

17 78

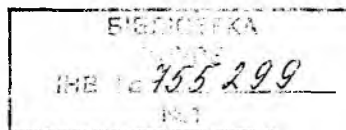
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**ПРОБЛЕМЫ**  
**БИОНИКИ**

**Всеукраинский межведомственный**  
**научно-технический сборник**

ОСНОВАН В 1968 г.

ВЫПУСК 58



**Харків 2003**

**Харківський національний університет радіоелектроніки**

755 299

УДК 519.7

В сборнике публикуются статьи по *БИОНИКЕ ИНТЕЛЛЕКТА*.

Рассматриваются: нейронные сети с использованием в дистанционном обучении, медицинской диагностике; теория оценок; системы распознавания образов; математика и физика информационных процессов; категорное моделирование в информационных системах; применение бионики интеллекта в системах искусственного интеллекта.

Для преподавателей вузов, научных работников и специалистов.

У збірнику публікуються статті з *БІОНИКИ ІНТЕЛЕКТУ*.

Розглядаються: нейронні мережі з використанням у дистанційному навчанні, медичній діагностиці; теорія оцінок; системи розпізнання образів; математика та фізика інформаційних процесів; категорне моделювання в інформаційних системах; застосування біоники інтелекту в системах штучного інтелекту.

Для викладачів вищих закладів освіти, науковців і фахівців.

*The journal publishes articles on the BIONICS OF INTELLIGENCE.*

*The topics considered are: neural networks with appliance in distant education; evaluation theory; pattern recognition systems; mathematics and physics of information processes; category modeling in information systems; the appliance of bionics of intelligence in artificial intelligence systems.*

The issue intended for university teachers, research workers and specialists.

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М.Ф. Бондаренко* (гл. ред.), д-р техн. наук, проф. *Ю.П. Шабанов-Кушнарченко* (отв. ред.), канд. техн. наук *В.А. Чикина* (зам. отв. ред.), д-р техн. наук, проф. *Н.Н. Буслик*, д-р техн. наук, проф. *Т.К. Винцюк*, канд. техн. наук, проф. *З.В. Дударь*, д-р техн. наук, проф. *А.В. Королев*, д-р техн. наук, проф. *А.А. Павлов*, д-р техн. наук, проф. *Е.П. Пулятин*, д-р техн. наук, проф. *А.А. Рось*, д-р техн. наук, проф. *И.Б. Сироджа*, д-р техн. наук, проф. *А.Д. Тевяшев*, д-р техн. наук, проф. *И.Г. Филиппенко*, д-р техн. наук, проф. *О.Н. Фоменко*, д-р техн. наук, проф. *С.Ю. Шабанов-Кушнарченко*, д-р физ.-мат. наук, проф. *М.М. Шлезингер*, д-р физ.-мат. наук, проф. *С.В. Яковлев*.

Ответственный за выпуск канд. техн. наук *В.А. Чикина*

Свидетельство о гос. регистрации № КВ-4485 от 22.08.2000 г.

Рекомендовано Ученым советом Харьковского национального университета радиоэлектроники  
Протокол № 52 от 26 сентября 2003 г.

*Сборник включен в список специальных изданий ВАК Украины по техническим наукам*

Адрес редакционной коллегии: Украина, 61166, Харьков-166, просп. Ленина, 14, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЕ), тел. 702-14-46.

УДК 519.7:007.2

Е.В. БОДЯНСКИЙ, Е.Е. КОРОЛЬКОВА, Н.С. ЛАМОНОВА

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ САМООБУЧЕНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ Т. КОХОНЕНА

В работе рассмотрены алгоритмы конкурентного самообучения самоорганизующихся карт (SOM) Т. Кохонена и предложены их модификации, позволяющие повысить быстродействие и качество обработки информации путем соответствующего выбора шага обучения и функции соседства.

### Введение.

В задачах интеллектуального анализа данных, связанных с кластеризацией, гетероассоциацией, диагностикой, сжатием информации и т.п., широкое распространение получили самоорганизующиеся карты, введенные Т. Кохоненом [1], представляющие собой по сути нейронные сети с прямой передачей информации и реализующие отображение входного пространства  $X$  с помощью некоторого оператора  $F$  в выходное пространство  $Y$  так, как это показано на рис. 1

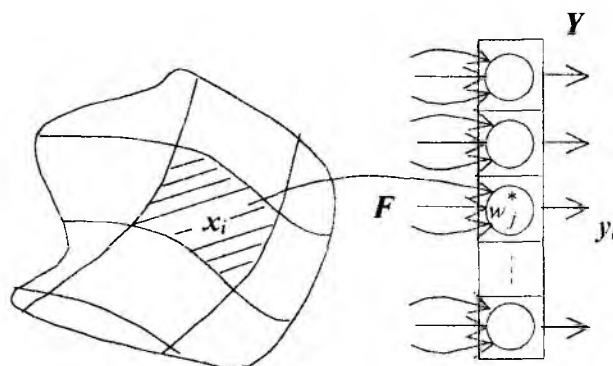


Рис. 1 Отображение  $F: X \rightarrow Y$ .

Как видно из рисунка, входное пространство  $X$  разбито на подобласти  $X_i$ , которые “накрываются” “картой”, при этом любой элемент, принадлежащий подобласти  $X_i$ , возбуждает только один нейрон  $w_j^*$  нейронной сети.

В основе карты Кохонена лежит нейробиологическая модель Д. Виллшоу – К. фон дер Мальсбурга [2, 3], основанная на том, что многие отделы мозга имеют планарную структуру, при этом качественно разнородная информация отображается в разные участки мозга, а обучение происходит за счет самоорганизации синаптических весов по Д. Хэббу [3].

Свойства самоорганизации нейронной сети связаны с тем, что настройка синаптических весов происходит без внешнего обучающего сигнала, т.е. в режиме самообучения, при этом каждый поступающий сигнал вызывает перестройку (адаптацию) тех или иных параметров. Существенно, что этот процесс может протекать непрерывно, обеспечивая возможность решения поставленной задачи в реальном времени.

Самоорганизующаяся карта имеет крайне простую архитектуру и кроме нулевого рецепторного слоя содержит единственный слой нейронов, именуемый иногда слоем Кохонена [4]. Каждый нейрон слоя Кохонена связан с каждым рецептором нулевого слоя прямыми связями и со всеми остальными нейронами поперечными внутрислойными (латеральными) связями. Именно латеральные связи обеспечивают возбуждение одних нейронов и торможение других.

Благодаря такой организации сети, каждый нейрон получает всю информацию об анализируемом входном образе и генерирует на своем выходе соответствующий отклик, после чего в слое Кохонена возникает режим конкуренции, в результате которой определяется единственный нейрон-победитель с максимальным выходным сигналом. Этот сигнал по латеральным связям обеспечивает возбуждение ближайших “соседей” победителя

и подавление реакции далеко от него отстающих узлов. Таким образом, в процессе конкурентного самообучения формируются группы нейронов, каждый из которых максимальным откликом реагирует на образы из соответствующих подобластей  $X_j$  входного пространства  $X$ . Это что позволяет карте Кохонена, кроме уже отмеченных задач, успешно справиться с квантованием непрерывного входного пространства в компактные дискретные подмножества, понижением его размерности при минимальной потере информации, выделением наиболее информативных признаков анализируемых образов, т.е. со всем тем, что так или иначе связано с компрессией больших объемов информации [5].

Самоорганизующиеся карты могут иметь различную топологию, хотя наиболее часто рецепторы и нейроны располагаются в узлах одномерной или двумерной решетки. Возможны, конечно, решетки и большей размерности, однако более предпочтительными представляются архитектуры, сохраняющие некоторым образом топологическую упорядоченность входного пространства.

### Постановка задачи.

Рассмотрим карту Кохонена произвольной топологии, содержащую  $n$  рецепторов и  $m$  ( $m < n$ ) нейронов в слое Кохонена, каждый из которых характеризуется собственным  $n$ -мерным вектором синаптических весов  $w_j, j=1,2,\dots$ , при этом сам нейрон – это, как правило, либо адаптивный линейный ассоциатор, либо обучаемый соответствующим образом перцептрон Розенблатта, либо радиально-базисный элемент.

Каждый нейрон сети получает  $n$ -мерный входной вектор  $x$  и генерирует на своем выходе сигнал  $y_j$ , зависящий от вектора синаптических весов  $w_j$ , настроенных с помощью алгоритма самообучения на определенную область входного пространства  $X_j$ . Близкие в смысле используемой метрики входные векторы  $x(k)$  и  $x(p)$  (здесь  $k$  и  $p$  либо номера образов, либо такты текущего дискретного времени, в которые эти образы предъявляются сети) могут возбуждать либо один и тот же нейрон  $w_j$ , либо два нейрона “соседа”, например,  $w_j$  и  $w_{j+1}$  или  $w_j$  и  $w_{j-1}$ . В некоторых случаях нейрон-победитель  $w_j^*$  с максимальным выходным сигналом  $y_j$  может возбуждать и своих ближайших соседей так, что  $y_j > y_{j+1}, y_{j-1} > y_{j+2}, y_{j-2} > \dots$

В основе процедуры самоорганизации карты Кохонена лежат принципы конкурентного самообучения, а ее работа, как и любого другого алгоритма обучения, начинается с инициализации синаптических весов сети, которые обычно выбираются с помощью генератора случайных чисел, при этом весьма желательно, чтобы для каждого из нейронов выполнялось условие  $\|w_j(0)\| = \sqrt{w_j^T(0)w_j(0)} = 1$ . Сама процедура самоорганизации реализуется в три основных этапа [3]: конкуренции, кооперации и синаптической адаптации. Задачей настоящей работы является модификация известных алгоритмов самоорганизации с целью расширения их функциональных возможностей в плане повышения качества обработки информации.

### 1. Конкуренция и синаптическая адаптация

Процесс конкуренции начинается с анализа образа  $x(k)$ , поступающего с рецепторного слоя на все нейроны слоя Кохонена. Для каждого из нейронов вычисляется расстояние

$$D(x(k), w_j(k)) = \|x(k) - w_j(k)\|,$$

причем, если входы и синаптические веса предварительно пронормированы так, что  $\|x(k)\| = \|w_j(k)\| = 1$ , а в качестве расстояния используется евклидова метрика, то мерой близости между векторами  $x(k)$  и  $w_j(k)$  может служить скалярное произведение:

$$D(x(k), w_j(k)) = x^T(k)w_j(k) = \cos(x(k), w_j(k)) = \cos \Theta_j.$$

Далее определяется нейрон-победитель, "ближайший" ко входному образу такой, что

$$D(x(k), w^*(k)) = \min_j D(x(k), w_j(k)),$$

после чего в простейшем случае "перепрыгивая" через этап кооперации, можно подстроить синаптические веса сети с помощью элементарного правила конкурентного самообучения [1]:

$$w_j(k+1) = \begin{cases} w_j(k) + \eta(k)(x(k) - w_j(k)), & \text{если } j\text{-тый нейрон является победителем,} \\ w_j(k) & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Несложно видеть, что процедура (1) реализует принцип "победитель получает все", при этом вектор синаптических весов нейрона-победителя "подтягивается" по входному вектору на расстояние, определяемое шагом поиска  $\eta(k)$ .

