$, $\Delta_3 = \overline{1, k-1}$; при выполнении условия $\psi^n(i-\rho-2n, k) = \psi^n(i-\rho-2n-1, k)$ оценка алгоритма на отрезке $[x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_\beta^{\rho+2n+1}]$ равна $\psi^n(i-\rho-2n-1, k)$; для $\gamma+1 > \beta-1$ оценка алгоритма на отрезке $[x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_\beta^{\rho+2n+1})$ равна $\psi^n(i-\rho-2n-1, k)$.

Действительно, как вытекает из соотношения (9), принцип повторных сравнений применяется для такого z, которое удовлетворяет соотношению (9). Следовательно, для $(i-z)$-шагового алгоритма выполняются условия утверждения 3 и поэтому оптимальным $(i-z)$-шаговым алгоритмом будет C-алгоритм с тем отличием, что первый его шаг состоит в размещении $(\beta-\gamma)$ составляющих α-набора на отрезке $[x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_{\gamma+1}^{\rho+2n+1}]$. Из этой особенности следует: $[x_\gamma^{\rho+2n+1}, x_{\gamma+1}^{\rho+2n+}]$ соответствует $[x_0^0, x_1^1])$ $(i-\rho-2k)$-шагового алгоритма; $[x_{\Delta_2}^{\rho+2n+1}, x_{\Delta_2+1}^{\rho+2n+1}]$ соответствует $-[x_{\Delta_3}^1, x_{\Delta_3+1}^1]$ $(i-\rho-2n)$-шагового алгоритма; $[x_{\beta-1}^{\rho+2n+1}, x_\beta^{\rho+2n+}$ соответствует $[x_k^1, x_{k+1}^1]$ $(i-\rho-2n)$-шагового алгоритма, что и доказывает утверждение.

Утверждения 1—6 определяют следующий алгоритм поиска при действии $\Pi(a, 1)$-последовательности.

1. Если $2a \leqslant h(k+1)^{]t/2[}$, то применить C-алгоритм; в противном случае выполнить следующую последовательность операции.
2. Разместить составляющие α-набора на отрезке $[-a, 1+a,$ положить $q=0$, $\rho=1$.
3. Выделить интервал (x_q^ρ, x_{q+1}^ρ).
4. На основании утверждения 5 определить γ и β; затем увеличить ρ и q на единицу и положить $\gamma_\rho = \gamma$, $\beta_\rho = \beta$, $q_\rho = \gamma$.
5. Если $\gamma_\rho = 0$ и $\beta_\rho = k+1$, то перейти на 3, иначе 6.
6. На основании утверждения 6 определить оценку алгоритма на отрезке $[x_{\Delta_1}^\rho, x_{\Delta_1+1}^\rho]$, $\Delta_1 = \overline{\gamma_\rho, \beta_\beta - 1}$.
7. Найти оценку алгоритма на отрезке $[x_{q_{\rho-1}}^{\rho-1}, x_{q+1}^{\rho-1}]$, просуммировав оценки алгоритма на отрезке $[x_{\Delta_1}^{\rho-1}, x_{\Delta_1+1}^{\rho-1})^{\rho-1}$.
8. Положить $\rho = \rho - 1$, $q_\rho = q_\rho + 1$.

9. Если $\rho>0$ и $q_\rho \leqslant k+1$, то перейти на 3; если $q_\rho=k+2$, то перейти на 7; если $\rho=1$, $q_\rho=k+2$, то оценка алгоритма равна x^1_{k+1}, процесс построения алгоритма окончен.

Приведенная схема построения помехоустойчивых и $\Pi(a, 1)$-последовательности алгоритмов позволяет для заданных параметров алгоритма и последовательности i, k и a синтезировать для конкретных условий применения помехоустойчивый алгоритм.

Список литературы: 1. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 140 с. 2. *Алсведе Р., Вегенер И.* Задачи поиска. М., 1982. 355 с. 3. *Алипов Н. В.* Синтез помехоустойчивых алгоритмов поиска точки на отрезке 0,1//Пробл. бионики. 1986. Вып. 37. С. 72—84.

Поступила в редколлегию 28.12.89

УДК 658.5.011.56

Б. В. ДЗЮНДЗЮК, канд. техн. наук, *Т. И. СТЕПАНОВА*, канд. техн. наук

ДОЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ПРИБЛИЖЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛА ЭФФЕКТА

Авторами [1] был проведен анализ понятия «доза вредного воздействия» и дано аксиоматическое определение дозового функционала D, для чего введены следующие аксиомы:

*A*1. Аддитивность.

$$\forall x(t)\in X,\ \forall [t_1,\ t_2]\subset R_t,\ \forall t\in [t_1,\ t_2]$$

имеет место равенство

$$D(x(t);\ t_1,\ t)+D(x(t);\ t,\ t_2)=D(x(t);\ t_1,\ t_2).$$

*A*2. Инвариантность во времени.

$\forall [t_1,\ t_2]\subset R_t$, $\forall\tau:[t_1+\tau,\ t_2+\tau]\subset R_t$ (сдвиг интервала времени на τ не выводит из R_t), $\forall x^{(1)}(t)$, $x^{(2)}(t)\in X$, таких, что $x^{(2)}(t)=x^{(1)}(t+\tau)\ \forall t\in[t_1,\ t_2]$ следует, что

$$D(x^{(2)}(t);\ t_1,\ t_2)=D(x^{(1)}(t);\ t_1+\tau,\ t_2+\tau).$$

*A*3. Положительность.

$$\forall x(t)\in X,\ \forall [t_1,\ t_2]\subset R_t$$

имеет место неравенство

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2)\geqslant 0.$$

Функционал D, удовлетворяющий аксиомам $A1$ и $A2$, назовем дозовым функционалом, а величину $D(x(t);\ t_1,\ t_2)$ — измеренной функционалом D дозой воздействия при интенсивности $x(t)$ на интервале $[t_1,\ t_2]$.

Дозовый функционал D, удовлетворяющий аксиоме $A3$, назовем позитивным дозовым функционалом и соответственно величину $D(x(t);\ t_1,\ t_2)$ — дозой вредного воздействия.

Доказано [1], что дозовые функционалы образуют линейное пространство и указаны подходы к выбору из этого пространства наилучшего функционала. Продолжим рассмотрение этого вопроса.

Пусть выбрана некоторая скалярная величина $y(t)$, характеризующая функциональное состояние оператора. Проблема выбора такой величины подробно рассматривалась в исследованиях по научной организации труда, физиологии, эргономике. Существует два основных подхода к решению данной проблемы. Первый основывается на том факте, что при отсутствии явной патологии организма все его системы функционируют взаимосвязанно, что ведет к корреляции различных физиологических параметров. Вот почему достаточно выделить один (ведущий) параметр, по которому можно оценивать состояние организма. Различными авторами [2] предложен большой выбор таких параметров, например, частота сердечных сокращений, артериальное давление, степень изменения баллисто-кардиограммы, максимальное потребление кислорода, соотношение калия и натрия в слюне, подвижность ядер клеток эпителия при электрофорезе, уровень θ-ритма в энцефалограмме, и т. д. Если мы выбираем ведущий параметр функционального состояния организма в конкретных условиях, то следует на основании гигиенического анализа выбрать критическую для данного комплекса факторов систему организма.

Другой подход к проблеме выбора численной величины для характеристики функционального состояния заключается в комплексировании группы параметров с помощью выбранной функции многих переменных. Вид выбираемой функции имеет различную сложность, начиная от простейшей формулы суммирования баллов до сложных функций, получаемых с помощью применения метода экспертных оценок, статистической обработки гигиенических данных и других методик.

Таким образом, можно выбрать интегральный или ведущий параметр $y(t)$. Будем считать, что в нашем рассмотрении возрастание $y(t)$ соответствует ухудшению функционального состояния организма. Предположим, кроме того, что изменение $y(t)$ зависит только от воздействующих факторов в период изменения. Тогда можно ввести на множестве X функционал эффекта:

$$\Phi\,(x\,(t);\ t_1,\ t_2) = y\,(t_2) - y\,(t_1).$$

В связи с тем, что при формировании реакции организма на стрессор с процессами кумуляции (отражаемыми в понятии доза) соединяются процессы адаптации и релаксации, функционал $\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2)$ не будет обладать свойствами дозового функционала.

Определение 4. *Будем называть функционал $\Phi(x(t);\ t_1, t_2)$* зависящим *от дозы, если существует позитивный дозовый функционал $D(x(t);\ t_1, t_2)$ функция $\varphi(z)$ такая, что*

$\forall\, [t_1,\ t_2] \subset R_t,\ \forall x(t) \in X$ *имеет место:*

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \varphi(D(x(t);\ t_1,\ t_2).$$

Теоретически возможно широкое разнообразие функционалов эффекта. Однако по данным [3] фактически для описания различных объектов достаточно ограниченного набора моделей. К ним относятся линейные модели, модель Вольтерра, модель Гаммерштейна. В каждую из них входят весовые функции. Выделим нулевые члены в тейлоровском разложении весовых функций в рассмотренных случаях.

Одномерная линейная модель функционала эффекта имеет вид

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\, x(t_2-\tau)\, d\tau.$$

Применив формулу Тейлора к функции $w(\tau)$ в точке τ_0: $0 < \tau_0 < t_2 - t_1$, получим $w(\tau) = w(\tau_0) + R(\tau;\ \tau_0)$.

Таким образом,

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = w(\tau_0) \int\limits_0^{t_2-t_1} x(t_2-\tau)\, d\tau + \int\limits_0^{t_2-t_1} R(\tau;\ \tau_0) \times$$

$$\times\, x(t_2-\tau)\, d\tau.$$

Но в соответствии с [1] $w(\tau_0) \int\limits_0^{t_2-t_1} x(t_2-\tau)\, d\tau = D(x(t);\ t_1, t_2)$ — дозовый функционал.

Тогда

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = D(x(t);\ t_1,\ t_2) + \int\limits_0^{t_2-t_1} R(\tau;\ \tau_0)\, x(t-\tau)\, d\tau.$$

При многомерной линейной модели

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} \sum_{j=1}^{n} w_j(\tau)\, x_j(t_2-\tau)\, d\tau.$$

Применив разложение Тейлора для функций $w_j(\tau)$ соответственно в точках $\tau_{0,\,j}$, получим

$$w_j(\tau) = w_j(\tau_{0,j}) + R_j(\tau;\ \tau_{0,j}),\ j = 1,\ 2,\ \ldots,\ n.$$

Тогда

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \sum_{j=1}^{n} w_j(\tau_{0,j}) \int\limits_0^{t_2-t_1} x_j(t_2-\tau)\, d\tau +$$

$$+ \int\limits_0^{t_2-t_1} \sum_{j=1}^{n} R_j(\tau;\ \tau_{0,j})\, x_j(t_2-\tau)\, dt.$$

В этом случае по теореме 2 [1] величины

$$D_j(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} x_j(t_2-\tau)\,d\tau$$

дозовые функционалы. Так как пространство дозовых функционалов линейно по теореме 1 [1], линейная комбинация

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2) = \sum_{j=1}^{n} w_j(\tau_{0,j})\,D_j(x(t);\ t_1,\ t_2)$$

также является дозовым функционалом. Таким образом,

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = D(x(t);\ t_1,\ t_2) + \\ + \int\limits_0^{t_2-t_1} \sum_{j=1}^{n} R_j(\tau;\ \tau_{0,j})\,x_j(t_2-\tau)\,d\tau.$$

Модель Гаммерштейна

$$\Phi(x(t);\ t_1\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\,g(x(t_2-\tau))\,d\tau$$

в вопросе выделения дозовой части аналогична линейной одномерной модели. Разложение функционала эффекта для нее имеет вид

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = D(x(t);\ t_1,\ t_2) + \int\limits_0^{t_2-t_1} R(\tau;\ \tau_0)\,g(x(t_2-\tau)\,d\tau,$$

где величина

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2) = w(\tau_0)\int\limits_0^{t_2-t_1} g(x(t_2-\tau))\,d\tau$$

дозовый функционал (в соответствии с теоремами 1, 2 [1]).

Модель Вольтерра для функционала эффекта имеет вид

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \\ = \sum_{i=1}^{\infty} \int\limits_0^{t_2-t_1} \ldots \int\limits_0^{t_2-t_1} w_i(\tau_1,\ \ldots,\ \tau_i) \prod_{j=1}^{i} x(t_2-\tau_j)\,d\tau_j.$$

В этом случае по формуле Тейлора запишем представления $(i=1,\ 2..)$

$$w_i(\tau_1,\ \ldots,\ \tau_i) = w_i(\tau_1^{0,i},\ \ldots,\ \tau_i^{0,i}) + R_i(\tau_1,\ \ldots,\ \tau_i;\ \tau_1^{0,i},\ \ldots,\ \tau_i^{0,i}),$$

откуда получим

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \sum_{i=1}^{\infty} \int\limits_0^{t_2-t_1} \ldots \int\limits_0^{t_2-t_1} w_i(\tau_1^{0,i},\ \ldots,\ \tau_i^{0,i}) \prod_{j=1}^{i} x(t_2-\tau_j)\,d\tau_j + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \int\limits_0^{t_2-t_1} \ldots \int\limits_0^{t_2-t_1} R_i(\tau_1,\ \ldots,\ \tau_i;\ \tau_1^{0,i},\ \ldots,\ \tau_i^{0,i}) \prod_{j=1}^{i} x(t_2-\tau_j)\,d\tau_j.$$

Рассмотрим величину

$$\Phi_0(x(t);\ t_1,\ t_2) =$$
$$= \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{t_2-t_1} \dots \int_0^{t_2-t_1} w_i(\tau_1^{0,i}, \dots, \tau_i^{0,i}) \prod_{j=1}^{i} x(t_2 - \tau_j)\, d\tau_j.$$

В результате преобразования получим

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \sum_{i=1}^{\infty} w_i(\tau_1^{0,i}, \dots, \tau_i^{0,i}) \left(\int_0^{t_2-t_1} x(t_2 - \tau)\, d\tau \right)^i.$$

Заметим, что по теореме 2 [1]

$$\int_0^{t_2-t_1} x(t_2 - \tau)\, d\tau$$

дозовый функционал. Обозначим его через $D(x(t);\ t_1, t_2)$. $\Phi_0(x(t);\ t_1;\ t_2)$ — степенной ряд от величины $D(x(t);\ t_1, t_2)$. Так как исходный ряд Вольтерра для функций $\Phi(x(t);\ t_1, t_2)$ является абсолютно сходящимся [3], то и ряд для функций $\Phi_0(x(t);\ t_1, t_2)$ сходится к некоторой функции φ. Следовательно,

$$\Phi_0(x(t);\ t_1,\ t_2) = \varphi(D(x(t);\ t_1,\ t_2)).$$

Окончательно получаем

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \varphi(D(x(t);\ t_1,\ t_2) +$$
$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{t_2-t_1} \dots \int_0^{t_2-t_1} R_i(\tau_1, \dots \tau;\ \tau_1^{0,}) \prod_{j=1}^{i} x(t_2 - \tau_j)\, d\tau,$$

где φ — некоторая функция,

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int_0^{t_2-t_1} x(t_2 - \tau_j)\, d\tau.$$

Итак, мы показали, что во всех практически используемых случаях динамической связи эффекта с воздействием дозовый функционал является первым приближением функционала эффекта.

Получим теперь правило для выбора точек при разложении в ряд Тейлора весовых функций w. Естественно выбрать такое разложение, которое даст наименьшую среднеквадратичную погрешность.

Пусть $z(t)$ — непрерывная функция, $t \in R^n$. Нужно найти такое число a, чтобы

$$\varphi(a) = \int_\Omega (z(t) - a)^2\, dt \to \min,\ \Omega \in R^n.$$

Так как

$$\varphi(a) = \int_\Omega z^2(t)\, dt - 2a \int_\Omega z(t)\, dt + a^2 \int_\Omega dt,$$

то

$$\frac{d\varphi}{da} = -2 \int_\Omega z(t)\, dt + 2a \int_\Omega dt.$$

Для достижения экстремума необходимо

$$\frac{d\varphi}{da}=0,\ \text{т. е. } a=\frac{\int\limits_{\Omega} z(t)\,dt}{\int\limits_{\Omega} dt}.$$

Следовательно, наилучшим приближением функции $z(t)$ является ее среднее значение. Из непрерывности $z(t)$ следует существование t_0, такого, что

$$z(t_0)=\frac{\int\limits_{\Omega} z(t)\,dt}{\int\limits_{\Omega} dt}.$$

Эту точку и следует выбирать для разложения функции w в ряд Тейлора.

Рассмотрим подробнее случай линейной одномерной модели. При этом

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2)=\int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\,x(t_2-\tau)\,d\tau$$

и соответствующий дозовый функционал имеет вид

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2)=\int\limits_0^{t_2-t_1}\bar{w}x(t_2-\tau)\,d\tau,$$

где

$$\bar{w}=\frac{1}{t_2-t_1}\int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\,d\tau.$$

Оценим ошибку, получаемую при замене функционала эффекта (приближенного линейной моделью) на дозовый функционал:

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2)=|\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2)-D(x(t);\ t_1,\ t_2)|=$$

$$=\left|\int\limits_0^{t_2-t_1}(w(\tau)-\bar{w})\,x(t_2-\tau)\,d\tau\right|.$$

Обозначим

$$\bar{x}=\frac{1}{t_2-t_1}\int\limits_{t_1}^{t_2} x(t)\,dt=\frac{1}{t_2-t_1}\int\limits_0^{t_2-t_1} x(t_2-\tau)\,d\tau.$$

Тогда

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2)=\left|\int\limits_0^{t_2-t_1}(w(\tau)-\bar{w})(x(t_2-\tau)-\bar{x}+\bar{x})\,d\tau\right|=$$

$$=\left|\int\limits_0^{t_2-t_1}(w(\tau)-\bar{w})(x(t_2-\tau)-\bar{x})\,d\tau+\int\limits_0^{t_2-t_1}(w(\tau)-\bar{\omega})\,\bar{x}d\tau\right|.$$

Однако

$$\int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})\, \bar{x}\, d\tau = \bar{x} \int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})\, d\tau = 0.$$

Тогда

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) = \left| \int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})(x(t_2-\tau) - \bar{x})\, d\tau \right|.$$

Оценим величину $\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2)$:

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) \leqslant \int_0^{t_2-t_1} |w(\tau) - \bar{w}|\, |x(t_2-\tau) - x|\, dt.$$

По неравенству Коши—Буняковского [3]

$$\int_0^{t_2-t_1} |w(\tau) - \bar{w}|\, |x(t_2-\tau) - \bar{x}|\, d\tau \leqslant$$

$$\leqslant \sqrt{\int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})^2\, d\tau \int_0^{t_2-t_1} (x(t_2-\tau) - \bar{x})^2\, d\tau}.$$

Следовательно,

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) \leqslant \sqrt{\int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})^2\, d\tau}\ \sqrt{\int_0^{t_2-t_1} (x(t_2-\tau) - \bar{x})^2\, dt}.$$

Таким образом, нами доказана

Теорема 1. *Пусть $x(t)$ — скалярная функция и функционал эффекта имеет вид*

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int_0^{t_2-t_1} w(\tau)\, x(t_2-\tau)\, d\tau,$$

а соответствующий дозовый функционал

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int_0^{t_2-t_1} \bar{w} x(t_2-\tau)\, d\tau,$$

где

$$\bar{w} = \frac{1}{t_2-t_1} \int_0^{t_2-t_1} w(\tau)\, d\tau.$$

Тогда

$$\Delta(x(t);\ t_1, t_2) \leqslant \sqrt{\int_0^{t_2-t_1} (w(\tau) - \bar{w})^2 d\tau},\ \sqrt{\int_0^{t_2-t_1} (x(t_2-\tau) - \bar{x})^2 d\tau},$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} x(t)\, dt.$$

Рассмотрим следующий встречающийся в практике частный случай.

Пусть $x(t)$ — периодическая функция с периодом θ. Обозначим через $T=t_2-t_1$ величину всего промежутка воздействия. Введем также обозначения

$$w_0(\tau)=w(\tau)-\overline{w};\ x_0(t)=x(t)-x.$$

В этих обозначениях

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2)=\left|\int_0^T w_0(\tau)\,x_0(t_2-\tau)\,d\tau\right|\leqslant$$

$$\leqslant\left|\sum_{k=1}^{n}\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} w(\tau)\,x_0(t_2-\tau)\,d\tau\right|=\left|\sum_{k=1}^{n}E_k\right|.$$

Отметим, что из периодичности функции $x(t_2-\tau)$ следует, что

$$\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} x_0(t_2-\tau)\,d\tau=\int_{(k-1)\theta}^{k\theta}(x(t_2-\tau)-\overline{x})\,d\tau=0.$$

Для каждого интервала $[(k-1)\theta;\ k\theta]$ применим к функции $w_0(\tau)$ формулу Лагранжа:

$$w_0(\tau)=w_0((k-1)\theta)+\frac{dw}{d\tau}(\xi_k)(\tau-(k-1)\theta),$$

$$\xi_k\in[(k-1)\theta;\ \tau].$$

Вычислим значения слагаемых

$$E_k=\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} w_0((k-1)\theta)\,x_0(t_2-\tau)\,d\tau+$$

$$+\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} x_0(t_2-\tau)\,\frac{dw}{d\tau}(\xi_k)(\tau-(k-1)\theta)\,d\tau.$$

Но

$$\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} w_0((k-1)\theta)\,x_0(t_2-\tau)\,d\tau=w_0((k-1)\theta)\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} x_0(t_2-\tau)dt=0,$$

отсюда

$$E_k=\int_{(k-1)\theta}^{k\theta} x_0(t_2-\tau)\,\frac{dw}{d\tau}(\xi_k)(\tau-(k-1)\theta)\,d\tau.$$

Пусть на всем интервале $[0;\ T]$ изменения τ имеют место оценки

$$|x_0(t_2-\tau)|\leqslant c_1$$

и

$$\left|\frac{dw}{d\tau}(\tau)\right| \leqslant c_2.$$

При этих условиях оценим величину

$$|E_k| \leqslant \int\limits_{(k-1)\theta}^{k\theta} |x_0(t_2-\tau)| \left|\frac{d\omega}{d\tau}(\xi_k)\right| (\tau-(k-1)\theta)\,d\tau.$$

Отсюда

$$|E_k| \leqslant c_1c_2\int\limits_{(k-1)\theta}^{k\theta}(\tau-(k-1)\theta)d\tau = \frac{1}{2}c_1c_2\theta^2$$

и

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) = \left|\sum_{k=1}^{n} E_k\right| \leqslant \frac{1}{2}nc_1c_2\theta^2.$$

Но $\theta = T/n$, следовательно,

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) \leqslant \frac{c_1c_2T^2}{2n}.$$

Таким образом, нами доказана

Теорема 2. *Пусть $x(t)$ — скалярная периодическая функция с периодом $(t_1-t_2)/n$ функционал эффекта имеет вид*

$$\Phi(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\,x(t_2-\tau)\,dt,$$

а соответствующий дозовый функционал

$$D(x(t);\ t_1,\ t_2) = \int\limits_0^{t_2-t_1} \overline{w}x(t_2-\tau)\,d\tau,$$

где

$$\overline{w} = \frac{1}{t_2-t_1}\int\limits_0^{t_2-t_1} w(\tau)\,d\tau.$$

Тогда

$$\Delta(x(t);\ t_1,\ t_2) \leqslant \frac{c_1c_2(t_2-t_1)^2}{2n}.$$

Здесь константы c_1, c_2 выбираются из условий:

$$\tau\in[0,\ t_2-t_1];$$

$$\left|x(t_2-\tau)-\frac{1}{t_2-t_1}\int\limits_1^{t_2} x(t)\,dt\right| \leqslant c_1$$

и

$$\left|\frac{dw(\tau)}{d\tau}\right| \leqslant c_2.$$

Мы получили оценку погрешности при приближении функционала эффекта дозовым функционалом для периодических процессов.

Погрешность обратно пропорциональна числу периодов в течение исследуемого интервала времени $[0; T]$.

Список литературы: 1. *Дзюндзюк Б. В., Степанова Т. И.* Анализ понятия «доза вредного воздействия» и связанных с ним аспектов//Пробл. бионики. 1987. Вып. 39. С. 81—87. 2. *Брехман И. И.* Введение в валеологию — науку о здоровье. Л., 1987. 125 с. 3. *Растригин Л. А., Маджаров Н. Е.* Введение в идентификацию объектов управления. М., 1987. 216 с.

Поступила в редколлегию 04.10.89

УДК 881.3.06

В. В. СЕМЕНЕЦ, канд. техн. наук

ПОСТРОЕНИЕ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ТРАССИРОВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Проблема проектирования микроэлектронных устройств (МЭУ) — длительный и трудоемкий процесс. Период разработки микроэлектронной аппаратуры может превышать период, в течение которого изделие пользуется спросом. Главной проблемой при проектировании МЭУ является огромное число возможных проектных решений, их необходимо исследовать для того, чтобы выбрать удовлетворительное решение. Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) уменьшает время разработки аппаратуры. Недостатком использования САПР является низкое качество проектирования, которое зачастую значительно уступает проекту, разработанному конструктором вручную. Причина заключается в том, что САПР используют эвристические алгоритмы, хорошо работающие только для узкого класса однотипных задач. При использовании САПР процессом проектирования управляет специалист в данной области.

Выходом из создавшейся ситуации является применение методов искусственного интеллекта. Основная особенность интеллектуального программного обеспечения для проектирования — использование специальных знаний о проблемной области. Знания чаще всего представляются набором эвристических решающих правил в форме «если — то» *.

Процесс трассировки многослойных конструкций с регулярной структурой предполагает решение двух этапов: расслоение и глобальная трассировка; локальная трассировка.

---

* *Паркер Э.С., Хайяти С.* Использование экспертных систем и кремниевой компиляции для автоматизации процесса проектирования СБИС//ТИИЭР. 1987. 75, № 6. С. 43—54.

Данная статья посвящена вопросу определения решающих правил для этапа локальной трассировки.

Зафиксируем прямоугольную декартову систему координат O_{xy}. Рассмотрим прямоугольник, ограниченный прямыми $x=0$, $x=m$, $y=0$, $y=n+1$, где m, n — фиксированные числа. Определим граф, который будем называть каналом M шириной n и длиной m (или просто каналом). В качестве вершины этого графа возьмем все точки вида (x, y) с целочисленными координатами, лежащие в указанном прямоугольнике, т. е. удовлетворяющие условиям

$$x \in \{0, 1, ..., m\}; \; y \in \{0, 1, ..., n+1\}.$$

Далее для простоты будем рассматривать горизонтальный канал. Для вертикального канала изменится только определение прямоугольной области. Контактные площадки электрических цепей расположены в узлах ортогональной сетки на всех четырех сторонах канала.

Многоконтактные электрические цепи разобьем на двухконтактные, упорядочив координаты контактных площадок по возрастанию координаты x и y. Будем считать, что на сторонах канала контактные площадки одной цепи в соседних узлах сетки располагаться не могут.

Под схемой будем понимать некоторое множество электрических цепей.

Планарная схема — это схема, цепи которой могут быть размещены в одном слое без пересечений.

Трассировкой схемы назовем систему деревьев, построенных на контактных площадках схемы и не имеющих общих точек.

Наша цель — найти условия, при которых задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, дать алгоритм нахождения соответствующей трассировки.

Пронумеруем стороны прямоугольника, начиная с левой, по часовой стрелке цифрами от 1 до 4. Тогда для любой двухконтактной цепи координаты контактных площадок обозначим через (x_1^h, y_1^h) и (x_2^d, y_2^d), где h и d номера сторон прямоугольника, на которых расположены контактные площадки. В дальнейшем индексы для простоты записи будем опускать.

Рассмотрим канал, у которого только на горизонтальных сторонах расположены контактные площадки.

Определим длины цепей следующим образом:
при $h=2$, $d=2$

$$L = |x_2 - x_1|; \tag{1}$$

при $h=4$, $d=2$

$$L = 2m + n - (x_1 + x_2) + C_1, \text{ если } x_1 > x_2; \tag{2}$$

$$L = n + x_1 + x_2 + C_1, \quad \text{если } x_1 \leqslant x_2; \tag{3}$$

при $h=2$, $d=4$

$$L = 2m + n - (x_1 + x_2) + C_1, \text{ если } x_1 \leqslant x_2; \tag{4}$$

$$L = n + x_1 + x_2 + C_1, \quad \text{если } x_1 > x_2; \tag{5}$$

при $h=4$, $d=4$

$$L = |x_2 - x_1| + C_2, \tag{6}$$

где $C_1 = m$; $C_2 = 2m + 2n$.

Проранжируем цепи по возрастанию их длин. Если цепи разрешается проводить только с одним горизонтальным сегментом, условие трассировки выражает следующая теорема. Здесь и далее r — число двухконтактных цепей. Перенумеруем цепи последовательно от 1 до r в соответствии с возрастанием их длины.

Правило 1. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в канале с минимальным числом поворотов трасс разрешима, если

$$n \geqslant \max\{p_i^r\},$$

где

$$p_i^j = a + 1, \quad \text{если} \quad i \in [x_н^j, x_к^j];$$

$$a = \max\{p_k^{j-1}\}, \text{ где } k \in [x_н^j, x_к^j];$$

$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае;}$$

$$p_i^0 = 0; \ j = 1, r; \ i = \overline{1, m};$$

$$x_н^j = \min\{x_1^h, x_2^d\}; \quad x_k^j = \max\{x_1^h, x_2^d\}.$$

Если трассировка разрешена с максимальным числом поворотов трасс, то условие трассировки схемы в двухстороннем канале отражает следующая теорема.

Правило 2. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в канале разрешима, если

$$n \geqslant \max\{p^r\},$$

где

$$p_i^j = \max\{p_{i-1}^{j-1}, p_{i+1}^{j-1}\} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1, x_к^j - 1];$$

$$p_i^j = p_{i+1}^{j-1} + 1, \text{ если } i = x_н^j;$$

$$p_i^j = p_{i-1}^{j-1} + 1, \text{ если } i = x_к^j;$$

$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае;}$$

$$p_i^0 = 0; \ i = \overline{1, m}; \ j = \overline{1, r};$$

$$x_н^i = \min\{x_1^h, x_2^d\}; \quad x_к^i = \max\{x_1^h, x_2^d\}.$$

При трассировке многослойных печатных плат часто сложно выделить каналы прямоугольной формы. В этом случае выделяют области с непрямолинейными краями. Такие области будем называть криволинейными каналами.

Пусть криволинейный канал задан вектором $L=\{l_i\}$, $i=\overline{1, m}$, где l_i — ширина канала на i-й вертикале; m — длина канала.

Криволинейный канал может быть представлен как прямолинейный канал с постоянной шириной, но с запрещенными для трассировки областями. Преобразуем криволинейный канал в односторонне прямолинейный канал, который будет задаваться векторами

$$L_п=\{l_п\},\ P=\{p_i\},$$

где $l_{пi}$ — ширина преобразованного канала на i-й вертикале; p_i — ширина запрещенной для трассировки области на i-й вертикале. Заметим, что $l_{пi}=l_i+p_i$.

Правило 3. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в криволинейном канале разрешима, если

$$l_{пi}\geqslant p_i^r,\ i=\overline{1, m},$$

где

$$p_i^j=\max\{p_{i-1}^{j-1},\ p_{i+1}^{j-1}\}+1,\ \text{если}\ i\in[x_н^j+1,\ x_к^j-1];$$

$$p_i^j=p_{i+1}^{j-1},\ \text{если}\ i=x_н^j;$$

$$p_i^j=p_{i-1}^{j-1}+1,\ \text{если}\ i=x_к^j;$$

$$p_i^j=p_i^{j-1},\ \text{в противном случае};$$

$$p_i^0=p_i;\ i=\overline{1, m};\ j=\overline{1, r};$$

$$x_н^j=\min\{x_1^h,\ x_2^h\};\ x_к^j=\max\{x_1^h,\ x_2^d\}.$$

Трассы электрических соединений можно выполнять под углом 45° к любой прямой ортогональной сетки, т. е. из точки с координатами (x, y) возможен переход в соседние точки с координатами

$$(x+1,\ y),\ (x-1,\ y),\ (x,\ y+1),\ (x,\ y-1),\ (x+1,\ y+1),$$
$$(x+1,\ y-1),\ (x-1,\ y-1),\ (x-1,\ y+1).$$

Рассмотрим канал, на горизонтальных сторонах которого размещены контактные площадки r цепей. Цепи могут выбираться в произвольном порядке.

Правило 4. Задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, если

$$n\geqslant\max\{p_i^r\},$$

где

$$p_i^j=p_i^{j-1}+1,\ \text{если}\ i\in[x_н^j+1,\ x_к^j-1];$$

$$p_i^j=p_i^{j-1},\ \text{в противном случае};$$

$$p_i^0=0;\quad i=\overline{1, m};\ j=\overline{1, r};$$

$$x_н^j=\min\{x_1^h,\ x_2^h\};\quad x_к^j=\max\{x^h,\ x_2^d\}.$$

В том случае, когда контактные площадки схемы расположены на всех четырех сторонах канала, условия трассировки вытекают из следующей теоремы.

Правило 5. Задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, если $n \geqslant \max\{p_i^r\}$, $m \geqslant \max\{B_к^r\}$,

где
$$p_i^j = p_i^{j-1} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1,\ x_к^j - 1];$$
$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае;}$$
$$B_к^j = B_к^{j-1} + 1, \text{ если } к \in [y_н^j + 1,\ y_к^j - 1];$$
$$B_k^j = B_k^{j-1}, \text{ в противном случае;}$$
$$p^0 = 0,\ B_i^0 = 0;$$
$$i = \overline{1, m};\ к = \overline{1, n};\ j = \overline{1, r};$$
$$x_н^j = \min\{x^h,\ x^d\};\ y_н^j = \min\{y_1^h,\ y_2^d\};$$
$$x_к^j = \max\{x_1^h,\ x_2^d\};\ y_к^j = \max\{y_1^h,\ y_2^d\}.$$

В случае криволинейного канала преобразуем его в односторонне прямолинейный (как это делалось для ортогональной трассировки), который будет задаваться векторами $L_п = \{l_{пi}\}$, $P = \{p_i\}$. Дополним вектор $P = \{p_i\}$ таким образом, чтобы значение двух соседних элементов p_i, p_{i+1} отличались не более чем на единицу. Вновь полученный вектор обозначим $P^м = \{\beta_i^м\}$.

Правило 6. Задача трассировки планарной схемы в криволинейном канале разрешима, если $l_{пi} \geqslant p_i^r$,

где
$$p_i^j = p_i^{j-1} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1,\ x_к^j - 1];$$
$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае;}$$
$$p_i^0 = p_i^м,\ j = \overline{1, r},\ i = \overline{1, m};$$
$$x_н^j = \min\{x_1^h,\ x_2^d\};\quad x_к^1 = \max\{x_1^h,\ x_2^d\}.$$

Ниже будет описан универсальный алгоритм трассировки каналов любых модификаций и независящий от типа проведения трасс. Рассмотрим общий случай, когда контактные площадки расположены на всех четырех сторонах канала.

В зависимости от значений h и d длину цепи L будем определять с помощью следующих выражений:

при $h = 2$, $d = 4$ или $h = 4$, $d = 2$
$$L_1 = 2m + n - (x_1 + x_2),\quad L_2 = n + x_1 + x_2,\quad L = \max\{L_1,\ L_2\}; \tag{7}$$
при $h = 2$, $d = 2$ или $h = 4$, $d = 4$
$$L = |x_2 - x_1|; \tag{8}$$
при $h = 1$, $d = 1$ или $h = 3$, $d = 3$
$$L = |y_2 - y_1|; \tag{9}$$
при $\ = 1$, $d = 3$ или $h = 3$, $d = 1$

$$L_1 = y_2 + y_1 + m, \quad L_2 = m + 2n - (y_2 + y_1),$$

$$L = \min\{L_1, L_2\}; \tag{10}$$

при $h = 1$, $d = 2$

$$L = n + x_2 - y_1; \tag{11}$$

при $h = 1$, $d = 4$

$$L = y_1 + x_2; \tag{12}$$

при $h = 2$, $d = 3$

$$L = m - x_1 + n - y_2; \tag{13}$$

при $h = 3$, $d = 4$

$$L = y_1 + m - x_2; \tag{14}$$

при $h = 2$, $d = 1$

$$L = n + x_1 - y_2; \tag{15}$$

при $h = 4$, $d = 1$

$$L = x_1 + x_2; \tag{16}$$

при $h = 3$, $d = 2$

$$L = n - y_1 + m - x_2; \tag{17}$$

при $h = 4$, $d = 3$

$$L = m - x_1 + y_2. \tag{18}$$

Алгоритм.

Трассировка цепей осуществляется по возрастанию их длины (формулы (7)—(18)) и ведется с максимальным приближением к зоне, по которой определялась ее длина. Процедурой обратной перетрассировки удаляются лишние изломы.