Регулирование величины шага поиска обычно производится, исходя из эмпирических соображений [1-6], а общая рекомендация сводится к тому, что он должен монотонно уменьшаться в процессе самообучения. С этой рекомендацией согласуется введенная в [7] процедура

$$\eta(k) = r^{-1}(k), \quad r(k) = \alpha r(k) + \|x(k)\|^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (2)$$

которая для пронормированных входов приобретает простой вид

$$r(k) = \alpha r(k-1) + 1, \quad (3)$$

при этом при  $\alpha = 1$  (2) приобретает форму, предложенную в [8], а (3) автоматически дает оценку

$$\eta(k) = \frac{1}{k},$$

удовлетворяющую условиям А. Дворецкого. Варьируя фактором забывания  $\alpha$ , несложно обеспечить достаточно широкий интервал изменения шага поиска

$$\frac{1}{k} \leq \eta(k) \leq 1.$$

## 2. Кооперация.

Одной из особенностей карты Кохонена является возможное наличие этапа кооперации в процессе самоорганизации, когда нейрон-победитель определяет так называемую локальную область топологического соседства, в которой возбуждается не только он сам, но и его ближайшее окружение, при этом более близкие к победителю нейроны возбуждаются сильнее чем удаленные. Эта топологическая область определяется функцией соседства  $\varphi(j, l)$ , зависящей от расстояния  $D(w_j(k), w_l(k))$  между победителем  $w_j^*(k)$  и любым из нейронов слоя Кохонена  $l = 1, 2, \dots, m$  и некоторого параметра, задающего ее "ширину". Как правило,  $\varphi(j, l)$  - это потенциальная (ядерная) функция, симметричная от-

носителем максимума в точке  $D(w_j^*(k), w_j^*(k)) = 0$  и принимающая с ней единичное значение, монотонно убывающая с ростом расстояния и стремящаяся к нулю при  $D(w_j^*(k), w_l(k)) \rightarrow \infty$ .

Наиболее часто в качестве функции соседства используется гауссиан [9], конус (треугольник) [2], параболоид (перевернутая квадратичная функция) [10], “мексиканская шляпа” [5] и целый ряд других [11].

Использование функции соседства приводит к правилу самообучения вида

$$\begin{aligned} w_l(k+1) &= w_l(k) + \eta(k)\varphi(j, l, k)(x(k) - w_l(k)), \\ l &= 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (4)$$

реализующему принцип “победитель получает больше” вместо традиционного “победитель получает все”. Естественно, что при  $\varphi(j, l) = \delta_{jl} = 1$  при  $j = l$  и 0 в остальных случаях, приходим к стандартному алгоритму (1), обеспечивающему на каждом такте настройку единственного нейрона  $w_j^*(k)$ . Использование же в качестве  $\varphi(j, l)$  ядерных функций ведет к тому, что все нейроны сети в большей или меньшей мере подтягивают векторы своих синаптических весов к текущему  $x(k)$ .

Анализ сходимости процессов конкурентного самообучения, произведенный М. Котрелом и Дж. Фортон [12], показал, что в процессе настройки синаптических весов, должен уменьшаться не только шаг поиска  $\eta(k)$ , но и параметр, определяющий ширину функции соседства, которая таким образом становится зависимой от текущего времени.

Для гауссовской функции:

$$\varphi(j, l) = \exp\left(-\frac{\|w_j^*(k) - w_l(k)\|^2}{\sigma^2}\right)$$

а фактически для

$$Y(j, l) = \exp\left(-2\frac{1 - w_l^T(k)w_j^*(k)}{\sigma^2}\right).$$

Г. Риттером и К. Шультемом было предложено [13, 14] для настройки параметра ширины  $\sigma$  использовать процедуру:

$$\sigma(k) = \sigma(0) \exp\left(-\frac{k}{\beta}\right), \quad (5)$$

где  $\beta$  - скалярный параметр, определяющий скорость уменьшения силы влияния нейрона-победителя на свое окружение.

Естественно, что при этом меняется и форма области топологического соседства, приобретающая вид

$$\varphi(j, l, k) = \exp\left(-\frac{\|w_j^*(k) - w_l(k)\|^2}{\sigma^2(k)}\right) = \exp\left(-2\frac{1 - w_l^T(k)w_j^*(k)}{\sigma^2(k)}\right).$$

Заметим также, что экспоненциальное убывание параметра ширины может быть обеспечено и с помощью более простого чем (5) выражения

$$\sigma(k) = \beta\sigma(k-1), \quad 0 < \beta < 1.$$

В принципе в качестве функции соседства можно использовать не ядерные конструкции, а выходной сигнал каждого из нейронов слоя Кохонена, при этом нейрон-победитель определяется по максимальному положительному значению этого сигнала. Алгоритм самообучения при этом естественно приобретает форму

$$\begin{aligned} w_l(k+1) &= w_l(k) + \eta(k)\varphi(j, l, k)(x(k) - w_l(k)) = \\ &= w_l(k) + \eta(k)y_l(k)(x(k) - w_l(k)), \quad l = 1, 2, 3, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

Несложно заметить, что (6) представляет собой модифицированное правило обучения входной звезды С. Гроссберга [15] и обеспечивает не только притяжение к образу  $x(k)$  близких к нему нейронов, но и отталкивание тех узлов, выход которых находится в “противофазе” ко входному сигналу.

Если в качестве нейронов слоя Кохонена использовать линейные ассоциаторы, то (6) можно переписать в форме

$$w_l(k+1) = w_l(k) + \eta(k)w_l^T(k)x(k)(x(k) - w_l(k)),$$

з, поскольку  $\|w_l(k)\| = \|x(k)\| = 1$ , то и в более простом виде

$$\begin{aligned} w_l(k+1) &= w_l(k) + \eta(k)\cos(x(k), w_l(k))(x(k) - w_l(k)) = \\ &= w_l(k) + \eta(k)\cos\Theta_l(k)(x(k) - w_l(k)). \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к биполярной функции соседства, приведенной на рис. 2 и обеспечивающий более широкие возможности процессу самоорганизации.

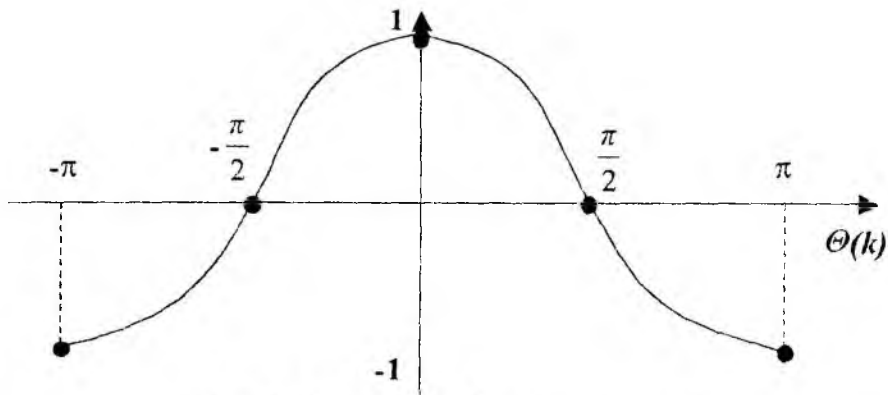


Рис. 2. Биполярная функция соседства

### 3. Нейронный газ.

Еще один подход к самоорганизации основан на использовании порядковых статистик и получил название алгоритма нейронного газа [16,17]. В рамках этого подхода все нейроны ранжируются в порядке возрастания расстояний  $D(x(k), w_l(k))$  так, что

$$D(x(k), w^*(k)) < D(x(k), w^1(k)) < D(x(k), w^2(k)) < \dots < D(x(k), w^{m-1}(k)),$$

где верхний индекс обозначает ранг  $R(w_l(k))$  каждого нейрона в слое после предъявления образа  $x(k)$  т.е.

$$R(w^*(k)) = 0 < R(w^1(k)) = 1 < R(w^2(k)) = 2 < \dots < R(w^{m-1}(k)) = m-1.$$

Несложно видеть, что при нормированных входах удобно использовать ранжирование

$$1 \geq \cos \Theta^*(k) > \cos \Theta^1(k) > \cos \Theta^2(k) > \dots > \cos \Theta^{m-1}(k) \geq -1$$

или

$$1 \geq y^*(k) > y^1(k) > y^2(k) > \dots > y^{m-1}(k) \geq 1.$$

Далее для каждого из нейронов определяется значение функции соседства

$$\varphi(x(k), w_l(k)) = \exp\left(-\frac{R(w_l(k))}{\lambda(k)}\right),$$

где  $\lambda(k)$  - параметр ширины) и производится уточнение синаптических весов согласно формуле

$$w_l(k+1) = w_l(k) + \eta(k)\varphi(x(k), w_l(k))(x(k) - w_l(k)).$$

Несложно видеть, что параметры нейрона с нулевым рангом  $w^*(k)$  (фактически нейрон-победитель) при этом уточняются с помощью процедуры (1).

Аналогично предыдущему параметры алгоритма в процессе самообучения должны уменьшаться, например, с помощью соотношений [13]

$$\lambda(k) = \lambda_{\max} \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{k/N}, \quad \eta(k) = \eta(0) \left( \frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}} \right)^{k/N},$$

где  $N$  - объем обучающей выборки;

$\lambda_{\max}$  - максимально возможное значение ширины;

$\lambda_{\min}$  - минимальные значения соответствующих параметров.

### Заключение.

Весь процесс самоорганизации имеет две временные фазы [1]. Начальная фаза упорядочения, в которой происходит топологическое разбиение входного пространства, и последующая фаза сходимости, в которой осуществляется точная настройка синаптических весов. По окончании этого процесса нейронная сеть в принципе может решать поставленные задачи без уточнения весов, однако, если появляется входной образ, который не будет отнесен ни к одному из сформированных кластеров, картой должен быть образован дополнительный нейрон в слое Кохонена, несущий информацию об этом образе, при этом весьма желательно, чтобы вновь включился процесс самообучения. Поскольку процесс обучения карты Кохонена происходит обычно быстрее чем настройка многослойной сети с помощью алгоритма обратного распространения ошибок, самоорганизующиеся карты наиболее эффективны для работы в реальном времени, когда настройка синаптических весов и обработка входных сигналов протекают параллельно. Введение в процесс самоорганизации этапа кооперации и соответствующих алгоритмов обучения позволяет расширить функциональные возможности рассматриваемого класса искусственных нейронных сетей.

**Список литературы:** 1. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 362 p. 2. *Rojas R.* Neural Networks. A Systematic Introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 502 p. 3. *Haykin S.* Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, Inc., 1999. 842 p. 4. *Tsoukalas L.H., Uhrig R.E.* Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. N.Y. John

Wiley&Sons, Inc., 1997. 587 p. 5. *Advances in Intelligent Control* / Ed. by C.J. Harris. London: Taylor and Francis, 1994. 373 p. 6. *Shalkoff R.J.* Artificial Neural Networks. N.Y: The Mc. Graw-Hill Comp., Inc., 1997. 422 p. 7. *Бодянский Е.В., Плисс И.П., Соловьева Т.В.* Многошаговые оптимальные предсказатели многомерных нестационарных стохастических процессов // Доклады АН УССР. Сер. А. 1986, №12. С.47-49. 8. *Goodwin G.C., Ramadge P.J., Caines P.E.* A globally convergent adaptive predictor // Automatica. 1981. 17. №1. P. 135-140. 9. *Lo Z.-P., Yu Y., Bavarian B.* Analysis of the convergence properties of topology preserving neural networks // IEEE Trans on Neural Networks. 1993. 4. P. 207-220. 10. *Bodyanskiy Ye., Chaplanov O., Kolodyazhniy V., Otto P.* Adaptive quadratic radial basis function network for time series forecasting // Proc. East West Fuzzy Coll. Zittau – Goerlitz: HS, 2002. P. 164-172. 11. *Руденко О.Г., Бодянский Е.В.* Основы теории искусственных нейронных сетей. Харьков: ТЕЛТЕХ, 2002, 317 с. 12. *Cottrel M., Fort J.* A stochastic model of retinotopy: a self-organizing process // Biological Cybernetics. 1986. 53. P. 405-411. 13. *Ritter H., Schulten K.* On the stationary state of the Kohonen self-organizing sensory mapping // Biological Cybernetics. 1986. 54. P. 234-249. 14. *Ritter H., Schulten K.* Convergence properties of Kohonen's topology conserving maps: fluctuations, stability, and dimension selection // Biological Cybernetics. 1988. 60. P. 59-71. 15. *Grossberg S.* Classical and instrumental learning by neural networks / "Progress in Theoretical Biology". N.Y.: Academic Press, 1974. 3. P. 51-141. 16. *Martinetz M., Berkovich S., Schulten K.* "Neural gas" network for vector quantization and its application to time series prediction // IEEE Trans. on Neural Networks. 1993. 4. P. 558-569. 17. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.

Поступила в редколлегию 1.07.2003

УДК 519.7:007.52

Е.В. БОДЯНСКИЙ, Е.А. ВИНОКУРОВА

**АДАПТИВНЫЙ ВЭЙВЛЕТ-НЕЙРОННЫЙ ПРЕДИКТОР**

В работе предложен новый оптимальный по быстродействию алгоритм обучения вэйвлет-нейрона, отличающийся тем, что он обеспечивает настройку в реальном времени не только синаптических весов, но и параметров растяжения и сдвига дочерних вэйвлетов. Алгоритм обладает как следящими, так и сглаживающими свойствами, что позволяет эффективно использовать вэйвлет-нейроны как самостоятельно, так и в составе искусственных нейронных сетей для решения задач прогнозирования, фильтрации, компрессии и классификации нестационарных зашумленных сигналов произвольной природы.

**Введение.**

В последние годы для решения широкого класса задач, связанных с обработкой сигналов различной природы широкое распространение получили искусственные нейронные сети, обеспечивающие высокое качество аппроксимации, прогнозирования, фильтрации и т.п. существенно нелинейных процессов в условиях априорной и текущей неопределенности. Параллельно с нейронными сетями развивался аппарат вэйвлетов (всплесков), являющихся весьма эффективным средством локального представления сигналов как во временной, так и в частотной областях [1-3]. На стыке этих двух концепций возникли новые конструкции, получившие название вэйвлет-нейронные сети и сочетающие в себе гибкость и обучаемость нейронных сетей и возможности компактного описания сигналов, присущие вэйвлетам [4-9]. Интересно отметить, что подобно радиально-базисным нейронным сетям, вэйвлет-нейронные сети реализуют идею полиномиальной ядерной аппроксимации [10] и также, как и радиально-базисные нейронные сети [11] являются универсальными аппроксиматорами [12-14].

Необходимость обработки информации в реальном времени привела к появлению адаптивных вэйвлет-нейронных сетей [15-20], эффективность которых, определяется скоростью сходимости используемых алгоритмов обучения, в качестве которых, как правило, используются градиентные процедуры с подбираемыми эмпирически параметрами шага. Естественно, что низкая скорость обычных градиентных алгоритмов и архитектурная громоздкость большинства вэйвлет-нейронных сетей могут вызывать определенные трудности при обработке быстротекущих процессов.

**1. Вэйвлет-нейрон и алгоритм его обучения.**

Введем в рассмотрение структуру вэйвлет-нейрона, приведенную на рис. 1. Как видно, вэйвлет-нейрон достаточно близок по конструкции к стандартному  $n$ -входовому формальному нейрону, однако вместо обычных настраиваемых синаптических весов содержит вэйвлет-синапсы  $WS_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , обучаемыми параметрами которых являются не только веса  $w_{ji}$ , но и факторы растяжения и сдвига дочерних вэйвлетов  $\varphi_{ji}(x_i(k))$ .

При подаче на вход вэйвлет-нейрона векторного сигнала

$$x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T,$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$  - текущее дискретное время.

на его выходе появляется скалярное значение

$$y(k) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i(k)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{h_i} w_{ji}(k) \varphi_{ji}(x_i(k)),$$

определяемое как настраиваемыми весами  $w_{ji}(k)$ , так и используемыми вэйлет-функциями.

Для использования в составе нейросетей в качестве материнских вэйлетов (mother wavelets) весьма привлекательным представляется семейство полиномиальных оконных функций POLYWOG-wavelets [19] (Polynomials WindOwed with Gaussian types of functions wavelets - POLYWOG-wavelets), простейшей из которых является

$$\varphi_{ji}(x_i(k)) = \sqrt{e} x_i(k) \exp\left(-\frac{x_i^2(k)}{2}\right) \quad (1)$$

Среди прочих POLYWOG-вэйлетов следует отметить также весьма популярную в теории искусственных нейронных сетей функцию «Мексиканская шляпа» («Mexican Hat»), имеющую вид

$$\varphi_{ji}(x_i(k)) = (1 - x_i^2(k)) \exp\left(-\frac{x_i^2(k)}{2}\right)$$

Основной особенностью POLYWOG-функций является то, что все их производные также являются вэйлетами, что, как будет показано ниже, позволяет синтезировать достаточно компактные алгоритмы обучения всех параметров вэйлет-нейрона.

Дочерним вэйлетом функции (1) является

$$\varphi_{ji}(x_i(k)) = \sqrt{e} \tau_{ji}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = t_{ji}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right),$$

где  $\tau_{ji}(k) = \frac{x_i(k) - c_{ji}(k)}{\sigma_{ji}(k)}$ ;

$c_{ji}(k), \sigma_{ji}(k)$  - параметры, определяющие положение центра (сдвига) и ширину (растяжение).

Записав производные

$$\frac{\partial \varphi_{ji}(x_i(k))}{\partial c_{ji}} = \sqrt{e} \sigma_{ji}^{-1}(k) (\tau_{ji}^2(k) - 1) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = t_{ji}^c(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right),$$

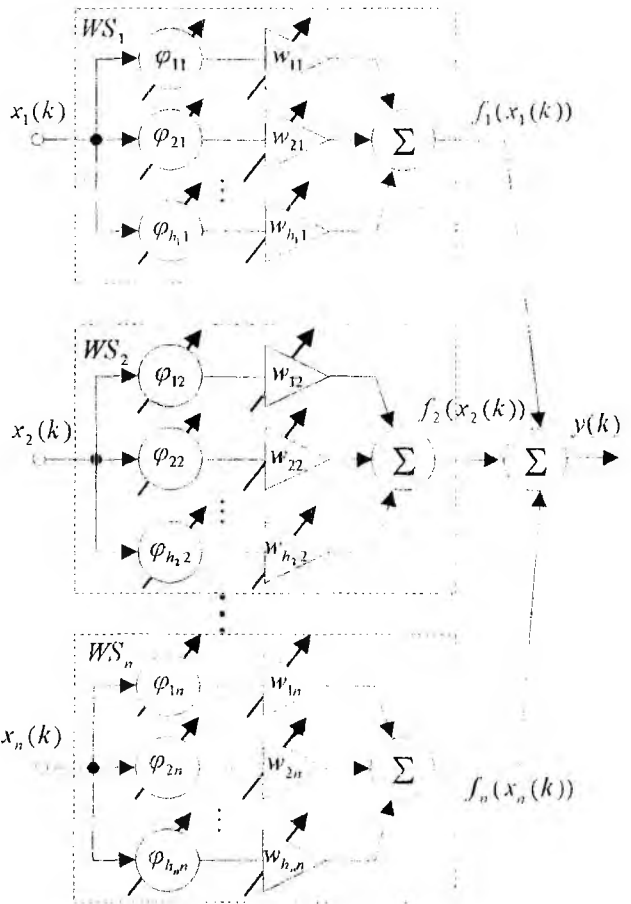


Рис. 1 – Вэйлет-нейрон

$$\frac{\partial \varphi_{ji}(x_i(k))}{\partial \sigma_{ji}^{-1}} = -\sqrt{e}(x_i(k) - c_{ji}(k))(\tau_{ji}^2(k) - 1) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = t_{ji}^{\sigma}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right),$$

можно заметить, что они также являются вэйвлетами, приведенными на рис. 2.

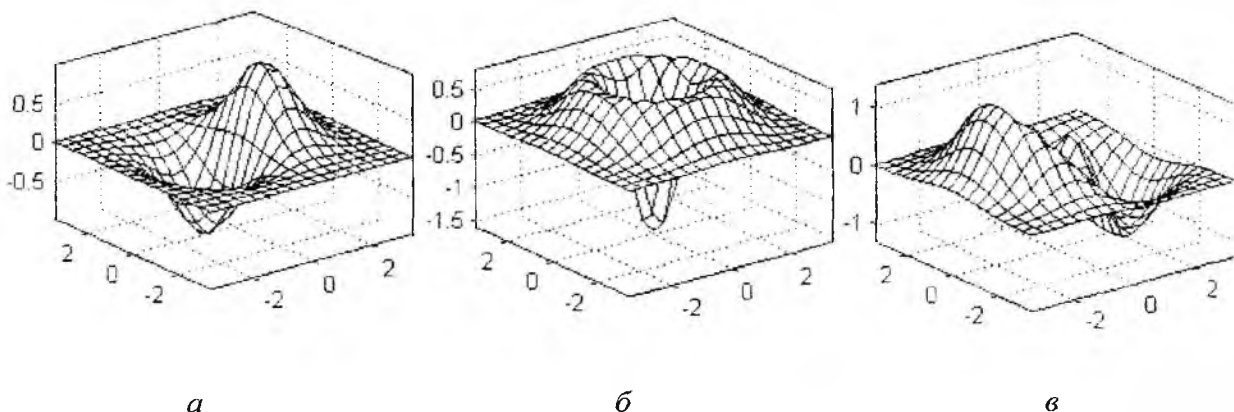


Рис. 2 – POLYWOG-вэйвлет и его производные:  
 а) POLYWOG-вэйвлет,  
 б) производная по сдвигам,  
 в) производная по растяжениям.

В качестве критерия обучения вэйвлет-нейрона будем использовать традиционную квадратичную функцию ошибки

$$E(k) = \frac{1}{2}(d(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e^2(k) = \frac{1}{2}\left(d(k) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{h_i} w_{ji} \varphi_{ji}(x_i(k))\right)^2, \quad (2)$$

где  $d(k)$  - внешний обучающий сигнал), производные которой по настраиваемым параметрам имеют вид

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_{ji}} = -e(k) \varphi_{ji}(x_i(k)) = -e(k) \sqrt{e} \tau_{ji}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = -e(k) t_{ji}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial c_{ji}} &= -e(k) w_{ji}(k) \frac{\partial \varphi_{ji}(x_i(k))}{\partial c_{ji}} = -e(k) w_{ji}(k) \sqrt{e} \sigma_{ji}^{-1}(k) (\tau_{ji}^2(k) - 1) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = \\ &= -e(k) w_{ji}(k) t_{ji}^c(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial \sigma_{ji}^{-1}} &= -e(k) w_{ji}(k) \frac{\partial \varphi_{ji}(x_i(k))}{\partial \sigma_{ji}^{-1}} = e(k) w_{ji}(k) \sqrt{e} (x_i(k) - c_{ji}(k)) (\tau_{ji}^2(k) - 1) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right) = \\ &= -e(k) w_{ji}(k) t_{ji}^{\sigma}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right). \end{aligned}$$

Далее, применяя для минимизации (2) градиентную процедуру, можно записать алгоритм обучения взвешенно-нейрона в виде

$$\begin{cases} w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta^w(k)e(k)t_{ji}(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right), \\ c_{ji}(k+1) = c_{ji}(k) + \eta^c(k)e(k)w_{ji}(k)t_{ji}^c(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right), \\ \sigma_{ji}^{-1}(k+1) = \sigma_{ji}^{-1}(k) + \eta^\sigma(k)e(k)w_{ji}(k)t_{ji}^\sigma(k) \exp\left(-\frac{\tau_{ji}^2(k)}{2}\right), \end{cases} \quad (3)$$

где скалярные коэффициенты  $\eta^w(k), \eta^c(k), \eta^\sigma(k)$  определяют шаг смещения в пространстве настраиваемых параметров.