Поступила в редколлегию 04.12.89

УДК 612.51

Н. Н. ШАБАТУРА, канд. биол. наук, *А. Я. НАВОЛЬНЕВ*, канд. физ.-мат. наук

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАДИАННЫХ РИТМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА

Многочисленные литературные данные [1, 4] указывают на перспективность использования ритмических колебаний в деятельности физиологических систем организма для организации целенаправленного воздействия на них с целью коррекции или повышения их функционального состояния. Прежде чем приступить к широкому практическому использованию закономерностей инфрадианных ритмических колебаний необходимо: научиться с достаточной точностью и с необходимым упреждением прогнозировать параметры биологического ритма.

Цель настоящей статьи — на основании экспериментального материала и известных математических методов разработать подходы и оценить возможности прогнозирования параметров инфрадианных ритмических колебаний.

Прогнозирование параметров периодической функции может быть легко осуществлено, если определены ее параметры хотя бы в одном полном периоде.

Однако, как следует из данных [4], [5], биологические ритмы характеризуются значительной вариабельностью отдельных периодов. Поэтому прогнозирование динамики параметров таких ритмических колебаний на основе стационарных моделей, например, тригонометрического уравнения регрессии, не дает положительных результатов. Временные ряды, содержащие неустойчивые трендовые и периодические составляющие и случайные «шумы», следует рассматривать как стохастические, а не детерминированные явления. Такие ряды лучше всего описываются нестационарными моделями. В математической статистике существует ряд методов, позволяющих осуществить прогнозирование таких временных рядов. Среди них методы, разработанные Дж. Боксом и Г. Дженкинсом [2].

Построение моделей и прогнозирование было проведено для 100 временных рядов длительностью от 60 до 408 дней, различных показателей сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Для сравнения было осуществлено прогнозирование значений и для 10-ти искусственных временных рядов, имитирующих реальные данные. Искусственные временные ряды длительностью в 100 точек формировались путем случайной выборки из реальных значений данного временного ряда. Конечным этапом параметрического прогнозирования являлось определение точности прогноза, которое проводилось на основании F-критерия Фишера.

Для всех исследуемых временных рядов прогноз осуществлялся для 10-ти последних значений ряда с упреждением на 5 точек и доверительными интервалами для 95 и 99 % уровней вероятности. Для 10-ти временных рядов прогноз проводился на 50 последних значений ряда с упреждением на 10 дней.

Статистический анализ исследуемых временных рядов показывает, что порождающие их процессы могут быть с достаточной степенью адекватности представлены как процессы со стационарными приращениями. Приращение случайного процесса $\xi(t)$ имеет вид

$$\eta_t(t) = \xi(t+T) - \xi(t).$$

Если имеет место равенство $\overline{\eta_t(t)} = \overline{\xi(t+T)} - \overline{\xi(t)} = \text{const}$, где черта сверху обозначает оператор усреднения, то процесс является процессом со стационарными первыми приращениями. Для процесса со стационарными вторыми приращениями среднее значение будет полиномом не выше второй степени. Данный класс процессов можно представить как нестационарные процессы Z_t, d-я разность которых является стационарным процессом, т. е. удовлетворяет следующей разностной схеме: $W_t = \nabla^d Z_t$, $t =$

$=0,\ \pm1, \pm2, \ldots$, где ∇ — оператор взятия разностей $\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$. При этом W_t — стационарный процесс с рациональной спектральной плотностью относительно $e^{t\lambda}$, где λ — частота. Известно, что любую непосредственую спектральную плотность можно сколь угодно точно аппроксимировать плотностью с дискретным временем,

Для достижения большей гибкости в подгонке моделей к временным рядам используются в общем случае смешанные модели авторегрессии скользящего среднего (АРСС):

$$Z_t = \alpha_1 Z_{t-1} + \alpha_2 Z_{t-2} + \ldots + \alpha_p Z_{t-p} + \theta_1 a_{t-1} +$$
$$+ \theta_2 a_{-2} + \ldots + \theta_g a_{t-g},$$

где a_t — элементы белого шума. Применяемый в данной работе метод Бокса—Дженкинса представляет собой метод структурной и параметрической идентификации моделей класса АРСС. При этом использованы достаточно мощные программные средства, реализующие модифицированный метод Бокса—Дженкинса в виде пакетов прикладных программ (ПП) (М. А. Лясковская, А. Я. Навольнев, 1981). Указанные ППП позволяют автоматизировать процесс построения моделей, включая минимизацию выбора структуры моделей, двухэтажную процедуру параметрической идентификации на основе алгоритма Маркванэта (нелинейный МНК), диагностическую проверку адекватности моделей и прогнозирование на основе оценивания модели.

Прогнозируемые значения анализируемого процесса на основе модели АРСС вычислялись в следующей постановке. При известных (реальных) значениях Z_t в момент времени t необходимо найти оценку $\hat{Z}_{t+l} = Z_t(l)$ процесса Z_t в момент времени $t+l$, такую, что среднеквадратичная ошибка прогноза:

$$E\,[Z_{t+l} - \hat{Z}_t(l)]^2 = \min_{Z_t(l)}.$$

При этом оценка прогноза $Z_t(l)$ должна быть несмещенной, т. е.

$$E\,[l_t(l)] = 0,$$

где $l_t(l)$ — ошибка прогноза, равная $l_t(l) = Z_{t+l} - \hat{Z}_t(l)$. В такой постановке прогноз с минимальной среднеквадратической ошибкой в момент t с упреждением l есть условное математическое ожидание Z_{t+l} в момент t: $\hat{Z}_t(l) = E_t\ [Z_{t+l}]$.

Доверительные интервалы оценок прогноза вычисляются следующим образом:

$$Z_{t+l}(\pm) = Z_t(l) \pm U\varepsilon/2\ (1 + \sum_{=1}^{l-1}\ )$$

При этом выражение

$$\left(1 + \sum_{1}^{l-1} \psi_j^2\right)^{1\ 2} 2a$$

представляет собой дисперсию ошибки прогноза.

Если $\hat{Z}_t(l)$ рассматривать как функцию l при фиксированном t, то мы получим так называемую прогнозируемую функцию

$$\hat{Z}_t(l) = \sum_{i=0}^{p+d-1} b_i^{(t)} f_i(l), \ l > g - p - d,$$

когда $g \leqslant p+d$, то эта функция дает прогнозы $\hat{Z}_t(1)$, $\hat{Z}_t(2), \ldots$ для всех упреждений $l > 1$.

Подстраивающиеся коэффициенты при переходе к другому моменту времени корректируются на величину, зависящую от последней ошибки прогноза на шаг вперед a_{t+1}, согласно формуле

$$b^{(t+1)} = Lb^{(t)} + ga_{t+1},$$

где b, L, g — соответствующие векторы. Сравнительный анализ используемых нами методов прогнозирования Бокса—Дженкинса показал, что эти методы обеспечивают более высокую точность прогноза по сравнению с широко известным методом прогнозирования Брауна на основе экспоненциального взвешивания. Это обусловлено тем, что в используемых нами методах Бокса—Дженкинса, выбор прогнозирующей функции не произволен, а определяется оператором авторегрессии, порождающем в общем случае линейную комбинацию полиномов, экспонент и синусоид.

Проведенные расчеты показали, что прогнозируемые значения дисперсии длительности дыхательного цикла достаточно близки к реальным значениям этого показателя. Степень точности прогноза, определенная по F-критерию Фишера, достоверна при 95 % уровне вероятности.

При сравнении результатов периодограмм-анализа и прогнозирования обнаруживается явная положительная взаимосвязь между точностью прогноза и степенью выраженности ритмичности.

Во временных рядах с хорошо выраженной ритмичностью была и высокая точность прогноза и, наоборот, во временных рядах, в которых по данным периодограмм-анализа ритмичность отсутствовала, прогноз был статистически недостоверным.

Таким образом, инфрадианные ритмические колебания могут быть представлены авторегрессионной моделью, а их параметры достаточно точно прогнозируются на 5—10 дней вперед.

Список литературы: 1. *Аляркинский Б. С.* Биологические ритмы и организация жизни человека в космосе//Пробл. косм. биологии. 1983. **46**. 245 с. 2. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов//Прогноз и управление. 1974. Вып. 1. 406 с. 3. *Доскин В. А., Лаврентьева Н. А.* Актуальные проблемы профилактической хрономедицины. М., 1985. 79 с. 4. *Шабатура Н. Н.* Хронофизиология кардиореспираторной системы. К., 1984. 83 с. 5. *Чернышев М. К.* Резонансно-поисковые вычислительные методы анализа скрытых колебательных процессов в живых системах//Теоретические и прикладные аспекты временной организации биосистем. М., 1976. С. 11—34.

Поступила в редколлегию 16.12.88

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН, канд. техн. наук

О МЕХАНИЗМЕ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ И ЕЕ РИТМА. Сообщение 9

Памятуя о том, что реципрокный принцип двойной иннервации наиболее четко проявляется при флуктуации и фазных моторных посылках, незначительно превышающих их собственный уровень флуктуаций, рассмотрим несколько конкретных примеров двойной иннервации эффекторов, связанных с различными типами нервной системы. Так, антагонистический характер двойной иннервации между холинергической (соматической ее частью) и адренергической иннервациями заметно сказывается на поведении непроизвольных саккадических движениях глаз ($ДГ_н$), управляемых небольшой группой быстрофазных мышечных волокон глазодвигательных мышц соматического типа. В данном случае движение глаз с амплитудой от 2 до 50 угл. мин и частотой следования с интервалом от 0,03 до 10 с формируется непроизвольными быстрофазными квантованными посылками, генерируемыми быстрофазными центрами, локализованными в соматической зоне $РФ_с$, возможно, в $РФ_{св}$ варолиева моста. Энергетический потенциал этих фазных посылок незначительно превышает непроизвольную импульсацию, формирующую тонус быстрофазных мышечных волокон и внешне проявляющийся в виде треморных движений глаз. Если судить по амплитудным значениям движений глаз, то соотношение между амплитудой $ДГ_н$ и амплитудой тремора изменяется приблизительно от 2 до 50 раз. Адренергическая иннервация глазодвигательных мышц осуществляется симпатическими нервами, исходящими главным образом из шейного симпатического узла [1].В данном случае имеет место, видимо, непрямой способ симпатической иннервации группы быстрофазных мышечных волокон, ответственных за формирование $ДГ_н$.

На рис. 1 представлен характер изменений $ДГ_н$ при различных видах стимуляции. Наиболее резкие изменения происходят при световой стимуляции, по-видимому, эти изменения $ДГ_н$ связаны со стимуляцией адренергической зоны $РФ_а$ афферентными сигналами $J_{ас}$, поступающими к ней через переднее двухолмие по тектоспинальному пути. В данном случае в соответствии с уравнением (4)происходит повышение активирующего сигнала $J_{эа}$, а вместе с ним возрастает концентрация $M_а$ на двигательной пластинке быстрофазного мышечного волокна. Наступает гиперполяризация ПМ ЭК и при новом исходном уровне, соответствующем световому фону, не все фазные посылки способны сформировать ПД и оказать возбуждающее воздействие на мышечные волокна. Это могут сделать только те посылки, энергетический потенциал которых достаточно высокий, чтобы под их воздействием смог возникнуть ПД. И тем не менее даже эти посылки при повышенном уровне $E_{мп}$ уже не способны создавать $ДГ_н$ с большой амплитудой. Вот почему при световой стимуляции происходит уменьшение амплитуды $ДГ_н$ и возрастает средний временной интервал между ними.

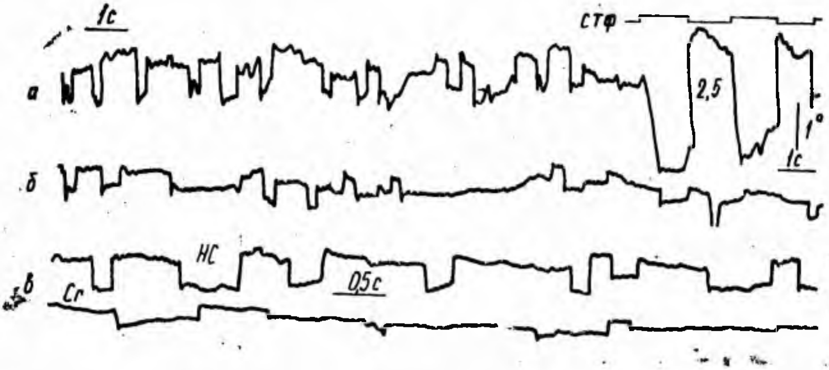


Рис. 1. Изменения непроизвольных саккадических движений глаз при различных видах стимуляции:
а) темновом фоне; б) световом фоне; в) умственной нагрузке в виде счета. НС — не счет, Сч — счет, СТФ — движения глаз при смене точек фиксации

Схематично этот процесс трансформации $ДГ_н$ представлен на рис. 1. Что же касается прямой стимуляции зоны $РФ_с$ сигналом $J_{ас}$, то она в данном случае значительно, видимо, меньше в сравнении с тем эффектом стимуляции, который оказывает сигнал $J_{ас}$ на адренергическую $РФ_а$.

Рассмотрим характер регуляции при двойной иннервации на примере более мощного эффекторного аппарата — сердечной мышцы. Однако здесь проследим его на флуктуационном уровне. На рис. 3 (см. сообщение 8) приведены ритмограммы (*R-R* интервалы) сердца при различных видах стимуляции. Кратковременная слабая световая стимуляция приводит к усилению ритма сердца относительно его фонового значения, соответствующего расслабленному состоянию при закрытых глазах. В то же время мощная световая стимуляция урежает ритм и делает его стабильным в сравнении с фоновым. Влияние афферентных сигналов с холодовых рецепторов кожи (при закрытых глазах и расслабленном состоянии к поверхности тела прикладывались тампоны, смоченные в холодной воде) также изменяет ритм. При этом наблюдаются резкие колебательные сдвиги в ритме сердца.

Звуковая стимуляция при закрытых глазах и расслабленном состоянии (создавались звуковые дискретные хлопки) не оказывает существенного влияния на ритм. Надо полагать, что изменения ритма сердца под влиянием световой и холодовой стимуляций также происходит главным образом через изменение активирующего сигнала по адренергическому каналу в двойной иннервации миокарда. Умственная нагрузка в виде арифметического счета (при закрытых глазах последовательно в быстром ритме от 300 отнималась цифра 17) учащает ритм сердца. В данном случае стимуляция адренергической зоны $РФ_а$ осуществляется кортикальным сигналом $J_к$.

Наиболее резкие сдвиги в регуляции обнаруживаются на примере системы мигания с ее двойным представительством двойной иннервации на ее быстрофазных и медленнофазных мышечных волокнах. Напомним, что круговая мышца (КМ), состоящая из пальпебральной (ПаМ) и орбитальной (ОМ), иннервируемая лицевым нервом, ответственна за смыкание век, а леватор (ЛМ), иннервируемый парасимпатическими нервами глазодвигательного нерва, — за удержание верхнего века в открытом положении [2]. Сохранение нижнего века в открытом положении осуществляется, видимо, гладкой мышцей Мюллера (ММ). Представленные на рис. 2 для разных лиц записи одиночных актов мигания показывают, судя по временным отрезкам, что фаза смыкания осуществляется быстрофазной мышцей, близкой к мышцам соматического типа. Размыкание же века и удержание его в открытом положении — медленнофазной мышцей, относящейся к эффекторам парасимпатической нервной системы.

Таким образом, в мышечной системе мигания, построенной по типу мультиэффекторного аппарата, следует различать два вида двойной иннервации: между холинергической (соматической составляющей) и адренергической для КМ; между холинергической (парасимпатической составляющей) и адренергической нервной системой для ЛМ. Поэтому интерпретация экспериментальных результатов по миганию должна проводиться с учетом указанной выше морфологической специфики двойной иннервации мультиэффекторного аппарата системы мигания.

На рис. 2 представлен характер изменения миганий при различных видах стимуляции относительно фоновой записи, соответствующей расслабленному состоянию испытуемого, находящегося в полной темноте с открытыми глазами. Судя по записи, световая стимуляция оказывает тормозящее действие на частоту мигания. Это, видимо, касается двойной иннервации главным образом КМ, хотя и ЛМ также должна испытывать тормозное воздействие, но в меньшей мере, чем КМ.

По-разному воздействует тактильное раздражение ладони руки. При слабом раздражении мигание затормаживается, а при сильном, наоборот, учащается. В то же время раздражение рецепторов щекотки на пятке ноги учащает мигание в сравнении с фоновым значением. При физической нагрузке (10 кратное приседание) частота мигания повышается. Особенно резко она возрастает при болевых ощущениях, когда рука опускается в горячую воду.

Анализируя характер миганий, было обнаружено, что они по своей форме и частоте следования не однозначны не только среди разных индивидов, но даже отличаются между собой у одного индивида. Разный характер миганий у одного и того же индивида указывает на различный механизм их происхождения. Так, различаются произвольные мигания, управляемые волевыми команда-

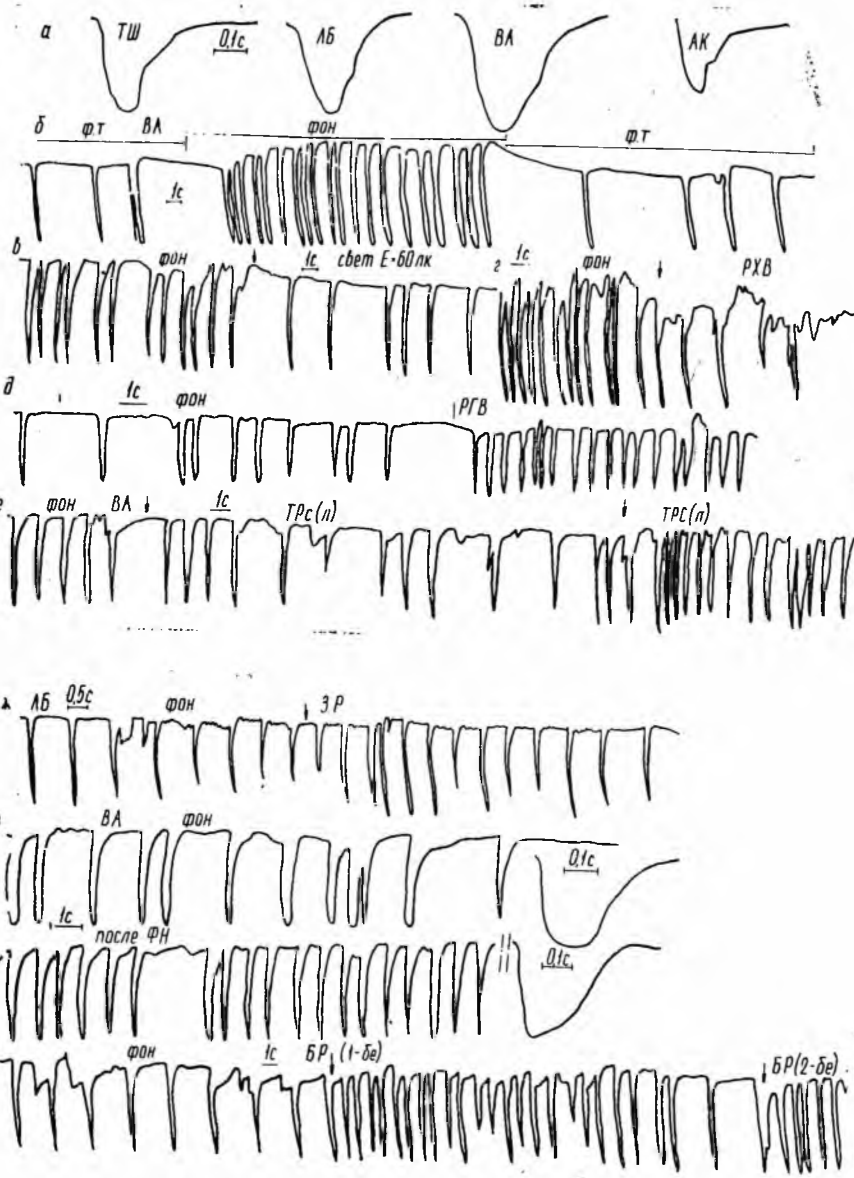


Рис. 2. Изменения мигательных движений глаз при различных видах стимуляции: а) форма мигательного рефлекса у разных испытуемых; б) при концентрации внимания, связанного с фиксацией световой точки и переходе к темновому фону и обратно; в) переходе от темнового к световому фону и обратно; г) холодовой; д) тепловой; е) тактильной слабой (ТРс) и сильной (ТРС) ладони руки; ж) звуковой; з) физической нагрузке в виде 10-кратного приседания; и) болевой, дважды повторенной. РХВ —, РГВ — соответственно рука в холодной и горячей воде, ЗР — звуковой раздражитель, ФН — физическая нагрузка, БЛ — болевая стимуляция

ми, и непроизвольные, генерируемые специальным физическим мигательным центром, состоящим из группы фазных ретикулярных нейронов. В данном случае речь идет о ретикулярном мигательном центре ($ФЦГ_м$), локализованном, видимо, в $РФ_с$ и скорее всего в РФ варолиева моста, представляющей одну из соматических зон

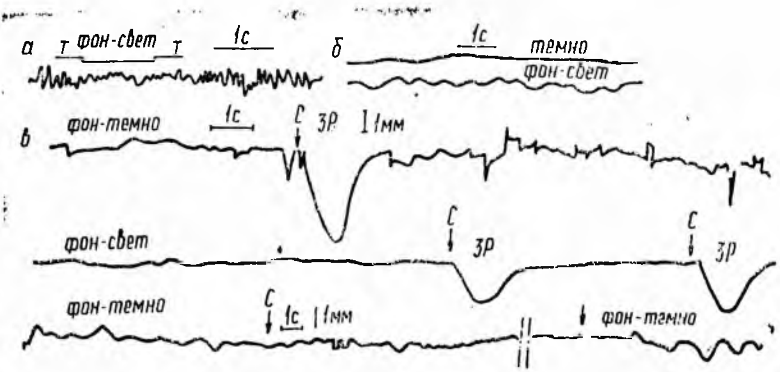


Рис. 3. Изменение характера флуктуационных колебаний при переходе от темнового к световому фону:
а) ЭЭГ; б) и в) гиппуса зрачка. ЗР — зрачковый рефлекс, С — световой стимул. Запись «б» — по Левейнштейну

$РФ_с$. Этот центр по своему принципу действия аналогичен аутохтонному центру, генерируемому быстрофазные нервные посылки, формирующие $ДГ_н$. Поэтому рассмотренные выше изменения миганий под влиянием афферентных сигналов разной модальности логично связать со стимуляцией ретикулярных нейронов $ФЦГ_м$ и зоны $РФ_а$. С учетом такого подхода можно допустить, что учащение миганий связано со стимуляцией $ФЦГ_м$, а урежение — со стимуляцией $РФ_а$.

И, наконец, рассмотрим еще один пример двойной иннервации, связанный со сфинктером радужной оболочки. Он интересен тем, что действия медиаторов $M_х$ и $M_а$ на ПМ ЭК сфинктера на уровне флуктуаций, т. е. гиппуса, относительно соизмеримы, хотя и имеет место неравенство $M_а > M_х$, в результате которого зрачок расширен.

На рис. 3 приведены флуктуации диаметра зрачка в темноте и на свету. Видно, что при свете гиппус зрачка резко стабилизируется и уменьшается по амплитуде, что, несомненно, указывает на торможение холинергического канала и усиление адренергического в соответствии с рассмотренной выше схемой. Кроме того, роль адренергической составляющей четко проявляется и в фазе расширения зрачка, следующей за фазой сужения, возникающей под влиянием холинергического канала в ответ на световую вспышку. Саму же нулевую линию можно рассматривать как состояние пупилломоторной системы, при котором между фоновой импульсацией холинергического канала и фоновой импульсацией адренергического канала, а точнее между их терминальными медиаторами $M_а$ и $M_х$ устанавливается, образно выражаясь, реципрокное состояние равновесия. Усиление адренергической составляющей тем или иным путем четко проявляется на изменении крутизны нарастания фазы расширения зрачка.

Так, сравнительная оценка зрачкового рефлекса без стимуляции $РФ_а$ и при стимуляции (путем опускания руки в холодную во-

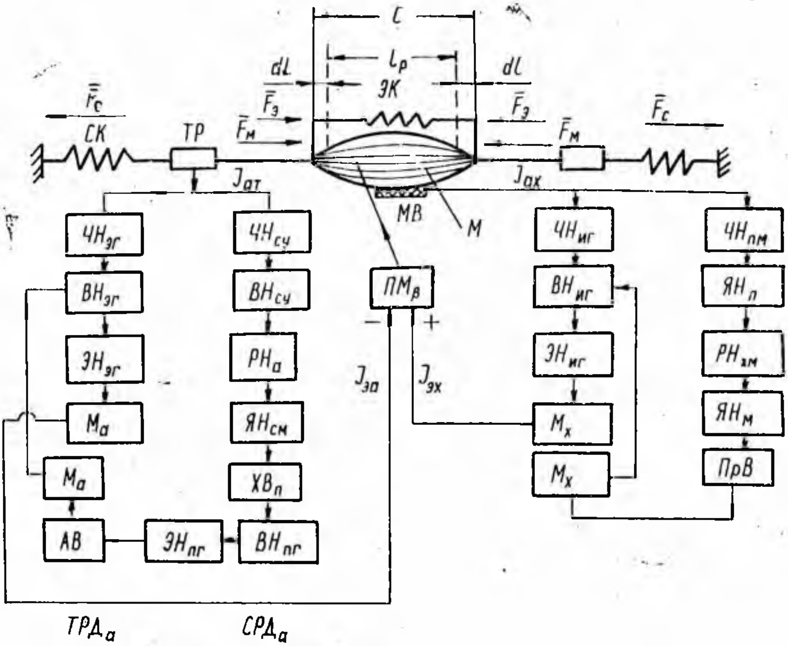


Рис. 4. Схема двойной реципрокной иннервации и регуляции при динамическом равновесии эффектора в состоянии покоя. СК — сухожильные концы, М — мышца, ТР — тензорецепторы, МВ — мышечные веретена, ЭК — эластический компонент мышцы

ду) приводит к ускорению завершения фазы расширения, за которую ответственна адренергическая составляющая. В данном случае при наличии повышенной концентрации $M_а$ более ускоренно происходит возврат мембранного потенциала к своему исходному состоянию после срабатывания ПД, вызванного фазной посылкой $M_х$ под влиянием световой вспышки.

До сих пор механизм антагонистических взаимоотношений двойной иннервации рассматривался на уровне ПМ эффекторной клетки, ее мембранной поверхности. Однако этот уровень не является все же конечным в антагонизме двойной иннервации, а скорее предфинишным, так как результат этого антагонизма в конечном итоге отражается на сократительном эффекте мышечных волокон, если речь идет о мышцах. Поэтому физиологический механизм двойной иннервации следует оценивать с учетом конечного эффекта на исполнительном аппарате. Причем этот эффект проявляется как при покое, так и активном сокращении мышцы.

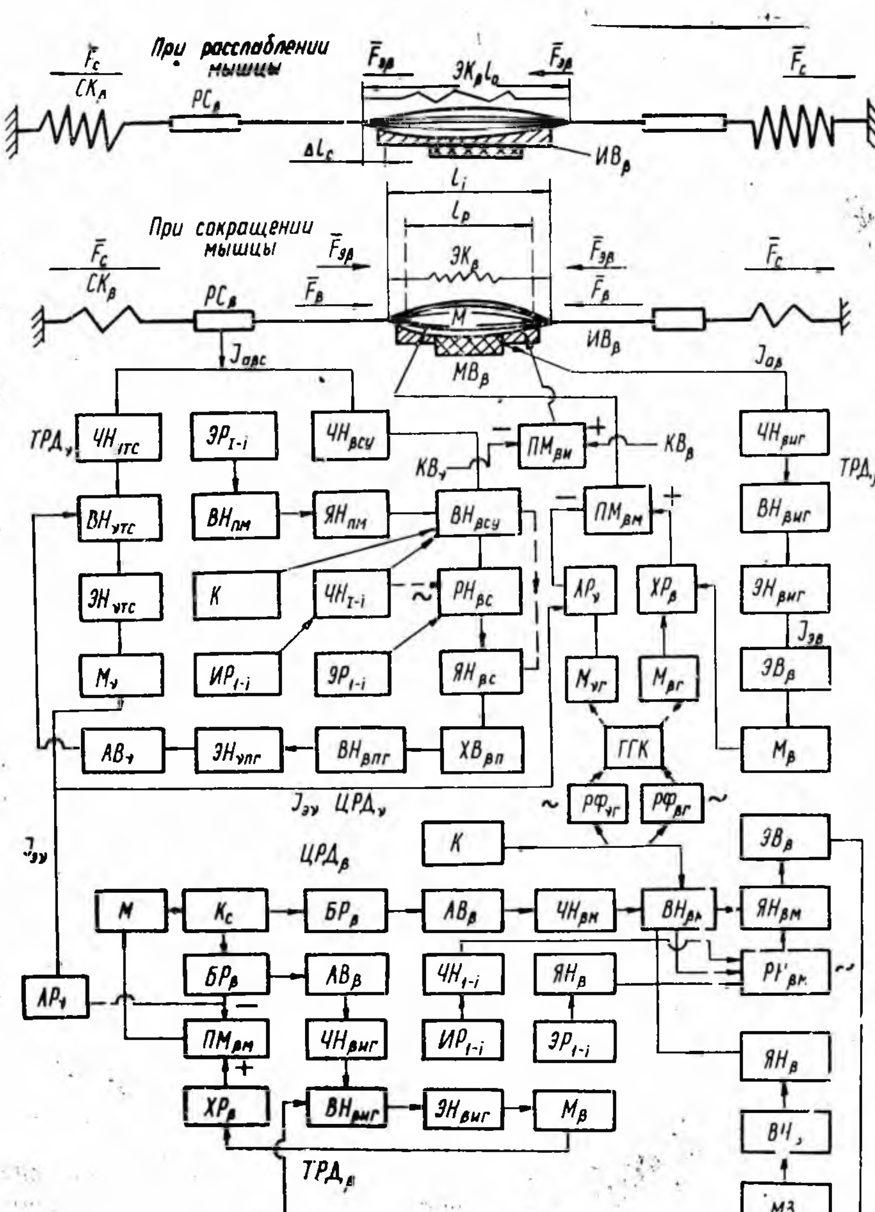


Рис. 2. Многоконтурная схема регуляции сердца, построенная с учетом двойного реципрокного принципа иннервации и регуляции. Здесь: ЧН, ВН, ЭН, РН, ЯН— соответственно чувствительные, вставочные, эфферентные, ретикулярные и ядерные нейроны, $ЭК_β$ — эластический компонент мышцы, М — миокард, $МВ_β$ — мышечные веретена, БР — барорецепторы камер сердца, $РС_β$ — тензорецепторы сухожилий, $ПМ_{βм}$ — постсинаптическая мембрана эффекторной клетки миокар-

Известно, что фоновая активность имеет место не только в адренергической системе, где она является в основном тонической, но в холинергической с ее фазным видом. Установлено [3], что фоновая медиация $M_{\text{хо}}$ формирует фоновый ионный ток через ПМ, действие которого проявляется в виде фонового сокращения мышечных волокон. Причем чем больше этот ток, тем выше степень сокращения мышечных волокон, тем короче исходная длина l_0 мышцы. Этот фоновый сократительный компонент мышцы является составной частью сложного рефлекторного процесса по формированию тонуса мышцы, которым управляет ее двойная иннервация. В общем виде этот процесс можно представить в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4. В организации тонуса мышцы одновременно принимают участие сократительные мышечные волокна в виде компонента $F_{\text{м}}$, эластический компонент мышцы ($F_{\text{э}}$), сухожильный компонент $F_{\text{с}}$, тензорецепторы сухожилий (ТР). Компоненты $F_{\text{м}}$, $F_{\text{э}}$, $F_{\text{с}}$ оказывают активное механическое воздействие на мышцу (см. рис. 4). Условно представим действие этих сил на мышцу в виде векторного уравнения;

$$\overline{F}_{\text{с}} = \overline{F}_{\text{м}} + \overline{F}_{\text{э}}. \tag{1}$$

В соответствии с представленным уравнением сократительный и эластический компоненты действуют согласованно, в одном направлении, сокращая мышечные волокна. В то время как сухожильный компонент, задействованный последовательно с сократительным и эластическим компонентами, действует в противоположном направлении, препятствуя сократительной активности мышцы. Образно его можно представить в виде пружины, занимающей в исходном состоянии сжатое положение. Поэтому компоненты $F_{\text{м}}$ и $F_{\text{э}}$ своими действиями как бы непрерывно растягивают эту пружину. В итоге при состоянии покоя устанавливается динамическое равновесие, которое, в свою очередь, находится под постоянным рефлекторным контролем с обеих сторон. Контроль со стороны адренергического канала осуществляют тензорецепторы сухо-

---

да. ХВ — преганглионарные холинергические нервные волокна, АВ — постганглионарные адренергические нервные волокна, ИР — интерорецепторы, ЭР — экстерорецепторы, ХР — холинорецепторы, АР — адренорецепторы, $F_{\text{с}}$, $F_{\text{э}\beta}$, F_{β} — соответственно силы, развиваемые сухожильными окончаниями, эластическим компонентом, сокращением мышцы. Знак плюс означает деполяризацию, а знак минус — гиперполяризацию постсинаптической мембраны, $\text{ПМ}_{\beta\text{и}}$ — постсинаптическая мембрана эффекторных клеток интрафузальных мышечных волокон, ИВ_{β} — интрафузальные мышечные волокна, КВ — коллатеральные волокна, К — кора, $\text{РФ}_{\gamma\text{г}}$ и $\text{РФ}_{\beta\text{г}}$ адренергическая и холинергическая зоны ретикулярной формации гипоталамуса, ГГК — гипоталамо-гипофизарный комплекс, СК — сухожильные окончания. $M_{\text{аг}}$ и $M_{\text{хг}}$ — гормональные медиаторы адренергического и холинергического вида, МЗ-моторная зона коры жилий, фиксирующие изменение длины (dl_c) мышцы. Афферентный сигнал с них $J_{ат i}=k\,dl_i$ поступает на чувствительные нейроны (ЧН), тела которых, связанные с адренергической зоной $РФ_а$, находятся в спинномозговом узле (СМУ). После них сигнал в составе задних корешков направляется к вставочным нейронам ($ВН_{са}$) серого вещества боковых рогов спинного мозга, а от них на ретикулярные нейроны ($РН_а$) адренергической зоны $РФ_а$. Далее сигнал усиливается ядерными нейронами ($ЯН_{см}$) и уже в качестве эфферентного сигнала $J_{эа}$ по преганглионарным холинергическим (симпатическим) волокнам поступает на вставочные нейроны ($ВН_{пг}$) паравертебральных ганглионарных узлов симпатического ствола, затем на их эфферентные нейроны ($ЭН_{пг}$). От последних по постганглионарным адренергическим нервным волокнам в соответствии с приведенными ранее (см. Сообщения 6—8) схемами двойной иннервации органов, сосудов, тканей направляется к эффекторной клетке (ЭК), продуцируя к ее ПМ $M_а$. Причем $M_а = k \cdot J_{эа}$.

Таким образом, афферентный сигнал $J_{ат}$ с ТР в соответствии со своей величиной повышает концентрацию $M_а$ при усилении фоновой сократимости мышечных волокон со стороны холинергического канала, ослабляя тем сокращение мышечных волокон и натяжение тензорецепторов. Это происходит вследствие того, что повышенная концентрация $M_а$ увеличивает отрицательную величину мембранного потенциала, т. е. гиперполяризует ее, и тем самым понижает фоновый ионный ток, а точнее аксоплазматический фоновый компонент, формирующийся под воздействием $M_{хо}$, а вместе с ним и фоновую сократимость мышечных волокон. В результате компонент $F_{мо}$ уменьшается и новое динамическое равновесие складывается в пользу компонента F_c, результатом которого становится удлинение мышцы на dl.

В свою очередь, если мышца под влиянием компонента F_c сильно удлиняется, то с мышечных веретен ($МВ_х$) мышцы, связанной с холинергическим каналом, возникает афферентный сигнал $J_{ах}$, который в рамках $ТРД_х$ или центральной рефлекторной дуги ($ЦРД_х$), замыкающейся через стволовые структуры мозга, усиливает фоновый сигнал $J_{эхо}$, а вместе с ним $M_{хо}$. И наступает уже новое динамическое равновесие в уравнении (1).

В итоге имеет место непрерывное флуктуационное изменение динамического равновесия, формируемого антагонизмом рефлекторных дуг холинергического и адренергического каналов двойной иннервации, проявляющееся в изменении динамического равновесия концентраций $M_{хо}$ и $M_{ао}$ на ПМ ЭК. Внешнее проявление этого динамического равновесия, обусловленного результатом реципрокного взаимодействия обоих каналов двойной иннервации с их терминальными медиаторами $M_{хо}$ и $M_{ао}$, каждого органа, мышцы, функциональной системы в состоянии покоя проявляется флуктуациями их параметра, на регуляцию которого они нацелены. Так, например, в пупилломоторной системе эти флуктуации проявляются на гиппусе зрачка, т. е. колебании диаметра зрачка, для сердца — на одном из его параметров — флуктуации ритма сердца и т. д. Вместе с тем это динамическое равновесие определяет исходное функциональное состояние эффекторной клетки, а вместе с ней и эффекторного аппарата в целом, на фоне которого реализуются управленческие команды (см. рис. 4).