Вводя  $(h_i \times 1)$  - векторы переменных

$$\varphi_i(x_i(k)) = (\varphi_{1i}(x_i(k)), \varphi_{2i}(x_i(k)), \dots, \varphi_{h_i i}(x_i(k)))^T,$$

$$w_i(k) = (w_{1i}(k), w_{2i}(k), \dots, w_{h_i i}(k))^T,$$

$$c_i(k) = (c_{1i}(k), c_{2i}(k), \dots, c_{h_i i}(k))^T,$$

$$\sigma_i^{-1}(k) = (\sigma_{1i}^{-1}(k), \sigma_{2i}^{-1}(k), \dots, \sigma_{h_i i}^{-1}(k))^T \text{ и}$$

$$\tau_i(k) = (\tau_{1i}(k), \tau_{2i}(k), \dots, \tau_{h_i i}(k))^T,$$

можно получить также градиентный алгоритм обучения  $i$ -го взвешенно-синапса:

$$\begin{cases} w_i(k+1) = w_i(k) + \eta^w(k)e(k)\varphi_i(x_i(k)), \\ c_i(k+1) = c_i(k) + \eta^c(k)e(k)w_i(k)\sqrt{e} \odot \sigma_i^{-1}(k) \odot (\tau_i^2(k) - E) \odot \exp\left(-\frac{\tau_i^2(k)}{2}\right), \\ \sigma_i^{-1}(k+1) = \sigma_i^{-1}(k) + \eta^\sigma(k)e(k)w_i(k)\sqrt{e} \odot (x_i(k) - c_i(k)) \odot (\tau_i^2(k) - E) \odot \exp\left(-\frac{\tau_i^2(k)}{2}\right), \end{cases}$$

где  $\tau_i^2(k) = \sigma_i^{-1}(k) \odot \sigma_i^{-1}(k) \odot (x_i(k) - c_i(k)) \odot (x_i(k) - c_i(k))$ ;

$\odot$  - символ прямого (скоттова) произведения;

$E$  -  $(h_i \times 1)$  - вектор, состоящий из единиц.

Повысить скорость сходимости процессов обучения можно, переходя от градиентных процедур к алгоритмам второго порядка, среди которых для настройки нейронных сетей наибольшее распространение получил алгоритм Левенберга-Маркварта [21].

Обозначив

$$\begin{cases} \varphi_i^c(x_i(k)) = w_i(k)\sqrt{e} \odot \sigma_i^{-1}(k) \odot (\tau_i^2(k) - E) \odot \exp\left(-\frac{\tau_i^2(k)}{2}\right), \\ \varphi_i^\sigma(x_i(k)) = w_i(k)\sqrt{e} \odot (x_i(k) - c_i(k)) \odot (\tau_i^2(k) - E) \odot \exp\left(-\frac{\tau_i^2(k)}{2}\right), \end{cases}$$

можно записать процедуру обучения вэйвлет-синапса на основе алгоритма Левенберга-Маркварта в виде

$$\begin{cases} w_i(k+1) = w_i(k) + (\varphi_i(x_i(k))\varphi_i^T(x_i(k)) + \alpha^w I_i)^{-1} e(k)\varphi_i(x_i(k)), \\ c_i(k+1) = c_i(k) + (\varphi_i^c(x_i(k))\varphi_i^{cT}(x_i(k)) + \alpha^c I_i)^{-1} e(k)\varphi_i^c(x_i(k)), \\ \sigma_i^{-1}(k+1) = \sigma_i^{-1}(k) + (\varphi_i^\sigma(x_i(k))\varphi_i^{\sigma T}(x_i(k)) + \alpha^\sigma I_i)^{-1} e(k)\varphi_i^\sigma(x_i(k)), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha^w, \alpha^c, \alpha^\sigma$  - малые положительные регуляризующие добавки;

$I_i - (h_i \times h_i)$  - единичная матрица.

Воспользовавшись леммой об обращении суммы двух матриц и проводя последовательность очевидных преобразований [22, 23], алгоритм (4) можно переписать в следующей достаточно простой форме, не требующей обращения матриц, что делает ее весьма удобной для работы в реальном времени:

$$\begin{cases} w_i(k+1) = w_i(k) + \frac{e(k)\varphi_i(x_i(k))}{\alpha^w + \|\varphi_i(x_i(k))\|^2} = w_i(k) + \frac{e(k)\varphi_i(x_i(k))}{\alpha^w(k)}, \\ c_i(k+1) = c_i(k) + \frac{e(k)\varphi_i^c(x_i(k))}{\alpha^c + \|\varphi_i^c(x_i(k))\|^2} = c_i(k) + \frac{e(k)\varphi_i^c(x_i(k))}{\alpha^c(k)}, \\ \sigma_i^{-1}(k+1) = \sigma_i^{-1}(k) + \frac{e(k)\varphi_i^\sigma(x_i(k))}{\alpha^\sigma + \|\varphi_i^\sigma(x_i(k))\|^2} = \sigma_i^{-1}(k) + \frac{e(k)\varphi_i^\sigma(x_i(k))}{\alpha^\sigma(k)}. \end{cases} \quad (5)$$

С целью придания алгоритму (5) сглаживающих свойств, можно ввести его экспоненциально-взвешенную модификацию, при этом

$$\begin{cases} \alpha_i^w(k+1) = \alpha \alpha_i^w(k) + \|\varphi_i(x_i(k))\|^2, \\ \alpha_i^c(k+1) = \alpha \alpha_i^c(k) + \|\varphi_i^c(x_i(k))\|^2, \\ \alpha_i^\sigma(k+1) = \alpha \alpha_i^\sigma(k) + \|\varphi_i^\sigma(x_i(k))\|^2, \\ 0 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

здесь  $\alpha$  - параметр забывания.

Несложно видеть, что при  $\alpha = 1$  процедура (5), (6) приобретает свойства стохастической аппроксимации адаптивного алгоритма идентификации Гудвина-Рэмеджа-Кэйнеса [24], а при  $\alpha = 0$  имеет форму популярного в теории искусственных нейронных сетей алгоритма Уидроу-Хоффа.

Как видно, использование модифицированных алгоритмов обучения второго порядка практически не усложняет численную реализацию процедур настройки вэйвлет-синапсов, обеспечивая при этом повышение их скорости сходимости.

### 3. Результаты численного эксперимента.

Эффективность предлагаемого алгоритма исследовалась в процессе решения задачи адаптивного прогнозирования хаотического сигнала Мандельброта [25]

$$x(k+1) = 4(1-x(k))x(k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

с помощью обучаемого вэйвлет-предиктора, схема которого приведена на рис. 3.

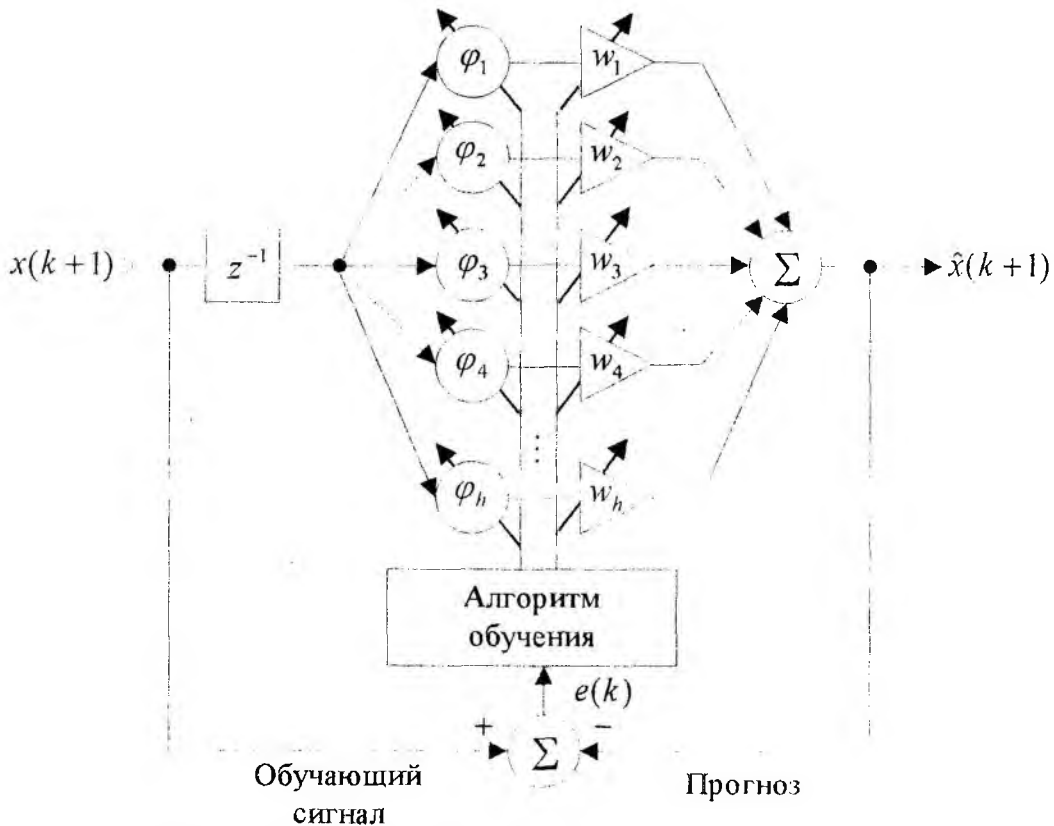


Рис. 3. Адаптивный вэйвлет-предиктор реального времени

В качестве начального условия было принято  $x(1) = 0.2$ , объем обучающей выборки  $x(k)$  составил 1500 точек. Базисные функции были созданы с помощью процедуры кластеризации, которая обнаружила 10 кластеров, параметры которых были использованы для инициализации 10 нейронов ( $h = 10$ ). Начальные веса выходного слоя были приняты нулевыми.

Настройка одноходового вэйвлет-нейрона производилась с помощью градиентного алгоритма (3) с постоянными параметрами шага  $\eta^w = 0.5$ ,  $\eta^c = 0.5$ ,  $\eta^\sigma = 10$  (эти коэффициенты могут выбираться эвристическим методом проб и ошибок и зависят от многих факторов, таких как размер сети, дисперсия входов и т.д.) и предложенной процедуры (5), (6) с коэффициентами забывания  $a^w = \alpha^c = \alpha^\sigma = 0.99$ .

На рис. 4 а приведены графики реального процесса (7) (пунктирная линия), прогноза на основе алгоритма (3) (сплошная линия) и график ошибки прогноза, а на рис. 4 б приве-

дено изменение среднеквадратичной ошибки (RMSE) при прогнозировании алгоритмом (3), которая составила  $RMSE = 0.012512$ .

Аналогично на рис. 5 а приведены графики реального процесса (7) (пунктирная линия), прогноза на основе алгоритма (5), (6) (сплошная линия) и ошибки прогноза, а на рис. 5 б приведено изменение среднеквадратичной ошибки при прогнозировании с помощью алгоритма (5), (6), которая составила  $RMSE = 0.009592$ .

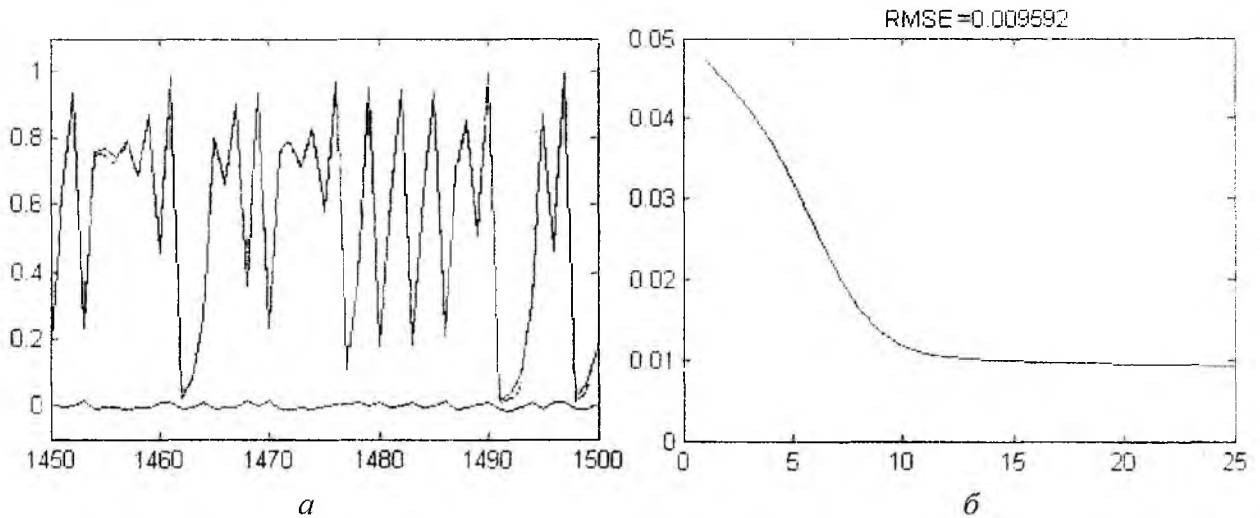


Рис. 4. Прогнозирование хаотического процесса на основе алгоритма (3)

- а) Реальный процесс и прогноз;
- б) Изменение среднеквадратичной ошибки

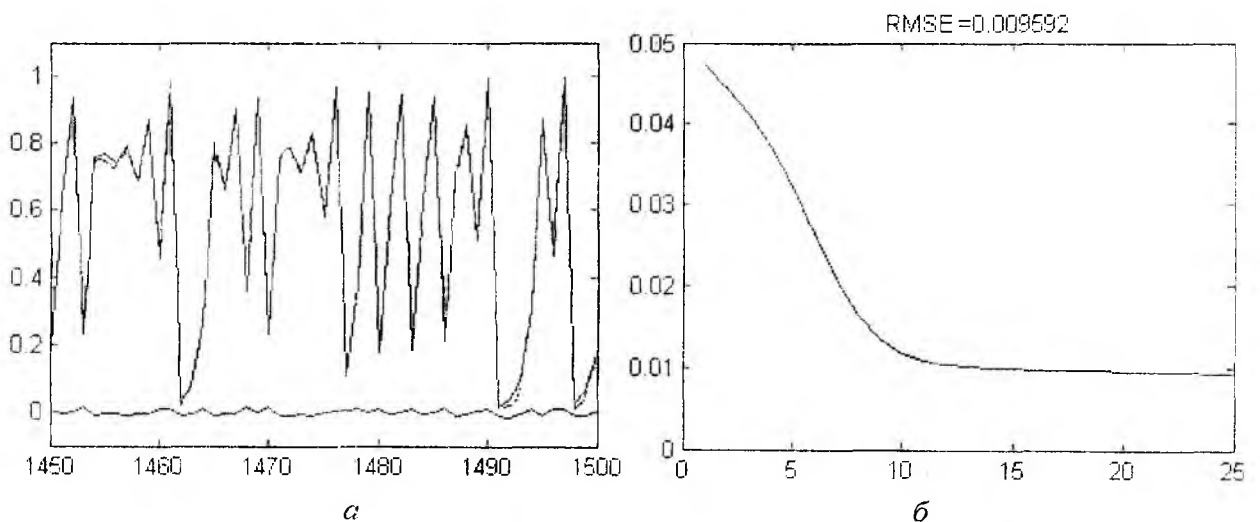


Рис. 5 – Прогнозирование хаотического процесса на основе алгоритма (5), (6)

- а) Реальный процесс и прогноз;
- б) Изменение среднеквадратичной ошибки

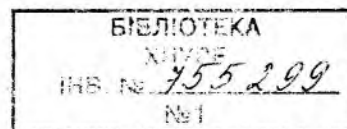
Видно, что оба алгоритма обеспечивают примерно одинаковую точность прогнозирования, однако предлагаемая процедура обеспечивает более высокую скорость сходимости, что иллюстрируется рис. 4, б и рис. 5, б.

**Выводы.**

Предложен новый оптимальный по быстродействию алгоритм обучения вэйвлет-нейрона, позволяющий настраивать все его параметры и обладающий как следящими, так и фильтрующими свойствами. Алгоритм прост в реализации и обеспечивает высокое качество обработки сигналов, что подтверждено результатами экспериментов. Возможность работы в реальном времени расширяет функциональные свойства вэйвлет-нейронных сетей.

**Список литературы:** 1. *Mallat S. G.* A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation // *IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell.* 1989. 11. P. 674-693. 2. *Daubechies I.* The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis // *IEEE Trans. on Information Theory.* 1990. 36. P. 961-1005. 3. *Rioul O., Vetterli M.* Wavelets and signal processing // *IEEE Signal Processing Mag.* 1991. 8. № 4. P. 14-38. 4. *Zhang Q., Benveniste A.* Wavelet networks // *IEEE Trans. on Neural Networks.* 1992. 3. P. 889-898. 5. *Casarent D. P., Smokelin J. S.* Neural net design of macro Gabor wavelet filters for distortion-invariant object detection in clutter // *Optical Engineering.* 1994. 33. - № 7. P. 2264-2270. 6. *Chang P.-R., Yeh B.-F.* Nonlinear communication channel equalization using wavelet neural networks // *IEEE Tran. on Neural Networks.* 1995. 6. P. 923-934. 7. *Aussem A., Murtagh F.* Combining neural networks forecasts on wavelet transformed time series // *Connection Sci.* 1997. 9. P. 113-121. 8. *Aussem A., Campbell J., Murtagh F.* Wavelet-based feature extraction and decomposition strategies for financial forecasting // *J. Comput. Intell. Finance.* 1998. March. P. 5-12. 9. *Zhang B. L., Coggins R., Jabri M. A., Dersch D., Flower B.* Multiresolution forecasting for futures trading using wavelet decomposition // *IEEE Trans. on Neural Networks.* 2001. 12. P. 765-774. 10. *Дзядык В. К.* Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. М.: Наука, 1977. 512 с. 11. *Park J., Sandberg I. W.* Universal approximation using radial-basis-function networks // *Neural Computation.* 1991. 3. P. 246-257. 12. *Kobayashi K., Torioka T.* A wavelet neural network for function approximation and network optimization / Eds. C. H. Dagli, B. R. Fernandez, J. Ghosh, R. T. S. Kumara "Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks". 1994. 4. P. 505-510. 13. *Marar J. F., Filho E. C. B. C., Vasconcelos G. C.* Function approximation by polynomial wavelet generated from powers of sigmoids/ Ed. H. H. Szu "Wavelet Applications III" Proc SPIE Int. Soc. Optical Engineering. 1996. 2762. P. 365-374. 14. *Jiao L., Pan J., Fang Ya.* Multiwavelet neural network and its approximation properties // *IEEE Trans. on Neural Networks.* 2001. 12. P. 1060-1066. 15. *Resnikoff H. L.* Wavelets and adaptive signal processing / Ed. S. Haykin "Adaptive Signal Processing." Proc. SPIE-Int. Soc. Optical Engineering. 1991. 155. P. 370-382. 16. *Szu H. H., Telfer B. A., Kadambe S.* Neural network adaptive wavelets for signal representatin and classification // *Optical Engineering.* 1992. 31. № 9. P. 1907-1916. 17. *Kadambe S., Srinivasan P.* Applications of adaptive wavelets for speech // *Optical Engineering* 1994. 33. P. 2204-2211. 18. *Jouny I., Kanapathipillai M.* Neural network adaptive wavelet classification of radar targets // Proc. 1994 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. 1994. 4. P. 1889-1891. 19. *Lekutai G., van Landingham H. F.* Self-tuning control of nonlinear systems using neural network adaptive frame wavelets // Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. - Piscataway, N.J. 1997. 2. P. 1017-1022. 20. *Бодянский Е. В., Винокурова Е. А., Плисс И. П.* Алгоритм обучения искусственной всплеск-нейронной сети // Сб. науч. тр. 1-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2002. Часть 2. Харьков АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. С. 87-89. 21. *Shepherd A. J.* Second-Order Methods for Neural Networks. London: Springer-Verlag, 1997. 145 p. 22. *Бодянский Е. В., Михальев О. И., Плисс И. П.* Адаптивне виявлення розладнань в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж. Дніпропетровськ: Системні технології, 2000. 140 с. 23. *Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A.* An adaptive learning algorithm for a neuro-fuzzy network / Ed. by B. Reusch "Computational Intelligence. Theory and Applications." Berlin Heidelberg New York: Springer, 2001. P. 68-75. 24. *Goodwin G. C., Ramadge P. J., Caines P. E.* A globally convergent adaptive predictor // *Automatica.* 1981. 17. № 1 P. 135-140. 25. *Mandelbrot B. B.* Die fractale Geometrie der Natur. Basel: Birkhaeuser Verlag, 1991. 491 s.

Поступила в редколлегию 11.10.2003



УДК 681.5

А. Д. ПОЛОНСКИЙ

## ОБУЧЕНИЕ КЛАССИФИКАТОРОВ НЕЙРОПОДОБНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### Введение.

В основу синтеза нейроподобных сетей (НПС) положена детекторная теория [1]. В рамках этой теории НПС рассматриваются как классификаторы, построенные на аналоговых логических элементах (АЛЭ) – электрические модели нейронов. Каждый АЛЭ воспроизводит на рабочем участке амплитудной характеристики (аналог функции активации) скалярное произведение вектора весовых коэффициентов (аналог синаптических связей) и вектора наблюдений (аналог возбуждающих воздействий).

Величины весовых коэффициентов определяют специализацию НПС. Поэтому задача синтеза НПС состоит в нахождении значений весовых коэффициентов, обеспечивающих требуемое поведение классификатора. В основу решения этой задачи положены методы обучения НПС. На практике, когда наблюдениями являются случайные аналоговые сигналы, остается актуальной проблема обучения НПС в условиях неопределенности. Суть этой проблемы состоит в том, что полного объема априорных сведений о распределениях наблюдений, требуемого классической теорией искусственных нейронных сетей [3], как правило, нет. В связи с этим возникает задача синтеза таких классификаторов, которые обладают свойством инвариантности к распределениям случайных аналоговых сигналов.

В настоящей работе для синтеза инвариантных классификаторов предложен метод обучения распознавания отношений (ОРО) и элементный (электрический) базис, которые полностью адекватны детекторной теории НПС. Приведены результаты, подтверждающие эффективность применения метода ОРО.

### 1. Метод ОРО.

В основе детекторной теории НПС лежит принцип пространственного кодирования параметра (возбуждающего воздействия) номером канала (местом возникновения возбуждения на множестве нервных клеток головного мозга) [2].

Далее будем рассматривать классификаторы с кодированием номером канала как идентифицирующие системы вида

$$\begin{cases} z_1 = y_1; z_k = 0 \forall k \neq 1 | U \in R_1 \notin Y; \\ z_2 = y_2; z_k = 0 \forall k \neq 2 | U \in R_2 \notin Y; \\ \vdots \\ z_m = y_m; z_k = 0 \forall k \neq m | U \in R_m \notin Y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $z_i, i = \overline{1, m}$ , есть  $m$ -местные ( $n$ -арные) функции, заданные на множестве идентифицирующих переменных  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  (возбуждающих воздействий) со значениями в двухэлементном множестве  $\{0, y_i \in Y\}$

$Y = \{y_1, \dots, y_m\}$  – множество идентифицируемых переменных;

$R_i \in U^n$  – заданное на множестве  $U$  отношение, для которого  $z_i = y_i, z_k = 0 \forall k \neq i$ ;

$U^n$  –  $n$ -я декартова степень множества  $U$ . В дальнейшем изложении под идентифицирующими переменными понимаются случайные аналоговые сигналы с произвольными распределениями мгновенных значений напряжений.

Выражения (1) при  $R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_m = U^n$  определяют класс алгоритмов идентификации одной  $y_i$  из  $m$  переменных  $y_1, \dots, y_m$  по признаку, заданному отношением

$$R_i = \{u_{i_1} \text{ или } u_{i_2} \text{ или } \dots \text{ или } u_{i_{n-1}} \text{ или } u_{i_n}\} \in \{R_1, \dots, R_m\}. \quad (2)$$

Здесь  $u_{i_p}$  или  $u_{i_q}$  есть либо  $u_{i_p} > u_{i_q}$ , либо  $u_{i_p} < u_{i_q}$ ;  $\{i_1, \dots, i_n\}$  –  $i$ -я перестановка целых чисел от 1 до  $n$ .