Итак, по отношению к мышце регулируемым параметром является ее исходная длина, которая в соответствии с законом Франка—Старлинга, с одной стороны, отражает закономерность положительной корреляции между длиной мышцы и напряжением мышечных волокон, а с другой, — пропорциональную зависимость (на определенном отрезке динамического диапазона) между величиной сократительного объема и степенью исходного растяжения мышцы. Именно в регуляции этого параметра, в значительной степени определяющего производительность мышцы, ее энергетический потенциал сокращения, и заключается физиологический смысл двойной антагонистической иннервации. Но почему природа «выбрала» именно двойной принцип иннервации и чем можно объяснить его физиологическую целесообразность? По-видимому организация двойной антагонистической формы иннервации — результат эволюционного развития нервной системы, складывающийся под влиянием формирования адаптационного механизма. С одной стороны, необходимо было осуществлять моторные функции, а с другой, — их реализация, а точнее, коррекция их действий должна была проходить в соответствии с возможностями внутренней среды и внешними окружающими условиями. Появилась объективная потребность в формировании специального адаптационного механизма, который через свой сенсорный аппарат в виде экстра-и интерорецепторов мог бы осуществлять указанную коррекцию. Но для этого необходима была интегрирующая структура в организме, которая аккумулировала бы в себе всю афферентную сигнализацию, осуществляла ее интеграцию и уже в виде интегрированного сигнала через свои исполнительные механизмы выполняла коррекцию моторной функции. И такая структура сформировалась в форме ретикулярной формации и главным образом в виде ее адренергической зоны, которая своим сравнительно слабым аутохтонным сигналом осуществляет коррекцию сильного моторного сигнала.

Учитывая широкий спектр непрерывных воздействий на живой организм разного рода раздражителей, трансформирующихся в поток афферентных сигналов, начиная от весьма слабых, тонических по своей природе, вплоть до сильных, быстрофазных, логично допустить, что одна адренергическая зона $РФ_а$ при всей ее емкости не могла обеспечить в полной мере интеграцию всех афферентных сигналов. Поэтому часть из них, в основном фазных и быстрофазных, аккумулируется другими зонами РФ — парасимпатической и соматической. Соответственно их доля, вкладываемая в механизм адаптации, проявляется через изменение их фоновой импульсации.

Таким образом, механизм адаптации формируется аутохтонными сигналами всех зон РФ, но главным образом — адренергической зоной $РФ_а$. Мы бы сказали более определенно, что холинергическая нервная система в процессе эволюции ориентировалась на реализацию моторной функции с небольшой адаптационной ролью через ее фоновую импульсацию, в то время как адренергическая нервная система со своей высокой аккумулирующей и интегрирующей функцией афферентных сигналов разной модальности формировалась главным образом как основной инструмент в адаптационном аппарате организма. Именно адренергическая система с ее центральным сенсорно-интегрирующим аутохтонным звеном в виде спинномозговых узлов и адренергической зоны $РФ_а$ в спинном мозге — центре Якобсона, проводящими симпатическими нервными путями с их ганглионарными узлами центрального (в виде симпатического ствола) и периферического (экстрамуральных ганглии и терминальных адренергических сплетений) происхождения, по которым распространяется аутохтонный эфферентный сигнал, промодулированный афферентными сигналами разной модальности в $РФ_а$, составляет основу адаптационного аппарата организма.

Таким образом, между холинергической и адренергической нервными системами имеется совершенно четкая дифференциация по их функциональному назначению в организме: первая — холинергическая нервная система выполняет моторную, управленческую функцию, а вторая — адренергическая—адаптационную путем коррекции моторного сигнала. В то же время реализуя свои основные функции, они одновременно выполняют и трофическую функцию, в которой их роль неоднозначна. По-видимому в двойной иннервации наибольший вклад в трофическую функцию вносит холинергический канал с его фазными нервными посылками, оказывающими через терминальный $M_х$ воздействие на холинорецепторы ионных каналов ПМ ЭК, формируя таким образом свой ПД с прямым воздействием через него на мышечное волокно. При этом медиаторы $M_а$ адренергического канала не имеют прямого влияния (в смысле регулирования через свои адренорецепторы своих ионных каналов ПМ ЭК) на мышечные волокна. Они всего лишь корректируют величину ПД, формируемого холинергическим каналом. Отсюда понятно, что энергетическое воздействие холинергического канала на мышечное волокно в сравнении с адренергическим является более сильным и как следствие этого его роль в трофической функции несравнимо выше.

Оценивая общепринятую адаптационно-трофическую теорию Орбели с учетом изложенного выше, можно констатировать, что по своей сути она отвечает реальной действительности, так как в двойной иннервации симпатическая нервная система действительно выполняет обе эти функции.

Таким образом, И. П. Павлов и Л. А. Орбели были правы в своих суждениях по функциональному назначению симпатического нерва. Только Павлов отводил ему чисто трофическую функцию, а Орбели еще и адаптационную. Последний, связав эти две функции с СНС, тем самым поставил перед исследователями два важных вопроса, на которые необходимо было ответить. С одной стороны, нужно было определить действительно ли только СНС ответственна за трофику, а с другой—каков конкретный механизм адаптации, осуществляемый через СНС? Напомним, что ошибка Л. А. Орбели, как выяснилось позднее, была лишь в том, что трофическая функция признавалась им только за симпатической нервной системой. Но эта ошибка, как оказалось, не имеет столь принципиального значения, чтобы отвергать его адаптационно-трофическую теорию. И вторая его ошибка заключалась в том, что он допускал наличие прямой иннервации со стороны СНС ПМ ЭК сплетений мышцы. Можно, конечно, пользуясь результатами научных исследований, полученных за последние 50 лет с того момента, когда была окончательно сформулирована Л. А. Орбели адаптационно-трофическая теория, упрекнуть последнего в том, что он не разглядел главного: единства ретикулярной формации и ее проводящих симпатических путей, что РФ является очагом их зарождения. Но это было бы не корректно с нашей стороны. Тем более сам Л. А. Орбели неоднократно указывал на тесную связь СНС с РФ. Хотя и считал, что высшим центром СНС является гипоталамическая область. И тем не менее адаптационно-трофическая теория Орбели — крупный научный вклад в раскрытии функциональной роли СНС. Орбели оказался правым в главном: он совершенно правильно, с нашей точки зрения, определил наличие общности иннервации органов в виде двойной иннервации и функциональное назначение каждого типа нервной системы в ней. Тот факт, что именно симпатической нервной системе он отвел адаптационную функцию, впервые после Ленгли определив тем самым физиологическую целесообразность двойной иннервации, нельзя иначе расценить как гениальным предвидением Орбели.

Гораздо сложнее обстояло с ответом на второй вопрос. По существу до настоящего времени он так и не был разрешен. В симпатической нервной системе не была определена структура, которая бы в соответствии с самим понятием сущности адаптации аккумулировала на себя через рецепторный аппарат изменения внутренней и внешней среды организма и адекватным образом корректировала режимы работы его функциональных систем. Понятно, что без определения такой структуры принципиально нельзя было рассматривать механизмы адаптации. Орбели, как известно, роль интегрирующего звена отводил мозжечку. В то время как основной интегратор с его аутохтонным адаптационным активирующим сигналом локализован, с нашей точки зрения, в адренергической зоне $РФ_а$ и главным образом спинном мозге. (Продолжение в следующем сообщении).

Список литературы: 1. *Абдулаев М. С.* Нервы двигательного аппарата глаза. Баку, 1973. 256 с. 2. *Хессет Д.* Введение в психофизиологию. М., 1981. С. 235. 3. *Фадеев Ю. А., Курелла Г. А., Поливода А. И.* Биоэлектрические потенциалы. М., 1976. Т. 3. С. 209—216.

Поступила в редколлегию 19.12.86

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН, канд. техн. наук

ДВОЙНОЙ РЕЦИПРОКНЫЙ ПРИНЦИП ИННЕРВАЦИИ КАК БИОРЕГУЛЯТОРНАЯ ОСНОВА НЕЙРОГУМОРАЛЬНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ. Сообщение 10.

В предыдущих сообщениях было показано, что в основе механизма происхождения ритма сердца заложен двойной реципрокный принцип иннервации (ДПР). Однако, рассматривая ДПР как основу структурной организации нервной системы и ее регуляции, сознаем, что сама суть этого принципа скрывается на нейрональном уровне. Именно здесь в биохимической форме реализуется завершающая стадия ДПР в виде взаимодействия ее реципрокных медиаторов: холинергического M_α и адренергического M_ν каналов для эффекторов соматической нервной системы и холинергического M_β и адренергического M_ν для эффекторов парасимпатической нервной системы с постсинаптической мембраной их эффекторных клеток. Поскольку миокард сердца относится к эффекторам парасимпатической нервной системы, то механизм ДПР на нейрональном уровне рассмотрим на примере именно этого вида эффекторов. Хотя понимаем, что этот механизм характеризуется общей закономерностью по отношению к эффекторам парасимпатической и соматической нервных систем. В то же время сами процессы на этом уровне связаны в конечном итоге с изменением мембранного потенциала постсинаптической мембраны (ПМ) эффекторной клетки. Поэтому поиски механизма ДПР на нейрональном уровне должны, по нашему мнению, сводиться к выяснению механизма изменения мембранного потенциала $E_м$ под влиянием реципрокного воздействия на ПМ медиаторов M_β и M_ν.

В соответствии с общепринятыми представлениями мембранный потенциал, т. е. разность потенциалов между внутренней средой клетки и ее межклеточным пространством, а точнее, между внутренней и наружной поверхностями ПМ, формируется сложными процессами, во многом еще не ясными и, главным образом, градиентом концентрации ионов по обе стороны ПМ, среди которых основными являются ионы калия (K^+) внутри клетки и ионы Na^+ в межклеточном пространстве.

Если допустить, что в состоянии покоя внутри клетки находятся ионы калия численностью $N_к$, а в межклеточной среде положительные ионы натрия численностью $N_н$ и при этом $N_н \gg N_к$, то положительный потенциал (заряд) внутри клетки по отношению к положительному потенциалу (заряду) межклеточной среды выступает как отрицательный. Схематично это состояние можно представить на рис. 1. Постсинаптическая мембрана эффекторной клетки, разделяющая эти две среды с различной концентрацией их положительных ионов, с физической точки зрения может рассматриваться как биологический диэлектрик, отличающийся повышенным сопротивлением. Разумеется, на уровне тех потенциалов, которые имеют место в действительности. В общем виде можно записать

$$E_м = N_к e_к^+ - N_н e_н^+ \tag{1}$$

где $e_к^+$, $e_н^+$ — соответственно положительные заряды отдельных ионов калия и натрия.

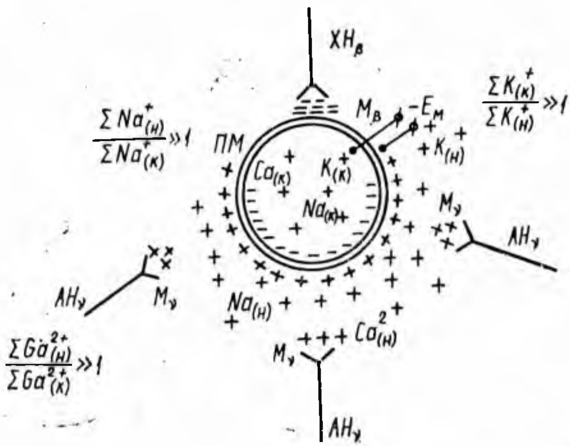


Рис. 1. Схема распределения ионов на поверхности постсинаптической мембраны эффекторной клетки и в ее межклеточной среде при двойной реципрокной иннервации и регуляции

При наличии флуктуаций численности этих ионов величина $E_м$ будет

$$E_{мi} = (N_{к0} + \Delta N_{кi})\, e^+ - (N_{н0} + \Delta N_{нi})\, e_н^+, \tag{2}$$

где $N_{к0}$, $N_{н0}$ — число ионов калия и натрия, соответствующее базальному уровню, т. е. фазе медленного сна.

Из уравнения (2) видно, что приращение $E_м$ возможно либо при увеличении $N_н$, либо при уменьшении $N_к$. Максимальное же приращение происходит при одновременном изменении $N_к$ и $N_н$ в указанных выше направлениях. Если даже допустить, что $e_к^+ = e_н^+$, то при $N_н \gg N_к$ величина $E_м$ согласно уравнению (2) становится отрицательной.

Надо полагать, что в состоянии покоя $N_к$ — относительно стабильная величина, а ее значение определяется режимом функционирования самой клетки. Вариабельной величиной является главным образом $N_н$. Причем, ее возрастание приводит к увеличению гиперполяризации $E_м$, а уменьшение, наоборот, к его понижению и, естественно, возрастанию уровня деполяризации.

Таким образом, фоновой уровень гиперполяризации ПМ эффекторной клетки определяется в значительной степени количеством положительных ионов и в частности Na^+ в ее межклеточной среде.

Теперь сделаем априорное допущение, в соответствии с которым адренергический канал ДПР эффекторной клетки, продуцируя в ее межклеточную среду через свои терминальные окончания, свой медиатор M_ν, каким-то образом, пока окончательно не ясным, изменяет положительный потенциал межклеточной среды путем формирования в ней через воздействия на ее составляющие своим M_ν дополнительных положительных ионов, например, ионов кальция (Ca^{2+}.) Число этих ионов можно представить как $N_{ci} = k \cdot M_{\nu i}$. С учетом этого фактора уравнение (2) примет вид:

$$E_{\text{м}i} = (N_{\text{к}0} + \Delta N_{\text{к}i}) \cdot e_{\text{к}}^{+} - [(N_{\text{н}0} + \Delta N_{\text{н}i}) \cdot e_{\text{н}}^{+} + (N_{\text{с}0} + \Delta N_{\text{с}i}) \cdot e_{\text{с}}^{+}]. \quad (3)$$

Из выражения (3) с учетом $N_{\text{с}}$ видно, что адренергический канал ДПР своим медиатором M_ν вызывает дополнительную гиперполяризацию постсинаптической мембраны путем увеличения положительного потенциала ее межклеточной среды. Причем, чем выше его концентрация в межклеточной среде, тем она больше. Надо полагать, что вариабельность $N_{\text{н}}$ в сравнении с $N_{\text{с}}$ значительно меньше, не говоря уже об $N_{\text{к}}$. Поэтому можно допустить, что флуктуации уровня гиперполяризации ПМ в основном обусловлены флуктуациями $N_{\text{с}}$, а точнее, флуктуациями концентрации M^ν в межклеточной среде. Последний поступает в нее как нервным путем, по адренергическому каналу ДПР, так и гуморальным, также в рамках ДПР, но через адренергический канал нейроэндокринной системы. В обоих случаях поступление M_ν в межклеточную среду ПМ осуществляется главным образом диффузным способом, при котором продуцирование M_ν, в отличие от M_β, происходит не в непосредственной близости от ПМ, а несколько дистальнее.

Итак, адренергический канал ДПР характеризуется своей специфической функцией, направленной на регуляцию уровня гиперполяризации ПМ эффекторной клетки.

Поскольку эта функция по своей форме реализации является тонической, т. е. медленно изменяющейся, то логично допустить, что и сама форма поступления медиатора M_ν к ПМ должна быть адекватной. Видимо, диффузный способ поступления M_ν в межклеточную среду ПМ вполне отвечает процессу регуляции уровня гиперполяризации мембраны. В этой связи логичными становятся результаты исследований В. А. Говырина [1], доказавшего именно диффузный способ поступления M_ν к ПМ эффекторной клетки скелетной мышцы, где он наиболее резко выражен. Подобная форма поступления адренергического медиатора M_ν к постсинаптической мембране может быть понята и с физиологической точки зрения. В данном случае имеется ввиду то обстоятельство, что адренергический канал не выступает как управляющий канал в том смысле, как это принято понимать в отношении холинергического (парасимпатического или соматического) канала, управляющая функция которого не вызывает сомнений.

Заметим, что и гистологические данные также указывают на диффузную форму продуцирования M_ν терминальными окончаниями симпатических нервов. Так, по данным [2] терминалы симпатических нервов не имеют тесных контактов с паренхиматозными клетками органов, т. е. не могут быть отнесены к типичным синапсам и как следствие этого не в состоянии создавать в свой зоне эффективную концентрацию своего терминального медиатора, столь необходимого для фазной реализации управляющей команды.

С учетом изложенного выше условно медиатор адренергического канала M_γ можно рассматривать как медиатор положительной полярности. В то время как медиатор M_β холинергического канала ДПР, исходя из реципрокного принципа, следует обозначать как медиатор отрицательной полярности.

Рассмотрим роль холинергического канала в ДПР и в частности его медиатора M_β. Форма поступления последнего к ПМ принципиально отличается от способа поступления M_γ к ней. Если медиатор M_γ диффузно распределяется в межклеточной среде, то медиатор M_β воздействует через синаптическую щель непосредственно на ее поверхность и при этом на ее локальный участок, на котором концентрируется фазная порция M_β большой плотности, особенно при воздействии управляющих сигналов холинергического канала. Принимая во внимание точку зрения авторов [3], допускающих наличие цитоплазматического (вневизикулярного), т. е. свободного M_β и упакованного в везикулы в синаптических бляшках, можно допустить, что первый вид M_β через фоновое значение $M_{\beta 0}$ формирует фоновые миниатюрные и субминиатюрные потенциалы действия, а $M_{\beta в}$ везикул используется при управляющих сигналах холинергического канала, сопровождающихся выделением на ПМ больших порций M_β в виде $M_{\beta у}$.

При наличии отрицательного заряда M_β или катионов, формируемых с его помощью, можно говорить о резком возрастании отрицательного потенциала на локальном участке поверхности ПМ. При этом его величина может быть определена как

$$e_\beta^- = e_ц^- N_ц, \tag{4}$$

где $e_ц^-$ — отрицательный заряд одного катиона M_β, $N_ц$ — количество катионов.