Функции (1) представим в виде скалярных произведений одномерных векторов:

$$z_i = a_i y_i; \quad a_i = \begin{cases} 0 & \{u_{i_1}, \dots, u_{i_n}\} \notin R_i; \\ 1 & \{u_{i_1}, \dots, u_{i_n}\} \in R_i; \end{cases} \quad i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты, подлежащие определению.

Предположим, что при заданных отношениях (2) алгоритм определения весовых коэффициентов заранее не ограничивается, а рассматривается задача синтеза преобразования вида (3), инвариантного к распределению идентифицирующих переменных.

**Утверждение 1.** Свойством инвариантности обладают преобразования вида

$$\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = \begin{cases} 0 & (u_{i_p} - u_{i_q}) < 0; \\ 1 & (u_{i_p} - u_{i_q}) \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

**Доказательство.** События  $\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 0\}$ ,  $\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 1\}$  являются случайными и составляют полную группу

$$P\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 0\} = 1 - P\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 1\} = 1 - \int_0^1 F(u) dF(u) = 0,5. \quad (5)$$

Здесь  $P\{x\}$  есть вероятность события  $x$ ;  $F(u)$  – одномерная интегральная функция распределения (ИФР) идентифицирующих переменных.

Из (5) следует, что появление событий  $\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 0\}$ ,  $\{\pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = 1\}$  равновероятно независимо от конкретного закона распределения идентифицирующих переменных. Это позволяет утверждать что преобразования (4) обладают свойством инвариантности.

Пусть весовые коэффициенты в (3) заданы на множестве инвариантных преобразований (4) следующим образом:

$$a_i = \prod_{p=1}^n \prod_{q=p+1}^{n-1} \tilde{\pi}(u_{i_p} - u_{i_q}), \quad i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\tilde{\pi}(v) = \begin{cases} 1 - \pi(v) & | v < 0; \\ \pi(v) & | v > 0. \end{cases}$$

**Утверждение 2.** Преобразования вида (6) обладают свойством инвариантности к распределению идентифицирующих переменных.

Доказательство. Пусть  $V = \{v = (v_1, \dots, v_m)^T\}$  – пространство всех векторов  $v$  таких, что  $v_i = 0 \vee 1 \forall i = \overline{1, m}$ . Очевидно, пространство  $V$  содержит  $2^m$  точек. Тогда, исходя из (5), имеем

$$P\{a_i = v_i, i = \overline{1, m}\} = \prod_{i=1}^m P\left\{\prod_{p=1}^n \prod_{q=p+1}^{n-1} \pi(u_{i_p} - u_{i_q}) = v_i\right\} = \left[\int_0^1 F(v_i) dF(v_i)\right]^m = 0,5^m.$$

Отсюда следует, что совместное распределение весовых коэффициентов является равномерным независимо от вида ИФР идентифицирующих переменных. В этом проявляется свойство инвариантности преобразований (6).

Каждая перестановка идентифицирующих переменных в (6) порождает соответствующий вектор инвариантных весовых коэффициентов (ВИВК). При этом для всех простых ВИВК каждая компонента  $a_i$  является минтермом (произведением) нескольких инвариантных преобразований (4). В сложных ВИВК часть или все компоненты являются суммой нескольких минтермов. Множество всех ВИВК образует класс алгоритмов ОРО.

### 2. Элементный базис.

Алгоритмам ОРО можно поставить в соответствие топологические модели – сигнальные графы. Для таких моделей инвариантные преобразования (4) есть передачи соответствующих ветвей графа. В частности, при  $n=2$  и  $m>n$  в (3) получается сигнальный граф вида

$$\begin{aligned} y_i &\circ \xrightarrow{\pi_{12}} \circ z_i, i = \overline{1, m}; \\ y_j &\circ \xrightarrow{\bar{\pi}_{12}} \circ z_j, j = \overline{1, m}, \end{aligned} \tag{7}$$

где  $\pi_{12} = \pi(u_1 - u_2)$ ;  $\bar{\pi}_{12} = \pi(u_2 - u_1)$  есть инвариантные преобразования вида (4).

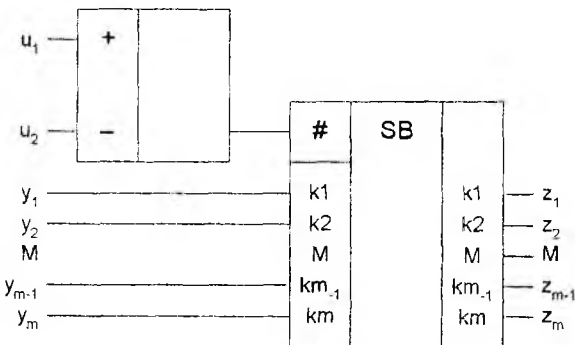


Рис. 1

Сигнальному графу вида (7) соответствует функциональная схема АЛЭ, которая содержит (рис. 1) последовательно соединенные компаратор СА и коммутатор СВ. Принцип действия схемы АЛЭ основан на управлении состоянием группы каналов ( $ki \rightarrow ki, i = \overline{1, m}$ ) коммутатора и заключается в следующем. Пусть сигналы на неинвертирующем (+) и инвертирующем (-) компараторных входах схемы АЛЭ связаны отношением  $R_1 = \{u_1 > u_2\}$ .

В этой ситуации на управляющем входе # коммутатора напряжение соответствует уровню логической единицы. Каналы ( $k_p \rightarrow k_p, p = 1, 3, \dots, m-1$ ) и ( $k_q \rightarrow k_q, q = 2, 4, \dots, m$ ) коммутатора переводятся соответственно в состояние низкого и высокого выходного сопротивления. При этом выходные напряжения схемы АЛЭ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} z_p &= \pi(u_1 - u_2)y_p = \pi_{12}y_p = y_p, p = 1, 3, \dots, m-1; \\ z_q &= \pi(u_2 - u_1)y_q = \bar{\pi}_{12}y_q = 0, q = 2, 4, \dots, m \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

где  $y_p$  и  $y_q$  есть сигналы, поданные на переключательные входы  $k_p$  и  $k_q$  схемы АЛЭ.

Если имеет место отношение  $R_2 = \{u_1 < u_2\}$ , то выходные напряжения схемы АЛЭ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} z_p &= \pi(u_1 - u_2)y_p = \pi_{12}y_p = 0, \quad p = 1, 3, K, m - 1; \\ z_q &= \pi(u_2 - u_1)y_q = \bar{\pi}_{12}y_q = y_q, \quad q = 2, 4, K, m. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Инвариантные преобразования (8) и (9) описывают алгоритм классификации отношений  $R_r \in \{R_1 = \{u_1 > u_2\}, R_2 = \{u_1 < u_2\}\}$ , которым соответствуют идентифицируемые переменные  $u_i = u_i^{(r)} \in \{u_1, u_2\}$  ранга  $r \in \{1, 2\}$ . Классификация осуществляется по двум информационным признакам: по номеру возбужденного канала ( $z_i \neq 0$ ) и по уровню идентифицируемых переменных  $y_i$ . При этом осуществляется кодирование ранга идентифицирующей переменной значением идентифицируемой переменной, что адекватно детекторной теории НПС. Схема по рис. 1, которая осуществляет кодирование ранга идентифицирующей переменной значением идентифицируемой переменной, называется рангер. На рис. 2 показано условное графическое обозначение схемы рангера.

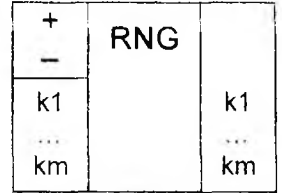


Рис. 2

Рангом идентифицирующей переменной  $u_i$  называется ее порядковый номер  $r_i$  в статистическом (вариационном) ряду  $u^{(1)} < K < u^{(r_i)} < K < u^{(n)}$ . Здесь  $u^{(r)}$  есть  $r$ -й по величине элемент множества идентифицирующих переменных. Формально процедуру вычисления ранга можно представить в виде

$$r_i = \sum_{j=1}^n \pi(u_i - u_j), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Совокупность рангов всех идентифицирующих переменных образуют некоторую перестановку целых чисел от 1 до  $n$ . Все такие перестановки, согласно (5), равновероятны независимо от вида распределения идентифицирующих переменных. Это позволяет утверждать, что преобразования (10) обладают свойством инвариантности к распределениям идентифицирующих переменных. Между инвариантными преобразованиями (6) и (10) существует функциональная связь: все ВВК являются кодами рангов идентифицирующих переменных. Таким образом, наличие элементного базиса рангеров, адекватного методу ОРО, позволяет синтезировать электрические схемы инвариантных классификаторов.

### 3. Синтез классификатора последетекторных сигналов.

Для исследования эффективности применения метода ОРО рассмотрим задачу классификации последетекторных случайных аналоговых сигналов  $s_k, k = \overline{0, 1}$ . Исходной информацией для решения рассматриваемой задачи являются выборки мгновенных значений напряжений сигналов

$$U = \{u(i) = u(i\tau), i = \overline{1, n}\}.$$

Здесь  $i$  – есть номер реализации;

$\tau$  – интервал квантования по времени, удовлетворяющий теореме Котельникова [4].

Мгновенные значения напряжений сигналов распределены по закону



$$\mathbf{a}^T \mathbf{u} = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n \pi[u(i) - u(j)] u_i = u^{(n)}. \quad (16)$$

Здесь  $u^{(n)}$  есть  $n$ -я порядковая статистика (максимальный по величине элемент) выборки  $\{u(1), \dots, u(n)\}$ .

**Утверждение 3.** Преобразование (16) обладает свойством инвариантности к распределению выборки.

*Доказательство.* Одномерные условные распределения случайной величины  $u^{(n)}$  определяются выражениями

$$F(u^{(n)}|H_k) = \prod_{i=1}^n F_i(u|s_k); \quad W(u^{(n)}|H_k) = \frac{dF(u^{(n)}|H_k)}{du^{(n)}} = \frac{d}{du} \prod_{i=1}^n F_i(u|s_k), \quad k = \overline{0, 1},$$

где  $F_i(u|s_k)$  – одномерные ИФР для  $i$ -х элементов выборок мгновенных значений напряжений сигналов  $s_k$ ,  $k = \overline{0, 1}$ .

Из (12) следует, что элементы наблюдаемой выборки распределены одинаково:  $F_i(u|s_k) = F(u(i)|s_k) \quad \forall i = \overline{1, n}$ , поэтому

$$F(u^{(n)}|H_k) = [F(u|s_k)]^n; \quad W(u^{(n)}|H_k) = n[F(u|s_k)]^{n-1} W(u|s_k), \quad k = \overline{0, 1}. \quad (17)$$

Отметим, что  $F(u(i)|s_k)$  есть случайная величина, для которой одномерная ПРВ определяется выражением

$$W[F(u(i)|s_k)] = \begin{cases} 0 & F(u(i)|s_k) \notin [0; 1] \\ 1 & F(u(i)|s_k) \in [0; 1] \end{cases}$$

Математическое ожидание условных одномерных ИФР  $n$ -х порядковых статистик выборок размера  $n$  независимых мгновенных значений напряжений сигналов  $s_k$ ,  $k = \overline{0, 1}$ , определяется выражением

$$\begin{aligned} M[F(u^{(n)}|H_k)] &= \sum_{i=1}^n M\left\{[F(u(i)|s_k)]^n\right\} = \\ &= \sum_{i=1}^n \int_0^1 [F(u(i)|s_k)]^n W[F(u(i)|s_k)] dF(u(i)|s_k) = \frac{n}{n+1}, \quad k = \overline{0, 1}. \end{aligned}$$

Инвариантность преобразования (16) проявляется в том, что статистические свойства случайной величины  $u^{(n)}$  характеризуются квантилем уровня  $n/(n+1)$  независимо от вида и параметров распределения выборки.

На множестве  $\{u^{(n)}, U_0\}$  зададим отношения (2) в виде

$$R_{n+1=m-1} = \{u^{(n)} < U_0\}; \quad R_{n+2=m} = \{u^{(n)} > U_0\}. \quad (18)$$

Выражению (18) соответствует алгоритм ОРО:

$$\alpha_{m-1} = \pi[U_0 - u^{(n)}]; \alpha_m = \pi[u^{(n)} - U_0]. \quad (19)$$

Пусть в (1) идентифицируемые переменные отождествлены следующим образом:

$$y_i = 0, \quad i = 1, m-1, \quad y_m = E. \quad (20)$$

Здесь  $E$  – напряжение, соответствующее уровню логической единицы.

Подстановка (16), (19) и (20) в (3) приводит к инвариантному преобразованию

$$z = \pi \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n \pi[u(i) - u(j)] u(i) \right] - U_0 \right\} E. \quad (21)$$

На рис. 3 приведена схема классификатора, синтезированная по алгоритму (21) в элементном базисе  $n$  рангеров RNG. Выходные напряжения рангеров в схеме классификатора определяются выражениями

$$u^{(2)} = \pi[u(1) - u(2)]u(1) + \pi[u(2) - u(1)]u(2) = \max\{u(1), u(2)\};$$

$$u^{(3)} = \pi[u^{(2)} - u(3)]u^{(2)} + \pi[u(3) - u^{(2)}]u(3) = \max\{u^{(2)}, u(3)\};$$

М

$$u^{(n)} = \pi[u^{(n-1)} - u(n)]u^{(n-1)} + \pi[u(n) - u^{(n-1)}]u(n) = \max\{u^{(n-1)}, u(n)\};$$

$$z = \pi[u^{(n)} - U_0]E.$$

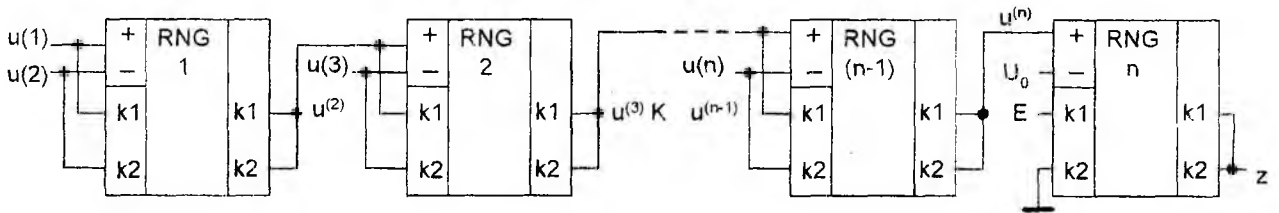


Рис. 3

Если напряжение  $z$  на выходе схемы классификатора равно нулевому потенциалу ( $\perp$ ), то принимается гипотеза  $H_0$ , а при  $z=E$  – гипотеза  $H_1$ . Таким образом классификатор реализует решающее правило (РП) вида

$$\begin{matrix} H_1 \\ u^{(n)} > U_0 \\ H_0 \end{matrix} \quad (22)$$

Вероятности ошибок первого и второго рода для РП (22) определяются выражениями

$$\alpha = P\{U_0 > u^{(n)} | H_1\} = \int_{-\infty}^{U_0} W(u^{(n)} | H_1) du^{(n)}; \quad (23)$$

$$\beta = P\{u^{(n)} > U_0 | H_0\} = \int_{U_0}^{\infty} W(u^{(n)} | H_0) du^{(n)}. \quad (24)$$

Учитывая (11) и (17), уравнения (23) и (24) имеют следующие решения:

$$\alpha = [1 - \exp(-1/y)]^n; \beta = [1 - \exp(-1)]^n - [1 - \exp(-1)]^n = 0.$$

Поскольку вероятность ошибки второго рода равна нулю, мощность РП (22) (вероятность правильной классификации сигналов) равна единице независимо от размера выборки, вида и параметров распределений мгновенных значений напряжений сигналов  $s_k, k = 0, 1$ . В этом проявляется свойство инвариантности РП (22).

В работе [4] для проверки рассматриваемых гипотез предложен алгоритм классификации, синтезированный по методу максимального правдоподобия (МП). Алгоритм МП является оптимальным в смысле критерия Неймана-Пирсона и представляет собой РП вида

$$\sum_{i=1}^n u_i \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_0 \chi_{1-\varepsilon}^2. \quad (25)$$

Здесь  $\chi_{1-\varepsilon}^2$  есть процентная точка хи-квадрат распределения с  $2n$  степенями свободы. Вероятности ошибок первого и второго рода для РП (25) определяются выражениями

$$\alpha = \Gamma(n, \chi_{1-\varepsilon}^2) / \Gamma(n); \quad (26)$$

$$\beta = 1 - \left[ \Gamma(n, y \chi_{1-\varepsilon}^2) / \Gamma(n) \right]. \quad (27)$$

Здесь  $\Gamma(n)$  и  $\Gamma(n, x)$  есть полная и неполная гамма-функция.

Для ряда значений  $\varepsilon, y$  и  $n$  результаты расчетов по формулам (23), (24), (26) и (27) приведены в таблице. Здесь  $n$  есть размеры выборок, при которых РП (22) позволяет различать рассматриваемые гипотезы с вероятностью ошибки первого рода  $\alpha < \varepsilon$ . Видно, что РП (22) является более мощным, чем РП (25).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что метод ОРО является эффективным и простым в реализации, чем метод МП. Этот вывод справедлив не только для распределений вида (11), но и при использовании других вероятностных моделей случайных сигналов. Такие модели могут быть получены из гауссовского распределения путем нелинейных безынерционных преобразований, амплитудные характеристики которых не нарушают отношений порядка между элементами выборок мгновенных значений напряжений случайных сигналов.

Таблица

$\varepsilon$	$y$	$n$	(23)	(24)	(26)	(27)
0,001	1,01	15	0,0009		0,1918	0,7981
	1,1	14	0,0007		0,1657	0,7398
	1,9	8	0,0008		0,0478	0,5261
0,005	1,01	12	0,0038		0,2903	0,6985
	1,1	11	0,0034	0	0,2526	0,6444
	1,9	6	0,0047		0,0916	0,4716
0,01	1,01	10	0,0096		0,3161	0,6733
	1,1	9	0,0096		0,2729	0,6321
	1,9	6	0,0047		0,1519	0,3289

### Заключение.

В отличие от теории искусственных нейронных сетей [3] предложенный метод ОРО базируется на множествах идентифицируемых  $Y$  и идентифицирующих  $U$  переменных. Элементы множеств  $Y$  и  $U$  являются соответственно носителями информации о структуре соединений и структуре управления в нейронных сетях. Такая отличительная особенность метода ОРО согласуется с коннекционистским подходом [5] к моделированию нейронных сетей. Достоинством метода ОРО является существенное расширение функциональных возможностей адаптивного статистического подхода [4] к синтезу инвариантных классификаторов в условиях неопределенности.

**Список литературы:** 1. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М.: Наука, 1970. 264 с. 2. Соколов Е. Н., Вайткявичус Г. Г. Нейроинтеллект: от нейрона к нейрокомпьютеру. М.: Наука, 1989. 238 с. 3. Руденко О. Г., Бодянский Е. В. Основы теории искусственных нейронных сетей. Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2002. 317 с. 4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1968. 504 с. 5. Галушкин А. И. Нейронные системы памяти. М.: Изд-во МАИ, 1991. 179 с.

*Поступила в редколлегию 22.05.2003*

УДК 519.6

Э.Г. ПЕТРОВ, Н.И. КАЛИТА

**МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА ПРЕДПОЧТЕНИЙ ИНДИВИДУУМОВ**

Успешность конкурентной борьбы любого предприятия, предоставляющего услуги и товары потребителям, зависит от выбранных экономических, технологических и организационных стратегий. Среди них значительную роль играет борьба за удержание завоеванного сегмента рынка и привлечение все большего числа потребителей. Все индивидуумы являются потребителями определенных товаров или услуг. Предпочтение схожих товаров и услуг предопределяет сходное поведение индивидуумов, объединяя их в однородные группы. Деятельность предприятия на рынке должна быть ориентирована именно на такую целевую группу потребителей и учитывать ее интересы, материальные возможности, образ жизни, вкусы и т.д. Потребитель свободен в своем выборе, однако возможно влияние и на его мотивацию, и на поведение, если предлагаемый товар или услуга рассчитаны на удовлетворение его нужд и ожиданий [1].

Постановка и формализация задачи управления поведением однородной социальной группы приведена в [2]. Методологической основой для построения модели поведения является теория полезности, согласно которой индивидуумы выбирают из множества доступных альтернатив  $X$  такую, которая имеет наибольшую привлекательность

$$x^0 = \arg \max_{x \in X} P(x), \quad (1)$$

$$P(x) = \max_{x \in X} \sum_{i=1}^n a_i p_i [k_i(x)], \quad (2)$$

где  $a_i$  – относительные безразмерные коэффициенты важности частных характеристик  $k_i(x)$  альтернатив  $x$  в конкретной ситуации выбора;

$$0 \leq a_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad p_i [k_i(x)] - \text{функция полезности частной характеристики}$$

(определяется как  $p_i [k_i(x)] = \left( \frac{k_i(x) - k_{i_{\text{нх}}}}{k_{i_{\text{нл}}} - k_{i_{\text{нх}}}} \right)^{\alpha_i}$ , где  $k_{i_{\text{нх}}}, k_{i_{\text{нл}}}$  – наихудшее и наилучшее

значения  $i$ -й частной характеристики,  $\alpha_i$  – параметр нелинейности,  $i = \overline{1, n}$  [3].

По определению значения частных характеристик альтернатив  $k_i(x)$  заданы и определены количественно, в то время как значения  $a_i$  отражают субъективные предпочтения индивидуума, степень его информированности о ситуации выбора. Реализация управления поведением требует решения задачи оценивания компонент вектора предпочтений  $p_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Оценивание предпочтений лица, принимающего решение, рассматривалось в [3], в [4] приведены результаты использования экспертных процедур для оценки предпочтений потребителей, однако не имеется полного описания процедур формирования всевозможных типов оценок предпочтений однородной группы индивидуумов, частным случаем которой являются потребители. В данной статье рассматриваются возможные подходы к определению вектора предпочтений такой социальной группы.

Оценки  $p_i$  могут быть получены субъективными или объективными методами в ходе активных или пассивных экспериментов. В субъективных методах, основанных на интроспективном анализе, для формирования оценок используются мнения экспертов о

предпочтениях индивидуумов исследуемой однородной группы. В качестве экспертов могут выступать: 1) внешние эксперты; 2) группа потребителей.

Активный эксперимент заключается в побуждении экспертов осмыслить и структурировать предпочтения. Для проведения активных экспериментов могут привлекаться как внешние эксперты (профессионалы в исследуемой области), так и сами потребители. Процедура оценивания для профессиональных экспертов проводится по традиционной, изложенной в литературе методике экспертного оценивания [5, 6].

В случае, когда экспертами выступают потребители, изучается мнение большой группы индивидуумов, каждый из которых имеет определенное суждение относительно предложенных альтернатив и их характеристик. Для изучения мнения социальных групп используются хорошо разработанные социологические методы – опросы, анкетирование, интервью [7, 8]. При этом возникает задача выделения однородной социальной группы, которая может быть решена или до экспертного опроса по объективным социально-демографическим характеристикам, или путем классификации по результатам экспертизы.

Пассивный эксперимент представляет собой наблюдение за результатами выбора альтернативы без вмешательства в процесс выбора. Зафиксированный выбор наиболее предпочтительной альтернативы на допустимом множестве является исходной информацией для идентификации предпочтений.

Известные недостатки экспертного подхода – субъективизм оценок, трудоемкость, возможность искажения информации, коррелированность результатов с методом и процедурой опроса и др., – отсутствуют в объективных методах, использующих математические модели объектов и явлений. В задаче оценивания вектора предпочтений индивидуума используется компараторная модель идентификации, основанная на регистрации факта выбора единственной альтернативы в ходе активного или пассивного эксперимента.