Резкое повышение отрицательного потенциала на локальном участке ПМ, соизмеримым по своим геометрическим размерам с синаптическим переходом, приводит к ее «пробою», т. е. локальной деполяризации, или по существующим представлениям, к открытию ионных холинергических каналов. И все же более точно следует, видимо, говорить о возникновении локальной деполяризации ПМ. Через последние из-за различия концентрации положительных ионов по обе стороны мембраны мгновенно устремляется поток ионов Na^+, куда, видимо, могут попасть и ионы Ca^{2+}, формируя внутри клетки большой положительный потенциал. В этом случае происходит уже не локальный, а интегральный процесс деполяризации поверхности мембраны, результатом которого является смена знака мембранного потенциала на диаметрально противоположную полярность. Под влиянием этого потенциала часть ионов K^+ выходит из клетки в межклеточное пространство. Ионы Na^+ формируют далее акт сокращения мышечного волокна.

Общий суммарный потенциал, управляющий сокращением всей мышцы, устанавливается по формуле

$$E_{\beta i} = \sum_{i=1}^{n} e_{\overline{\beta i}}. \tag{5}$$

Потенциал E_β, как правило, выступает в роли управляющего фазного сигнала, интенсивность которого определяется плотностью концентрации M_β, выбрасываемой в синаптическую щель из терминалей аксонов.

Поскольку холинергический канал ДПР, как и адренергический, находится под активирующим влиянием своей зоны $РФ_\beta$, формирующей фоновую активность этого канала, то на ПМ имеют место флуктуационные колебания ΔM_β, отражающие флуктуации энергетического потенциала $E_{р\beta}$ зоны $РФ_\beta$ в виде $\Delta E_{р\beta}$. Под влиянием этих флуктуаций на ПМ создаются флуктуации ΔE_β, на фоне которых действует управляющий сигнал $E_{\beta у}$ холинергического канала, значительно превышающий по своему энергетическому потенциалу флуктуации ΔE_β.

Именно за счет миниатюрных потенциалов действия и их флуктуаций формируется фоновая величина сокращения мышечных волокон эффектора, в том числе миокарда. Понятно, что величина этого фонового сокращения непрерывно флуктуирует в соответствии с флуктуациями $E_{мо}$. Учитывая, согласно закону Старлинга, что сила сокращения мышцы определяется ее исходной длиной, сила сокращения миокарда сердца при каждом систолическом выбросе также будет флуктуировать. В результате ритм сердца будет сопровождаться флуктуационными колебаниями систолического выброса относительно его среднего значения. Причем при повышенной фоновой сократимости мышечных волокон миокарда сила систолического выброса уменьшается, а при пониженной, наоборот, повышается. При этом в последнем случае тонус мышц повышается. В то же время фоновая сократимость мышечных волокон определяется не только фоновой активностью холинергического канала. Понятно, что чем выше уровень гиперполяризации ПМ, тем меньше влияние фоновой активности холинергического канала. Поэтому фоновая сократимость мышечных волокон миокарда, выраженная в виде силы $F_ф$ в зависимости от $E_м$ и ΔE_β может быть представлена

$$F_{фi} = k\,\frac{\Delta E_{\beta i}}{E_{мi}}. \tag{6}$$

На уровне фонового сокращения мышцы действует управляющий сигнал холинергического канала, под влиянием которого в синаптическую щель продуцируется $M_{\beta у}$, а на поверхности ПМ отрицательный потенциал $E_{\beta у}$. Последний вызывает дополнительное фазное сокращение мышечных волокон. В конечном итоге усилие мышечных волокон, которое они развивают под влиянием $E_{\beta y}$:

$$F_{\beta y i} = kE_{\beta y i} - F_{\phi i}. \qquad (7).$$

Таким образом, адренергический канал ДПР со своим медиатором M_{ν} и его гиперполяризующей функцией ослабляет действие фонового медиатора $M_{\beta\phi}$ холинергического канала и тем самым снижает фоновую сократимость мышечных волокон. В результате тонус последних снижается и они в соответствии с приведенной на рис. 2 схемой биомеханики мышечного аппарата, которая, по мнению автора, отражает общую закономерность мышечных эффекторов, растягиваются сухожильными окончаниями мышечных волокон. Роль последних можно сравнить с действием растянутых пружин, которое происходит под влиянием, с одной стороны, фонового сокращения мышечных волокон, а с другой—фазного управляющего сигнала. Общее уравнение биомеханики мышечного эффектора парасимпатической нервной системы с учетом ДПР можно представить в следующем виде:

для покоя — $\overline{F}_c = \overline{F}_{э\beta} + \overline{F}_{\phi}$; при сокращении — $\overline{F}_c \ll \overline{F}_{э\beta} + \overline{F}_{\phi} + \overline{F}_{\beta}$ (8), где $F_{\beta} = kI_{э\beta y}$.

В соответствии с изложенным выше и уравнением (8) возрастание фоновой медиации по холинергическому каналу ведет к усилению фоновой сократимости мышечных волокон и как следствие этого — к растяжению сухожильных окончаний. А поскольку последовательно с ними размещены сухожильные рецепторы, реагирующие именно на их растяжение, возникающий в них афферентный сигнал $J_{\nu a}$ поступает на чувствительные нейроны и далее в рамках терминальной и центральной (спинальной) рефлекторных дуг адренергического канала усиливает выброс M_{ν} в межклеточную среду эффекторной клетки, а вместе с ним возрастает уровень гиперполяризации $E_м$ ПМ. В результате снижается фоновая сократимость мышечных волокон, сопровождающаяся ослаблением их тонуса, и они снова растягиваются сухожильными окончаниями. И, наоборот, при чрезмерном растяжении мышечных волокон в результате резкого ослабления их тонуса вследствие, скажем, усиления фоновой активности адренергического канала, на мышечных веретенах мышечных волокон возникает афферентный сигнал $J_{\beta a}$. Последний через терминальную рефлекторную дугу (в случае с гладкими мышцами микрососудов), а в других случаях, как, например, для миокарда сердца, и одновременно через центральную рефлекторную дугу (главным образом) холинергического вида холинергического канала, усиливает фоновую активность последнего и на ПМ возрастает фоновая концентрация $M_{\beta\phi}$ а вместе с ней $E_{\beta\phi}$. Это приводит к усилению фонового потока Na^+ через ПМ и как следствие этого повышается фоновая сократимость мышечных волокон, а вместе с ней растягиваются сухожильные окончания.

Таким образом, изложенное выше убеждает, что механизм двойной реципрокной иннервации на нейрональном уровне нельзя рассматривать в отрыве от биомеханики мышцы.

Помимо этих прямых процессов, составляющих основу механизма ДПР на нейрональном уровне, принимают участие также и косвенные, как, например процесс, связанный с ацетилхолинэстеразой (АХЭ). Последний направлен на снижение концентрации M_β на ПМ и в ее межклеточной среде. Ослабление же активности АХЭ также приводит к повышению концентрации M_β на ПМ со всеми вытекающими отсюда последствиями. Возможно, что фермент подобного типа имеется и в адренергическом канале по отношению к M_γ, который снижает его концентрацию в межклеточном пространстве.

Надо полагать, что медиаторы трофотропного ряда при общем для них заряде отрицательной полярности тем не менее отличаются друг от друга абсолютной величиной. Кроме того, и сами ПМ разных эффекторов по своим свойствам отличаются друг от друга.

Таким образом, сила возбуждения холинергического канала определяется двумя основными факторами: концентрацией фазной посылки $M_{\beta y}$ и уровнем гиперполяризации ПМ, на фоне которого она воздействует на постсинаптическую мембрану. Сама же гиперполяризация ПМ может осуществляться как в рамках ДПР ее адренергическим каналом со своим гиперполяризующим медиатором M_γ, действующим, как правило, в тонической форме, так и в виде формирования тормозного постсинаптического потенциала (ТПСП) с его фазной реакцией. В последнем случае имеет место обычная обратная отрицательная связь, которая возникает в результате коллатерального ответвления от основного холинергического тракта, т. е. аксона и, как правило, вблизи его аксонного холмика. Сигнал последней обязательно проходит через интернейрон, в котором осуществляется трансформация первоначальной медиации M_β на медиацию с противоположной полярностью, в частности, на ГАМК-гамма-аминомасляную кислоту, которая, подобно M_γ, но только в более быстрой фазной форме, создает гиперполяризацию ПМ в месте синаптического возбуждения основного холинергического канала.

Иначе говоря, этот вид обратной связи, адренергический по своему виду, но фазный по форме, отличается тем же локальным характером воздействия на ПМ, что и медиатор M_β холинергического канала. Разнополярный характер воздействия этих двух медиаторов на ПМ четко проявляется в результате ослабления синаптического возбуждения под влиянием ТПСП, что, несомненно, указывает на их алгебраическую суммацию, под влиянием которой происходит изменение мембранного потенциала ПМ. Более того, по мнению отдельных авторов, в обратной цепи формируется специальный тормозной медиатор, а с нашей точки зрения — M_γ, который и вызывает гиперполяризацию ПМ, но только в фазной форме.

Хотя медиаторы обратной отрицательной связи и адренергического канала ДПР имеют одинаковую полярность и оказывают один и тот же гиперполяризующий эффект на ПМ, правда, первый, как правило, в фазной форме, а второй — в тонической. Тем не менее по своему функциональному назначению они существенно отличаются. Дело в том, что медиатор $M_{\nu т}$ адренергического канала ДПР определяет адаптационный настрой эффекторной клетки, в то время как медиатор $M_{\nu ф}$ обратной отрицательной связи как бы демфирует синаптическое возбуждение управляющего сигнала холинергического канала ДПР. Причем степень этого демпфирования тем выше, чем больше сам управляющий сигнал. И в этом отношении он по своему функциональному назначению очень схож с сигналами обратной отрицательной связи в технических системах.

Итак, механизм двойного реципрокного принципа иннервации и регуляции на нейрональном уровне сводится, главным образом, к диаметрально противоположному воздействию их медиаторов на мембранный потенциал постсинаптической мембраны. При этом медиатор M_β холинергического канала деполяризует ее потенциал, а медиатор адренергического канала M_ν, наоборот, гиперполяризует. Если физиологический смысл сигнала холинергического канала очевиден и он сводится, главным образом, к сократительной функции мышечных волокон (при наличии мышечного эффектора), то роль сигнала адренергического канала направлена на непрерывную коррекцию управляющего и фонового сигналов холинергического канала, которая осуществляется через регуляцию уровня гиперполяризации мембранного потенциала ПМ. Причем степень последнего является отражением адаптационного механизма на текущий момент времени. Сама же сущность адаптационного процесса проявляется в интеграции афферентных сигналов разной модальности, включая в том числе и кортикальные сигналы, в адренергической зоне ретикулярной формации ($РФ_\nu$), в соответствии с которой активирующий эфферентный сигнал $J_{\nu э}$ этой зоны формирует по адренергическому каналу ту или иную степень гиперполяризации мембранного потенциала ПМ.

В онтогенезе развитие ДПР характеризуется определенной закономерностью. Так, ритм сердца в пренатальном и в первые годы постнатального периода формируется терминальными рефлекторными дугами холинергического ($ТРД_\beta$) и адренергического ($ТРД_\nu$) вида, которые в соответствии с принципом ДПР свои терминальные медиаторы M_β и M_ν направляют к ПМ эффекторной клетки миокарда. При этом ТРД формируется интрамуральным ганглионарным аппаратом сердца. В ней афферентный сигнал $J_{\beta а}$, возникающий с барорецепторов камер сердца при заполнении их порциями крови, поступает на чувствительные, затем на вставочные и эфферентные нейроны и далее к ПМ эффекторной клетки миокарда в виде M_β. К ней же диффузным путем поступает медиатор M_ν. Последний формируется либо своей ТРД через периферическое адренергическое нервное сплетение сердца или близко расположенный экстрамуральный ганглионарный узел. Не исключено, что первоначально M_{γ} продуцируется хромаффиными клетками сердца в форме аутохтонной генерации. Понятно, что для каждой камеры сердца имеется своя ТРД$_{\gamma}$.

Ввиду малых размеров круга кровообращения на этом возрастном отрезке ТРД$_{\beta}$ со своими слабыми энергетическими возможностями первоначально справляется с формированием систолического выброса, а усилительная функция эфферентных нейронов интрамурального ганглионарного аппарата сердца, направленная на организацию адекватного управляющего эфферентного сигнала, является достаточной. В то же время короткий латентный период этой дуги обеспечивает поддержание высокого ритма сердца. Поскольку холинергический канал является задающим в организации ритма сердца, становится понятным его более раннее формирование в сравнении с адренергическим каналом.

По мере развития организма требуется уже более мощный управляющий сигнал для формирования систолического выброса, адекватного возрастным изменениям сердечно-сосудистой системы. Усилительные эфферентные нейроны интрамурального аппарата уже не в состоянии создать управляющий сигнал соответствующего энергетического потенциала. Их усилительная функция переходит к группе более мощных ядерных нейронов, локализованных в продолговатом мозге. Именно по этой причине формируются афферентные пути в блуждающем нерве, берущие свое начало от барорецепторов камер сердца, по которым афферентные сигналы направляются первоначально к чувствительным нейронам, а затем через вставочные нейроны того же продолговатого мозга к указанным выше группам ядерных нейронов.

Помимо этого часть афферентного сигнала поступает в холинергическую зону РФ$_{\beta}$, оказывая стимулирующее воздействие на ее ретикулярные нейроны. Афферентный сигнал, усиленный ядерными нейронами, и после них уже в качестве эфферентных сигналов по холинергическим центробежным волокнам направляется к вставочным нейронам интрамурального аппарата, формируя таким образом центральную рефлекторную дугу (ЦРД$_{\beta}$) холинергического канала с более мощным управляющим сигналом. По мере развития ЦРД$_{\beta}$ и ее завершения с возрастом формирование ритма сердца становится ее прерогативой. Поскольку время прохождения управляющего сигнала в рамках ЦРД$_{\beta}$ много больше, чем в ТРД$_{\beta}$, соответственно снижается ритм сердца. Аналогичная возрастная динамика происходит и с адренергическим каналом, центральная рефлекторная дуга (ЦРД$_{\gamma}$) которого замыкается через чувствительные нейроны спинномозговых узлов, вставочные и ядерные нейроны спинного мозга. При этом часть афферентного сигнала направляется в адренергическую зону РФ спинного мозга, оказывая стимулирующее влияние на ее ретикулярные нейроны.

Особо отметим, что каждая из этих двух ЦРД имеет свои барорецепторы на стенках камер сердца. Иначе говоря, фазные барорецепторы связаны с ЦРД$_\beta$, а тонические — с ЦРД$_\gamma$. В свою очередь, обе эти рефлекторные дуги находятся под активирующим влиянием, главным образом через вставочные нейроны, своих зон РФ$_\beta$ и РФ$_\gamma$ (см. рис. 2). Поскольку в основе регуляции ритма сердца заложен двойной реципрокный принцип медиации с обязательным присутствием двух реципрокных медиаторов в межклеточной среде, что, естественно, возможно только при их непрерывной доставке в ней, то логично допустить, что сама возрастная динамика развития обоих каналов ДПР должна характеризоваться адекватной синхронностью их развития. И действительно, результаты анатомо-гистологических исследований [4] подтверждают этот вывод. Хотя, начиная от новорожденных и до 80 и более лет имеются определенные возрастные периоды, характеризующиеся нарушением указанного выше синхронного развития каналов ДПР по тем или иным причинам. По характеру изменения ритма сердца, равно как и других функциональных систем, можно судить о преимущественном сдвиге ДПР в сторону холинергической или адренергической составляющей. При этом усиление активности холинергической составляющей сопровождается урежением ритма сердца, а усиление адренергической составляющей в сравнении с холинергической составляющей, наоборот, приводит к учащению ритма сердца. Понятно, что сдвиг ДПР в сторону преимущественного усиления той или иной составляющей влечет за собой изменения в рамках всей сердечно-сосудистой системы. Это связано с особенностями ДПР, в соответствии с которыми эффекторы сердечно-сосудистой системы одновременно находятся под двойным контролем: со стороны эфферентных активирующих сигналов зон РФ$_\beta$ и РФ$_\gamma$.

Так, при сдвиге активности ДПР в сторону адренергической составляющей наступает вазоконстрикция сосудов, в том числе венозной системы. В результате в артериальную систему выбрасывается часть объема депонирующей крови. В свою очередь, возрастание вследствие этого объем циркулирующей крови ускоряет скорость кровотока, а вместе с ней сокращается время на заполнение камер сердца и более быстрое срабатывание ЦРД$_\beta$, что и приводит к учащению ритма сердца. Понятно, что этот фактор в данном случае является всего лишь одной из причин в акте изменения ритма сердца, хотя может быть и основным.

При вазоконстрикции сосудов уменьшается их калибр, особенно сосудов микроциркуляторной системы, хотя тонус их, как показано выше, ослабляется. Это связано с тем, что именно при ослабленном тонусе сосудов они легче поддаются растяжению вдоль их русла сухожильными окончаниями (см. рис. 2). Более того, это растяжение происходит с небольшим закручиванием сосуда вследствие спирального расположения мышечных волокон на их стенках [5].

При усилении активности холинергической составляющей ДПR наступает вазодилатация сосудов. В данном случае в соответствии с рассмотренной выше схемой усиливается фоновая сократимость мышечных волокон, в результате чего объем камер сердца уменьшается, калибр сосудов увеличивается, а тонус мышц повышается, объем циркулирующей крови в артериальной системе снижается, соответственно понижается артериальное давление. В итоге афферентная стимуляция зон РФ с рефлексогенных зон сердечно-сосудистой системы понижается, что и ведет в конечном итоге к урежению ритма сердца.

Изменение ритма сердца является следствием сдвига в сторону усиления или ослабления холинергической или адренергической составляющей ДПР. Сам же механизм сдвига связан с изменением активирующих сигналов зон $РФ_\beta$ и $РФ_\gamma$, а точнее, их соотношения между собой. При этом на нейрональном уровне ДПР функция холинергического канала с его деполяризующей ролью реализуется через ионы K^+ при фоновом и ионы Na^+ при фазном управляющем сокращении мышц, а функция адренергического канала с его гиперполяризующей ролью — через ионы Ca^{2+} и др.

Список литературы: 1. *Говырин В. А.* Трофическая функция симпатических нервов сердца и скелетных мышц. Л., 1967. 131 с. 2. *Говырин В. А.* Адаптационно-трофическая функция сосудистых нервов//Развитие научного исследования наследия академика Л. А. Орбели. Л., 1982. с. 284—294. 3. *Дюнан Ив., Израэль М.* Механизм высвобождения ацетилхолина//В мире науки. 1985. № 6. С. 24—33. 4. *Швалев В. Н., Стропус Р. А.* Медиаторный этап функционирования ВНС-мы в пре-и постнатальном онтогенезе и значение его исследований для клиники//Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. 1979. № 5. С. 5—20. 5. *Куприянов В. В.* Спиральное расположение мышечных элементов в стенке кровеносных сосудов и его значение для гемодинамики//Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. 1983. № 9. С. 46—54.

Поступила в редколлегию 19.12.86

УДК 612.82.014

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

«БИСЕКЦИОННЫЙ» КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИНХРОННЫХ СВЯЗЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Саморегуляция психофизиологических функций операторов АСУ ТП при реализации суггестий создает на фоне флуктуирующих маловыраженных биоэлектрических всплесков вероятный уровень импульсного возбуждения, формируя доминанту иерархических систем головного мозга. Появляется возможность коррегирования целостного мозга на психофизиологическом уровне [1]. Это доказано А. Т. Филатовым. Вариантность систем и подсистем пространственно-временных связей головного мозга приводит к тому, что очевидные доминанты систем таких связей целостного мозга переходят в область скрытых доминант. Скрытые подсистемы связей могут возводиться в ранг очевидных доминант, организуя относительно устойчивую архитектонику взаимозависимых и взаимообусловленных систем синхронных пространственно-временных связей головного мозга.

Системы разнообразных пространственно-временных синхронных и асинхронных связей каждого последующего момента «впитывают» системы иерархических пространственно-временных связей ряда предыдущих моментов. В любых случаях остаются «следовые» явления доминантных систем и подсистем пространственно-временных связей головного мозга. Последние даже по происшествию длительного времени, после того, как приемы реализации саморегуляции психофизиологическими функциями «полустерты», в определенной ситуации условий «зарегулированы». Объясняется это тем, что состояние множеств и подмножеств систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, вызванные суггестиями, оказываются «запечатленными» в памяти пространственно-временных отношений церебральных систем и структур как «оттиски» систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга пережитых патологических состояний.

Цель статьи — выявление каузальности единства противоречий иерархических систем пространственно-временных связей головного мозга методом «бисекции».

В основе единства противоречий иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга лежит силовое противодействие доминантных центров — своеобразных инертных и экзальтированных «узлов» системы импульсного возбуждения целостного мозга, представляющих относительно замкнутые микробиосферы энергетических импульсирующих полей. Биоэлектрическая активность целостного мозга входит составной частью в эту сферу энергетических преобразований и отображает ход событий по одной из сторон в биологически отягощенной форме.

Инертные центры доминант удерживают, затормаживают, консервируют системы импульсного возбуждения в данных зонах мозга. Доминантные центры экзальтации устремляют системы импульсного возбуждения к вероятности и с этой стороны противодействуют изменению систем связей мозга. Инертные центры доминант импульсного возбуждения целостного мозга образуют оригинальные «пространственно-временные пустоты».

Мозаика инертных и экзальтированных центров систем импульсного возбуждения меняется в зависимости от векторной направленности силовых «энергетических» полей, возникающих под волнообразным давлением слитно-тонизирующего действия ретикулярной формации ствола мозга. Аккумулирующие возможности последней обусловлены афферентным возбуждением, являясь противовесом возможному воздействию со стороны внешних полей, в частности, электромагнитных и обусловливая ускоряющую или замедляющую инерционность. Крайняя инерционность одного из противодействий приводит либо к относительному сохранению устойчивости доминанты множества систем синхронных и асинхронных связей головного мозга либо к «выросту» на основе флуктуирующей, скрытой — последующей очевидной доминанты связей.

Таким образом, каузальность изменений архитектоник доминынтных систем и подсистем пространственно-временных связей головного мозга в трансформации интегративных соотношений доминантных центров в сфере импульсного возбуждения и во взаимодействии едино-противоречивых сфер импульсного и электротонического возбуждений, полезна при уточнении объективного диагноза и является предпосылкой для коррегирования агрегатированными устройствами автоматизированных систем управления.

При кибернетическом определении каузальности иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга могут быть использованы элементы алгебры логики, в частности, построенные по принципу дифференциальных усилителей, при помощи которых проще всего раскрывается сущность «бисекционного анализа».

Известно, если полусхемы дифференциального усилителя идентичны, то при поступлении на входы двух ЭЭГ колебаний $x_1=x_2$ на выходах будут сигналы $y_1=y_2$. Если $x_1\neq x_2$, то $y_1\neq y^2$. Когда $x_1>x_2$, то $y_1>y_2$, а, следовательно, $\Delta x=x_1-x_2$ и $\Delta y=y_1-y_2$. Если схема на транзисторах, то разностный сигнал Δx ЭЭГ колебаний x_1 и x_2 вызывает неравенство колекторных потенциалов u_{T_1}, u_{T_2}. На резисторе R_l, включенном в ветвь, соединяющей выходы y_1, y_2, возникает падение напряжения u_l. Изменение Δy вызывает либо увеличение, либо уменьшение потенциала u_l, что эквивалентно увеличению или уменьшению номинала величины резистора R_l.

Представим балластный мост, в одном из плечей которого включен резистор R_l, а в диагональ компенсационного моста — чувствительный гальванометр. Поступление синхронных потенциалов головного мозга равной амплитуды вызывает отклонение гальванометра. Поступление на входы x_1, x_2 разной амплитуды приводит к появлению ΔU_l, что равносильно изменению величины резистора R_l. Это отклонение регистрирует гальванометр, например, чувствительный логометр. Разностные потенциалы (ЭЭГ волны) по аналогии с терминологией импульсной электроники можно условно назвать парафазными или дифференциальными.

Допустим, вместо транзисторов T_1, T_2, образующих дифференциальный усилитель, включены логические элементы «И», например, транзисторные сборки на пять входов. Тогда при поступлении потенциалов от пяти зон регистрации целостного мозга, естественно, при превышении или равенстве уровня анализа, равного порогу срабатывания логических элементов «И», логически умноженный сигнал «И1», больший по амплитуде, чем «И2», приведет к разности серии синхронных потенциалов кибернетически анализируемых зон головного мозга. Тем самым доказано, что одномоментная экзальтация одной из систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга больше другой. Если входы транзисторных сборок, образующих полусхемы дифференциального усилителя, соединить в соответствующей вариабельности, скомпоновав серии модифицированных дифусилителей, то после ранжирования можно идентифицировать разнообразие доминант. Если же схемы таких дифференциальных усилителей собрать соответственно на *n-p-n* и *p-n-p* транзисторных сборках, то можно отобразить разнообразие доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга положительной и отрицательной полярности.

Если вместо логических элементов «И» в полусхемы дифференциального усилителя включить логические элементы «ИЛИ» и вместо компенсационного моста использовать микровольтметр, параллельно включенный резистору R_l, да кроме того включить логический элемент так, чтобы транзистор T_i образовывал с каждым транзисторным элементом «ИЛИ» усилитель постоянного тока с непосредственными связями, а T_{i+1} — аналогично с элементом «ИЛИ2», то возможно автоматическое объединение доминантных синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга положительной и отрицательной полярности во всем пространственно-временном разнообразии. В таком случае вариабельные пространственно-временные организации потенциалов отображаются в форме парафазных сигналов, представляющих доминантность разностью между двумя системами связей, например, n—2 входов логического элемента «ИЛИ1» и n—3 «ИЛИ2», либо n «ИЛИ1» и n—4 «ИЛИ2».

В качестве надостатка проанализированных электронных схем отметим, что они не идентифицируют зоны, где доминируют системы импульсного возбуждения целостного мозга, что решалось дополнительными техсредствами. Положительный эффект состоит в том, что методические приемы кибернетического анализа иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга автоматически моделируются при помощи специализированных схем дифференциальных усилителей.

Разработка метода «бисекционного» анализа на базе симметричных логических схем позволяет упростить методы кибернетического анализа систем пространственно-временных связей головного мозга, каузальность изменения которых во времени и пространстве функционально зависит от доминантных соотношений возбуждения и торможения разнообразных форм целостного мозга. Теорема «бисекционного» анализа [2], делящая схемы на симметричные части, позволяет условно подразделить множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга на симметричные и асимметричные. Это доказывается эффектом, получаемым при помощи специализированных дифусилителей. Тогда, если системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, характеризуемые соответственно логически умноженным или логически сложенным сигналом, равны в обоих полусхемах (плечах) дифусилителя, т. е. $y_{1_i} = y_{2_i}$, то такие системы и подсистемы симметричны. Если же $y_{i_1} \neq y_{i_2}$, то формируются асимметричные системы и подсистемы пространственно-временных связей головного мозга, хотя сами электронные схемы в обоих случаях могут быть образованы из симметричных частей [3], которые, как видно, минимизируют модельное представление биоэлектрической активности головного мозга.

При изменении центра тяжести доминантных систем импульсного и электротонического возбуждения, ярко выраженного при экстремальных состояниях, согласно «бисекционному» системно-кибернетическому анализу, в пространстве и времени перемещаются центры тяжести симметрично-асимметричных систем и подсистем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, образуя в целом симметричную или асимметричную картину пространственно-временных межцентральных отношений церебральных систем и структур. В результате положение массы целостного мозга непрерывно и импульсно меняется в пространстве и времени, как следствие принятого при моделировании положения теории относительности о том, что биоэлектрическая энергия есть отражение действия массы целостного мозга. Последняя изменяется дискретно и аналогово при иссечении биоэнергии в форме биоэлектрической активности, суперпозиции с внешними полями и поглощении ими.

Головной мозг, моделируемый как своеобразный «диполь» инертных (тормозных) и активных (экзальтированных) зон формирующих структуру доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, обладает двухсторонней проводимостью, проницаемой при определенных условиях в одних зонах, непроницаемой в тех же зонах при других условиях, характеризуемых иссечением или поглощением электромагнитной энергии, что, в частности, свидетельствует об односторонней, «вентильной» направленности векторов биоэлектрических полей головного мозга. В любом варьируемом представлении биоэлектрических процессов отмечается универсализм и пластичность приспособляемости поведения целостного организма. В этом ключ к кибернетическому коррегированию множеством иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, в частности, операторов АСУ.

Для кибернетического анализа систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга иерархических структур с трехзначной ситуацией по методу «бисекции» могут быть использованы элементы трехзначной логики [4]. В качестве логических элементов в этом случае целесообразно использовать феррит-транзисторные ячейки. При этом производится прошивка ферритовых сердечников в разных направлениях. Реализация бионических устройств по схемам троично-пороговой логики экономичней двухзначной, так как меньше потребление мощности питания.

Применяя символику пороговой логики, выражение зависимости, реализуемой элементами запрета, можно описать формулой:

$$f(x, y) = \mathrm{sign}^{+}(x - y),$$

где x и y — переменные, соответствующие запрещающему биосигналу, sign^+ — символический знак, смысл которого определяется соотношением:

$$\mathrm{sign}^+(u) \approx \begin{cases} 1, & \text{если } u \geqslant 1, \\ 0, & \text{если } u < 0. \end{cases}$$

Способ моделирования доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга в бионическом аспекте такого случая заключается в том, что веса входов пороговых элементов и величины порогов срабатывания могут быть положительными, отрицательными и нулевыми. Интерпретируется принцип взаимной компенсации двух равных по модулю, но противоположных по полярности систем третьей.

Если трехзначная переменная x характеризует варианты ЭЭГ колебаний, организующих пространственно-временную архитектонику в области регистрации, то, обозначив положительные ЭЭГ волны $x^+=\mathrm{sign}^+(x)$ отрицательной полярностью $x^-\mathrm{sign}^+(\bar{x})$, получим: система пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, сформированная из x^+ ЭЭГ колебаний, равна логической единице «1», трехзначная переменная электромагнитного элемента принимает «1»; система пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, отображающая ЭЭГ колебания отрицательной полярности x^-, равна логической единице тогда, когда трехзначная переменная x принимает значение [illegible]. В остальных случаях ЭЭГ колебания x^+, x^- принимают значения логического нуля.

В некоторых узлах бионического медприбора может быть принята двухпроводная система кодирования, например, в передачах трехзначных ЭЭГ волн. Тогда в первом проводе передача закодированного биосигнала, сопоставленная $x=1$, соответствует $x^+=1$, а передача биосигнала по второму проводу, сопоставленная ситуации $x=1$, соответствует $x^-=1$. Сигнал, кодируемый нулем трехзначной логики, отображает ситуацию систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, равную логической единице 1 тогда, когда переменная x принимает значение логического нуля, соответствующего отсутствию биосигналов. При этом в обоих проводах двухпроводной системы происходит отображение ЭЭГ колебаний разной полярности. Трехзначная переключательная функция произвольной формы $f(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$ трехзначных ЭЭГ переменных $x_1, x_2, ..., x_n$ реализуется в виде двух двухзначных переключательных функций f^+, f^-, каждая из которых образована от $2n$ двухзначных переменных x_1^+ x_1^-, x_2^+, x_2^-..., x_n^+, x_n^-. Тогда операция инверсии трехзначной переменной сводится к перестановке индексов полярности.

Как видно, «трехзначная» гомоморфная модель множества дифференцируемых доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга позволяет минимизировать исходную систему ЭЭГ колебаний, конкретизировать изменения пространственно-временных межцентральных отношений церебральных систем и структур, выявить дополнительные возможности для верификации и непротиворечивости выводов, создает дополнительные возможности для приьедения в соответствие моделируемой подсистемы связей с системой целостного организма. Моделирование целостного мозга в теоретическом плане позволяет объяснить широкий круг вопросов организации пространственно-временных связей головного мозга в норме и при различных экстремальных состояниях патологии и, естественно, представляет технический интерес с точки зрения формирования бионического формализованного языка, адекватного для описания сложных автоматических устройств, комплексов и систем.

Идентификация системы ЭЭГ волн переводит качественно-визуальное электрофизиологическое описание в количественно-информационные сообщения. Широкое внедрение в клиническую и экспериментальную медицину ЭЭГ методов объективной дифференциальной диагностики в значительной мере ограничивается отсутствием достаточно простых электромедицинских приборов для автоматического анализа вариабельных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга. Целесообразно пользоваться критериями оптимальности, основанными на вычислении доверительных интервалов и весовом смещении систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, так как они согласуются с теорией конечных автоматов.

Полученные результаты свидетельствуют об эвристической ценности разработанной гомоморфной модели и об эмпирической валидности примененных методов кибернетического анализа множества доминантных систем простраственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Моделирование множества иерархических систем пространственно-временных связей головного мозга дает возможность использовать предложенные методы в прогнозированном лечении, при дифференциации первичных симптомов от вторичных дислокационных и общемозговых с учетом индивидуальных свойств биоэлектрической активности головного мозга в зависимости от топики процесса, его характера и особенностей клинических проявлений.

Список литературы: 1. *Колотенко Г. А.* Нейрокибернетическая модель синхронных потенциалов человека в период самовнушения состояния успокоения//Биологическая и медицинская кибернетика. Ч. 3. М.; Л., 1974. С. 94—98. 2. *Middlebrook R. D.* Differential Amplifiers. John Wiley and sons, Inc. New York, 1963. P. 34—44. 3. *Линн Д., Мейер Ч., Гамильтон Д.* Анализ и расчет интегральных схем. Ч. 2. М., 1969. С. 252. 4. *Брусенцов Н. П.* Пороговая реализация трехзначной логики электромагнитными средствами//Вычислительная техника и вопросы кибернетики. М., 1972. Вып. 9. С. 3—35.

Поступила в редколлегию 14.05.86

УДК 510.62

М. Ф. БОНДАРЕНКО, д-р техн. наук, *Д. Э. СИТНИКОВ, Н. В. ШАРОНОВА*, канд. техн. наук, *Е. В. ЯВТУШЕНКО*

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ МЕЖМОРФЕМНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Важнейшей компонентой автоматизированных информационных систем является подсистема информационно-лингвистического обеспечения, под которой обычно понимается совокупность информационных структур, объединенных в базу данных, алгоритмов их обработки, а также моделей и языков для доступа к базе данных. Наиболее удобное средство для общения человека с ЭВМ — естественный язык, использование которого требует наличия в автоматизированной системе элементов интеллекта для понимания (интерпретации) естественно-языкового запроса и формирования адекватного сообщения.

Ключевой проблемой при создании автоматизированных информационных систем является проблема понимания смысла сообщения, которая неизбежно приводит к решению проблемы понимания смысла слова. По мнению многих ведущих специалистов в области языкознания и прикладной лингвистики, смысл слова не является в общем случае суммой смыслов составляющих его морфем, это даже не функция, это отношение более общего вида. В связи с этим становится актуальной задача исследования и математического моделирования межморфемных отношений, т. е. тех связей, которые существуют в слове между префиксами и корнями, корнями и суффиксами, основами и окончаниями (флексиями).

Пусть M — множество морфем одного типа (например, префиксов). На множестве M введем систему предикатов S так, чтобы любой предикат $P(\tilde{t})\in S$ обращался в 1 на множестве морфем с какой-либо определенной семантической ролью и был равен 0 в противном случае. Таким образом, множество предикатов S можно отождествить с множеством семантических ролей префиксальных морфем. Каждому элементу A из M соответствует множество предикатов из S, дающих 1 при подстановке A. Следовательно, каждому $A\in M$ взаимно-однозначно соответствует некоторый одноместный подстановочный предикат $A(t)$, где $t\in S$*. Мы получили множество S семантических ролей с определенным на нем множеством M предикатов-морфем.

Рассмотрим теперь два множества семантических ролей S_1 и S_2 и соответственно два множества предикатов-морфем M_1 и M_2. Операция соединения двух морфем $P_1(t_1)$ и $P_2(t_2)$ из M_1 и M_2 характеризуется согласованием семантических ролей, присущих данным множествам морфем. Результатом такого соединения на-

* Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Х., 1987. С. 39.

зовем множество связей между семантическими ролями, т. е. множество пар семантических ролей, характеризующих две стоящие рядом морфемы.

Такое множество представляет собой некоторый бинарный предикат $P(t_1, t_2)$, причем $P(t_1, t_2) \to P_1(t_1)\ P_2(t_2)$. Предположим возможность согласования семантических ролей не зависит от того, к каким морфемам они относятся, т. е. любые две роли из множеств S_1 и S_2 либо согласуются, либо нет. Тогда на декартовом произведении множеств $S_1 \times S_2$ можно задать предикат $\lambda(t_1, t_2)$, принимающий значение 1, если роли t_1 и t_2 можно согласовать, и значение 0 в противном случае.

Результатом соединения двух морфем $P_1(t_1)$ и $P_2(t_2)$ является логическое умножение $P_1(t_1) \cdot P_2(t_2)$, что может означать возможность согласования любой роли морфемы $P_1(t_1)$ с любой ролью морфемы P_2. Однако словарная реализация не подтверждает этого утверждения: часто некоторые семантические роли рядом стоящих морфем не согласуются. В общем случае операция соединения (*) морфемных семантических ролей запишется так:

$$P_1(t_1) * P_2(t_2) = \lambda(t_1, t_2)\, P_1(t_1)\, P_2(t_2). \tag{1}$$

Действительно, логическое произведение $P_1(t_1)\ P_2(t_2)$ исчерпывает все связи между семантическими ролями морфем P_1 и P_2, а $\lambda(t_1, t_2)$ исключает часть нереализованных связей. Язык использует не все возможные подмножества семантических ролей. Однако для удобства математического описания без особого огрубления задачи будем считать, что множества M_1 и M_2 совпадают с множествами всех предикатов, определенных соответственно на множествах S_1 и S_2. Тогда булевы алгебры предикатов из множеств M_1 и M_2 являются подалгебрами булевой алгебры бинарных предикатов, заданных на $S_1 \times S_2$. Докажем теорему, позволяющую аксиоматически вести операцию соединения морфем.

Пусть имеется конечная булева алгебра M и две подалгебры $M_1 \subseteq M$, $M_2 \subseteq M$.

Теорема. *Пусть функция f: $M_1 \times M_2 \to M$ удовлетворяет свойствам:*

$$f(x, y)\, xy = f(x, y);$$

$$f(x_1 \vee x_2, y) = f(x_1, y) \vee f(x_2, y);$$

$$f(x, y_1 \vee y_2) = f(x, y_1) \vee f(x, y_2),$$

тогда $f(x)$ можно представить в виде

$$f(x, y) = \lambda xy,$$

где λ — фиксированный элемент из M. Обратно, если $f(x, y)$, можно представить в виде (5), то выполняются свойства (2)—(4).

Доказательство. Вторая часть теоремы очевидна. Докажем первую часть. Пусть $\{x_i\}_{i=1}^{m}$ — система минимальных ненулевых элементов булевой подалгебры M_1, $\{y_j\}_{j=1}^{n}$ — система минимальных ненулевых элементов подалгебры M_2. Пусть также для функции f выполняются свойства (2)—(4). Положим $f(0, y)=0$ для любого y, $f(x, o)=0$ для любого x. Покажем, что для любых ненулевых x, y

$$f(x, y)=\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right] xy. \qquad (6)$$

Любой ненулевой элемент x подалгебры M_1 может быть представлен в виде дизъюнкции некоторых минимальных элементов этой подалгебры:

$$x=x_{i_1} \vee x_{i_2} \vee \ldots \vee x_{i_k}.$$

Аналогично $y=y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee_{j_e}$. Следовательно,

$$\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right] xy=\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right](x_{i_1} \vee x_{i_2} \vee \ldots \vee$$

$$\vee x_{i_k}) \wedge (y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee y_{j_e})=\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right](x_{i_1}, y_{j_1} \vee$$

$$\vee X_{i_1}y_{j_2} \vee X_{i_2}Y_{j_3} \vee \ldots \vee x_{i_1}y_{j_e} \vee x_{i_2}y_{j_1} \vee x_{i_2}y_{j_2} \vee \ldots \vee x_{i_2}y_{j_e} \vee \ldots \vee$$

$$\vee x_{i_k}y_{j_1} \vee x_{i_k}y_{j_2} \vee \ldots \vee x_{i_k}y_{j_e}=\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\, x_i y_j\right] \wedge$$

$$\wedge (x_{i_1}y_{j_1} \vee x_{i_1}y_{j_2} \vee \ldots \vee x_{i_1}y_{j_e} \vee x_{i_2}y_{j_1} \vee x_{i_2}y_{j_2} \vee \ldots \vee$$

$$\vee x_{i_2}y_{j_e} \vee \ldots \vee x_{i_k}y_{j_1} \vee x_{i_k}y_{j_2} \vee \ldots \vee x_{i_k}y_{j_e}).$$

Здесь мы применили свойство (2). Раскрывая скобки и используя тот факт, что конъюнкция двух различных минимальных ненулевых элементов равна нулю, получаем

$$\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\, xy=f(x_{i_1}, y_{j_1})\, x_{i_1}y_{j_1} \vee \ldots \vee f(x_{i_k}, y_{j_e})\, x_{i_k}y_{j_e}.\right.$$

Еще раз применим свойство (2):

$$\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right] xy=f(x_{i_1}, y_{j_1}) \vee f(x_{i_1}, y_{j_2}) \vee \ldots \vee f(x_{i_1}, y_{j_e}) \vee$$

$$\vee f(x_{i_2}, y_{j_1}) \vee f(x_{i_2}, y_{j_2}) \vee \ldots \vee f(x_{i_2}, y_{j_e}) \vee \ldots \vee f(x_{i_k}, y_{j_1}) \vee$$

$$\vee f(x_{i_k}, y_{j_2}) \vee \ldots \vee f(x_{i_k}, y_{j_e})=f(x_{i_1}, y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee y_{j_e}) \vee$$

$$\vee f(x_{\ 2}, y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee y_{j_e}) \vee \ldots \vee f(x_{i_k}, y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee y_{j_e})=$$

$$=f(x_{i_1} \vee x_{i_2} \vee \ldots \vee x_{i_k}, y_{j_1} \vee y_{j_2} \vee \ldots \vee y_{j_e})=f(x, y).$$

Здесь мы применили свойства (3) и (4). Таким образом, если вместо λ взять $\left[\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} f(x_i, y_j)\right]$, то получим $f(x, y)=$ $=\lambda xy$. Теорема доказана.

Проиллюстрируем соединение $p_1(t_1)$ и $P_2(t_2)$ примером взаимодействия морфем. Для этого рассмотрим взаимодействие префиксальных морфов и основ. Исследование операции соединения $P_1(t_1) * P_2(t_2)$ проведем на морфемном шве между префиксом и остальной частью слова. Пусть каждому исследуемому префиксальному морфу соответствует свое подмножество множества M_1 семантических ролей, а каждой основе, соединяющейся с данным морфом, соответствует свое подмножество множества M_2 семантических ролей.

Многозначные глагольные префиксы **вы-, до-, на-, пере-, от-** соединяются с основами **работать, рубить, лететь** и образуют слова, наделенные определенным смыслом.

В словах «переработать», «перерубить», «зарубить», «вырубить», «доработать», «вылететь», «долететь», «залететь» происходит такой выбор связей, что несколько семантических ролей префикса связаны с одной или несколькими семантическими ролями основы.

Полученное слово имеет столько смыслов, сколько существует связей между морфемами.

На конкретном примере рассмотрим образование связей между префиксальными морфемами «от-» и «у-» и основами «работать» и «лететь». Префикс «от-» обладает следующими семантическими ролями: x_1 — «отделение части от целого»; x_2 — «полнота действия»; x_3 — «обратное действие»; x_4 — «ответное действие»; x_5 — «абсолютный конец действия, длящегося неопределенный отрезок времени»; x_6 — «действие, длящееся определенный отрезок времени»; x_7 — «оттенок прошедшего времени»; x_8 — горизонтальная направленность действия от объекта в плоскости, перпендикулярной объекту-ориентиру»; x_9 — «нежелательный результат действия»; x_{10} — «результат действия».

Префиксальная морфема «у-» обладает следующим набором семантических ролей: x_{11} — «направленность действия на весь объект»; x_{12} — «уменьшение»; x_{13} — «уничтожение»; x_{14} — «умещение»; x_{15} — «сохранение прежнего состояния»; x_{16} — «достижение цели»; а также семантическими ролями x_8, x_9, x_{10}, которые являются общими для данных префиксальных морфем.

Основы «работать» и «лететь» характеризуются семантическими ролями $y_1 \div y_4$ и $y_5 \div y_8$ соответственно: y_1 — «находиться в действии»; y_2 — «заниматься чем-нибудь, применяя свой труд, осуществляя какую-нибудь деятельность»; y_3 — «иметь где-нибудь какое-нибудь занятие, служить»; y_4 — «обслуживать кого-нибудь своим трудом»; y_5 — «нестись, передвигаться по воздуху»; y_6 — «мчаться»; y_7 — «падать»; y_8 — «о времени: быстро проходить».

Сочетание префиксальных и корневых морфем удобно показать с помощью схемы, из которой видно, как образуются связи между данными частями слова.

Префикс «от-» и основа «работать» образуют слово «отработать», которое характеризуется шестью смысловыми значениями. Каждой связи между множеством семантических ролей префикса и множеством семантических ролей основы соответствует одно смысловое значение полученного слова: (x_4y_1) — «провести над работой, в работе определенное время»; (x_5y_1) — «перестать находиться в действии, остановиться»; (x_5y_2) — «кончить работать, занимаясь до этого чем-нибудь, применяя свой труд, осуществляя какую-нибудь деятельность»; (x_5y_3) — «окончить работу на пред-

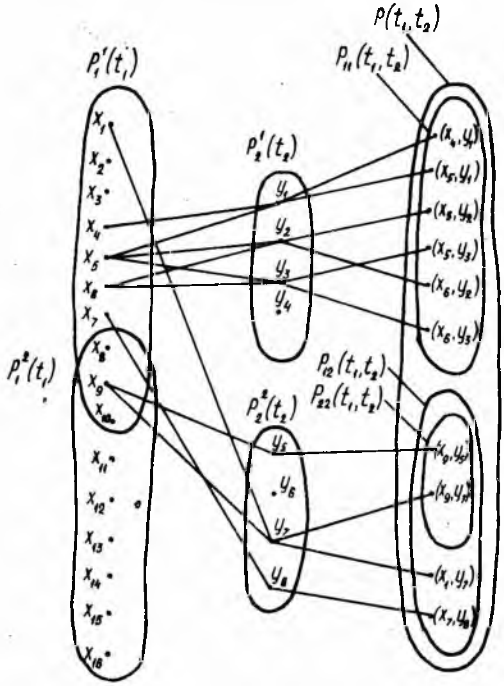


Схема сочетания префиксальных и корневых морфем

приятии, в учреждении»; (x_6y_3) — «провести над работой, в работе какое-нибудь время, занимаясь какой-нибудь деятельностью».

Слово «отлететь» получает в результате сочетания префикса «от-» и основы «лететь» четыре смысловых значения: (x_9y_5) — «летя, удалиться по отношению к объектам, которые совершают активное движение»; (x_9y_6) — «летя, удалиться и упасть по отношению к объектам, которые совершают пассивное движение»; $(x_{11}y_7)$ — «оторваться»; (x_7y_8) — «исчезнуть, пропасть».

Слово «улететь» характеризуется двумя смысловыми значениями: (x_9y_5) — «летя, удалить по отношению к объектам, которые совершают активное движение»; (x_9y_7) — «летя, удалиться по отношению к объектам, которые совершают пассивное движение».

Формула (1) позволяет описать взаимосвязи между префиксальными морфемами и основами. Для рассматриваемого примера $\lambda(t_1, t_2)$ имеет вид:

$$\lambda(t_1, t_2) = t_1^{x_4} t_2^{y_1} \vee t_1^{x_5} t_2^{y_1} \vee t_1^{x_5} t_2^{y_2} \vee t_1^{x_5} t_2^{y_3} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_2} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_3} \vee$$

$$\vee\, t_1^{x_1} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_7} t_2^{y_8} \vee t_{x_9} t_2^{y_5} \vee t_2^{x_9} t_2^{y_7}. \qquad (7)$$

Множества семантических ролей префиксов «от-» и «у-» определяются предикатами $P_1^1(t_1)$ и $P_1^2(t_1)$ соответственно:

$$P_1^1(t_1)=t_1^{x_1}\vee t_1^{x_2}\vee t_1^{x_3}\vee t_1^{x_4}\vee t_1^{x_5}\vee t_1^{x_6}\vee t_1^{x_7}\vee t_1^{x_8}\vee t_1^{x_9}\vee t_1^{x_{10}};\qquad(8)$$

$$P_1^2(t_1)=t_1^{x_8}\vee t_1^{x_9}\vee t_1^{x_{10}}\vee t_1^{x_{11}}\vee t_1^{x_{12}}\vee t_1^{x_{13}}\vee t_1^{x_{14}}\vee t_1^{x_{15}}\vee t_1^{x_{16}}.\qquad(9)$$

Множества семантических ролей основ «работать» и «лететь» определяются предикатами $P_1^1(t_2)$ и $P_2^2(t_2)$ соответственно:

$$P_2^1(t_2)=t_2^{y_1}\vee t_2^{y_2}\vee t_2^{y_3}\vee t_2^{y_4};\qquad(10)$$

$$P_2^2(t_2)=t_2^{y_5}\vee t_2^{y_6}\vee t_2^{y_7}\vee t_2^{y_8}.\qquad(11)$$

Опишем с помощью формулы (1) каждую конкретную реализацию. В случае взаимодействия префикса «от» и основы «работать» образуется слово «отработать»:

$$P_{11}(t_1,\ t_2)=\lambda(t_1,\ t_2)\,P_1^1(t_1)\,P_2^1(t_2)=(t_1^{x_4}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_1}\vee$$
$$\vee t_1^{x_5}t_2^{y_2}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_3}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_2}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_3}\vee t_1^{x_1}t_2^{y_7}\vee t_1^{x_7}t_2^{y_8}\vee$$
$$\vee t_1^{x_9}t_2^{y_5}\vee t_1^{x_9}t_2^{y_7})(t_1^{x_1}\vee t_1^{x_2}\vee t_1^{x_3}\vee t_1^{x_4}\vee t_1^{x_5}\vee t_1^{x_6}\vee t_1^{x_7}\vee$$
$$\vee t_1^{x_8}\vee t_1^{x_9}\vee t_1^{x_{10}})(t_2^{y_1}\vee t_2^{y_2}\vee t_2^{y_3}\vee t_2^{y_4})=t_1^{x_4}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_1}\vee$$
$$\vee t_1^{x_5}t_2^{y_2}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_3}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_2}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_3}.\qquad(12)$$

Предикат $P_{11}(t_1,\ t_2)$ является результатом операции соединения предикатов $P_1^1(t_1)$ и $P_2^1(t_2)$:

$$P_1^1(t_1)\ *\ P_2^1(t_2)=P_{11}(t_1,\ t_2).\qquad(13)$$

В случае сочетания префикса «у-» и основы «работать» слова не образуются:

$$P_1^2(t_1)\ *\ P_2^1(t_2)=P_{21}(t_1,\ t_2);\qquad(14)$$

$$P_{21}(t_1,\ t_2)=\lambda(t_1,\ t_2)\,P_1^2(t_1)\,P_2^1(t_2)=(t_1^{x_4}t_2^{y_7}\vee t_1^{x_7}t_2^{y_8}\vee$$
$$\vee t_1^{x_9}t_2^{y_5}\vee t_1^{x_9}t_2^{y_7}\vee t_1^{x_4}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_2}t_2^{y_3}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_2}\vee t_1^{x_6}t_2^{y_3})\times$$
$$\times(t_1^{x_8}\vee t_1^{x_9}\vee t_1^{x_{10}}\vee t_1^{x_{11}}\vee t_1^{x_{12}}\vee t_1^{x_{13}}\vee t_1^{x_{14}}\vee t_1^{x_{15}}\vee t_1^{x_{16}})\times$$
$$\times(t_2^{y_1}\vee t_2^{y_2}\vee t_2^{y_3}\vee t_2^{y_4})=0.\qquad(15)$$

Образование связей между множествами семантических ролей префикса «от-» и основы «лететь» дает слово «отлететь», операция соединения предикатов $P_1^1(t_1)$ и $P_2^2(t_2)$ дает множество семантических значений слова «отлететь»:

$$P_1^1(t_1)\ *\ P_2^2(t_2)=P_{12}(t_1,\ t_2);\qquad(16)$$

$$P_{12}(t_1,\ t_2)=\lambda(t_1,\ t_2)\,P_1^1(t_1)\,P_2^2(t_2)=(t_1^{x_4}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_1}\vee t_1^{x_5}t_2^{y_2}\vee$$

$$\vee\, t_1^{x_5} t_2^{y_3} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_2} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_3} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_5} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_1} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_7} t_2^{y_8}) \times$$

$$\times\, (t_1^{x_1} \vee t_1^{x_2} \vee t_1^{x_3} \vee t_1^{x_4} \vee t_1^{x_5} \vee t_1^{x_6} \vee t_1^{x_7} \vee t_1^{x_8} \vee t_1^{x_9} \vee t_1^{x_{10}}) \times$$

$$\times\, (t_2^{y_5} \vee t_2^{y_6} \vee t_2^{y_7} \vee t_2^{y_8}) = t_1^{x_9} t_2^{y_5} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_1} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_7} t_2^{y_8}. \qquad (17)$$

Слово «улететь» образуется в результате взаимодействия предикатов $P_1^2(t_1)$ и $P_2^2(t_2)$ и характеризуется двумя смысловыми значениями:

$$P_1^2(t_1) * P_2^2(t_2) = P_{22}(t_1,\ t_2); \qquad (18)$$

$$P_{22}(t_1,\ t_2) = \lambda(t_1,\ t_2)\, P_1^2(t_1)\, P_2^2(t_2) = (t_1^{x_4} t_2^{y_1} \vee t_1^{x_5} t_2^{y_1} \vee {}_1^{x_5} t_2^{y_2} \vee$$

$$\vee\, t_1^{x_5} t_2^{y_3} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_2} \vee t_1^{x_6} t_2^{y_3} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_5} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_1} t_2^{y_7} \vee t_1^{x_7} t_2^{y_8}) \times$$

$$\times\, (t_1^{x_8} \vee t_1^{x_9} \vee t_1^{x_{10}} \vee t_1^{x_{11}} \vee t_1^{x_{12}} \vee t_1^{x_{13}} \vee t_1^{x_{14}} \vee t_1^{x_{15}} \vee t_1^{x_{16}}) \wedge$$

$$\vee\, (t_2^{y_5} \vee t_2^{y_6} \vee t_2^{y_7} \vee t_2^{y_8}) = t_1^{x_9} t_2^{y_5} \vee t_1^{x_9} t_2^{y_7}. \qquad (19)$$

При образовании слов «отлететь» и «улететь» между множествами семантических ролей префиксов «от-», «у-» и основы «лететь» возникают две одинаковые связи: $x_9 y_5$ и $x_9 y_7$, т. е. в значениях, которые соответствуют этим связям, данные слова являются синонимами. При сравнении предикатов $P_{12}(t_1,\ t_2)$ и $P_{22}(t_1,\ t_2)$ видно, что

$$P_{22}(t_1,\ t_2) \rightarrow P_{12}(t_1,\ t_2). \qquad (20)$$

Множество семантических ролей слова «улететь» содержится в множестве семантических ролей слова «отлететь».

Приведенные в данной работе уравнения являются частью математической модели межморфемных отношений. На примере исследования отношения между префиксами и основами показаны и описаны основные закономерности такого типа отношений.

Поступила в редколлегию 18.01.90