### 1. Формирование различных видов оценок вектора предпочтений на основе экспертной информации.

В ходе экспертизы для идентификации предпочтений эксперт использует информацию о множестве частных характеристик альтернатив  $k_i(x)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Сравнивая  $k_i$  и  $k_j$ , эксперт определяет степень их важности  $a_i$  и  $a_j$ . Причем, если  $k_i \succ k_j$ , то  $a_i > a_j$  и если  $k_i \sim k_j$ , то  $a_i = a_j$ . Упорядоченное множество  $\{a_i\}_{i=\overline{1, n}}$ , соответствующее множеству  $\{k_i\}_{i=\overline{1, n}}$ , представляет собой вектор предпочтений.

Предпочтения индивидуумов  $a_i$  в зависимости от глубины интроспективного анализа могут быть измерены экспертами в качественных или количественных шкалах.

К качественным шкалам относятся шкала наименований и порядковая (ранговая), применение которых дает информацию в следующем виде:

- ранжирование частных характеристик  $k_i(x)$ ,  $i = \overline{1, n}$

$rang(k_1(x)) = 1, rang(k_2(x)) = 2, \dots, rang(k_r(x)) = r, \dots, rang(k_n(x)) = n$ ;

- их частичное упорядочивание

$\{k_1(x) \sim k_2(x)\} \succ k_3(x) \succ \dots \succ \{k_{n-2}(x) \sim k_{n-1}(x) \sim k_n(x)\}$ ;

- полное упорядочивание

$k_1(x) \succ k_2(x) \succ \dots \succ k_m(x) \succ \dots \succ k_n(x)$ ;

разбиение на классы эквивалентности

$\{k_i(x) \sim k_2(x) \sim k_3(x)\}, \{k_{n-1}(x) \sim k_n(x)\}$

и т.п. без указания «расстояния» между  $k_i(x)$ , т.е. количественных значений  $a_i$ . Результатом обработки индивидуальных мнений экспертов является среднегрупповая оценка в

виде упорядоченного ряда частных характеристик, в соответствие которому можно поставить ряд вида:

$$a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_m > \dots > a_n$$

или 
$$\{a_1 = a_2\} > a_3 > \dots > \{a_{n-2} = a_{n-1} = a_n\},$$

или 
$$a_1 = a_2 = a_3 \text{ и } a_{n-1} = a_n$$

К количественным шкалам относятся абсолютная, интервальная, шкала отношений (подобия), которые в отличие от качественных шкал дают количественную оценку степени предпочтительности  $k_i(x)$ .

Для идентификации вектора предпочтений индивидуума могут быть использованы количественные оценки следующих типов: непосредственная численная; балльная; интервальная; лингвистическая переменная.

В процессе обработки результатов экспертизы определяется обобщенная экспертная оценка, которая может быть представлена в нескольких видах. Рассмотрим алгоритмы их формирования.

### 1.1 Формирование точечной оценки $a_i$ .

Пусть в процедуре экспертного оценивания компонент вектора предпочтений эксперты указывают значения  $a'_{ij}$  ( $j = \overline{1, N}$  – количество экспертов) в точечном виде в любой привычной для них шкале с любым интервалом  $[b_j; c_j]$ , например,  $[0; 1]$ ,  $[0; 10]$ ,  $[0; 5]$

и т.д. Для выполнения условия  $\sum_{i=1}^n a'_{ij} = 1$  для всех  $j = \overline{1, N}$  необходимо выполнить пере-

счет оценок  $a'_{ij}$  по формуле

$$a_{ij} = a'_{ij} / \sum_{i=1}^n a'_{ij}. \quad (3)$$

Обобщенная оценка  $a_i$  по группе экспертов рассчитывается как [9]

$$a_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot q_j / \sum_{j=1}^N q_j, \quad (4)$$

где  $q_j$  – коэффициент компетентности  $j$ -го эксперта. Если компетентность экспертов одинакова, т.е.  $q_j = 1$ , то

$$a_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} / N \quad (5)$$

Статистической оценкой степени согласованности мнений экспертов является дисперсия

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^N (a_{ij} - a_i)^2 \cdot q_j / \sum_{j=1}^N q_j. \quad (6)$$

**1.2 Формирование интервальной оценки  $a_i$  без указания предпочтений внутри интервала.**

Интервальную оценку компонент вектора предпочтений можно получить следующими способами.

1). Пусть эксперты определили компоненты вектора предпочтений в точечном виде (случай 1.1). Тогда интервальную оценку  $a_i \in [b_i; c_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$ , с учетом формулы (3) получим, если принять  $b_i = \min_j a_{ij}$ ,  $c_i = \max_j a_{ij}$ ,  $j = \overline{1, N}$ .

2). Каждый эксперт назначает  $a_{ij}$  интервал возможных значений на отрезке  $[b_j; c_j]$  с указанием точных границ этого интервала  $a_{ij} \in [b_{ij}; c_{ij}]$ . В случае, когда  $[b_j; c_j]$  не совпадает с интервалом  $[0; 1]$ , необходимо выполнить переход к этому стандартному интервалу, используя линейное преобразование  $\varphi(x) = zx + t$ , где  $t = \varphi(0)$  - константа, определяющая начало точки отсчета,  $z$  - масштабный множитель [3].

Обобщенную групповую оценку можно получить, взяв:

- 1) наиболее широкий интервал изменения  $a_i \in [b_i; c_i]$ , где  $b_i = \min_j b_{ij}$ ,  $c_i = \max_j c_{ij}$ ;
- 2) наиболее узкий интервал  $a_i \in [b_i; c_i]$ , где  $b_i = \max_j b_{ij}$ ,  $c_i = \min_j c_{ij}$ ;
- 3) в качестве границ интервала средние оценки

$$b_i = \sum_{j=1}^N b_{ij} \cdot q_j / \sum_{j=1}^N q_j \text{ и } c_i = \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot q_j / \sum_{j=1}^N q_j.$$

Согласованность экспертов определим как дисперсию для границ полученного интервала

$$\sigma_{b_i}^2 = \sum_{j=1}^N (b_i - b_{ij})^2 q_j / \sum_{j=1}^N q_j, \tag{7}$$

$$\sigma_{c_i}^2 = \sum_{j=1}^N (c_i - c_{ij})^2 q_j / \sum_{j=1}^N q_j. \tag{8}$$

**1.3 Формирование интервальной оценки  $a_i$  с предпочтениями.**

1) Результаты точечных оценок каждого из экспертов (случай 1.1) можно рассматривать как реализации некоторой случайной величины, принимающей значения из области допустимых значений  $\Omega_{\alpha}$ , и применить к ним методы математической статистики, определив для оценок (4) и (5) статистическую значимость полученных результатов. Задав значение доверительной вероятности  $P$ , укажем интервал  $\bar{a}_i - \Delta_i \leq a_i \leq \bar{a}_i + \Delta_i$ , в который попадает оцениваемая величина. Если предположить, что  $a_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) - нормально распределенная величина, то  $\bar{a}_i$  - ее центр, а дисперсия

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^N (a_i - a_{ij})^2 / N. \tag{9}$$

Тогда  $\Delta_i = t\sigma_i / \sqrt{N}$ , где  $t$  - табличное значение, имеет распределение Стьюдента с  $N - 1$  степенями свободы;  $N$  - количество значений, определенных экспертами. Получив

значение  $\Delta_i$ , сформируем интервал  $[\bar{a}_i - \Delta_i; \bar{a}_i + \Delta_i]$ , в котором с вероятностью  $P$  находится оцениваемая величина  $a_i$ .

2). Пусть  $j = \overline{1, N}$  экспертов определили интервалы изменения характеристики  $a_i$  как  $[a_{ij\min}; a_{ij\max}]$  (рис.1).

Эти данные можно представить в виде статистического ряда, построить для него гистограмму и график плотности распределения  $a_i$  (рис. 2) [10].

При определении числовых характеристик статистического распределения – математического ожидания и дисперсии, следует учитывать способ извлечения информации о предпочтениях. Если проводится пассивный эксперимент, то число экспертов  $N$  достаточно большое, и, следовательно, такого же объема будет получен статистический материал. В этом случае математическое ожидание  $m_a^*$  и дисперсия  $D_a^*$  рассчитываются по формулам:

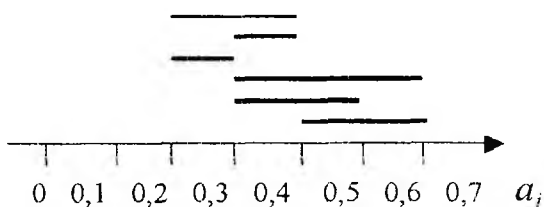


Рис. 1

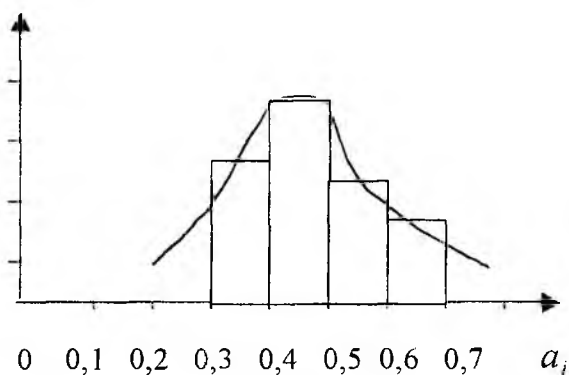


Рис.2

$$m_a^* = \sum_{l=1}^L \bar{a}_l p_l^* \tag{10}$$

$$D_a^* = \sum_{l=1}^L (\bar{a}_l - m_a^*)^2 p_l^* \tag{11}$$

где  $\bar{a}_l$  - срединное значение  $l$ -го интервала;

$l = \overline{1, L}$ ,  $p_l^* = \frac{m_l}{M}$  – частота попадания значений  $a_i$  в  $l$ -й интервал;

$m_l$  – количество измерений в данном интервале;

$M$  – общее число измерений  $a_i$ .

Для того чтобы задать закон распределения  $a_i$ , решается типичная задача выравнивания статистического ряда, например, методом моментов. Пользуясь рис.2, предположим, что распределение  $a_i$  подчиняется нормальному закону  $f(a_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a-m)^2}{2\sigma^2}}$ ,

для которого достаточно подобрать значения двух параметров:  $m$  и  $\sigma$  так, чтобы сохранить первые два момента статистического распределения (10) и  $\alpha_2[a_i] = \sum_{l=1}^L \bar{a}_l^2 p_l^*$ . Полу-

чим такие значения параметров функции  $f(a_i)$ , что она наилучшим образом будет описывать исследуемый статистический ряд.

В случае, когда проводится активный эксперимент с внешними экспертами,  $N$  может оказаться малым, а полученный объем измерений – ограниченным, использование формул (10), (11) является некорректным. Тогда определяются оценки математического ожидания и дисперсии:

$$\tilde{m}_a = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^{L'+1} \hat{a}_l m_l; \quad (12)$$

$$\bar{D}_a = \frac{1}{L'+1} \sum_{l=1}^{L'+1} (\hat{a}_l - \tilde{m}_a)^2, \quad (13)$$

где  $\hat{a}_l$  – граничное значение  $l$ -го интервала.

Для более точного определения закона распределения в [11] предлагаются различные процедуры статистической обработки малых выборок и подбора распределения. В качестве критерия согласованности статистического и полученного теоретических распределений в обоих случаях используется критерий согласия  $\chi^2$  Пирсона или Колмогорова.

#### 1.4 Формирование оценок $a_i$ на основе лингвистических переменных.

Назначение точных оценок коэффициентов предпочтений, установление четкого отношения предпочтения или эквивалентности даже для опытных экспертов является затруднительным. Поэтому эксперты могут использовать нечеткое определение  $a_i$ , т.е. в виде лингвистических переменных, где в качестве значений переменных допускаются не только числа, но и слова или предложения естественного или искусственного языка [12]: а) « $a_i$  приблизительно равно  $b_j$ »; б) « $a_i$  находится приблизительно в интервале от  $b_j$  до  $c_j$ ».

Для формализации лингвистических переменных используется теория размытых множеств, согласно которой для любого размытого множества, определенного лингвистической переменной  $a_i$ , можно сформировать функцию принадлежности  $\mu(a_i)$  – непрерывную, с областью значений  $[0; 1]$  такую, что (рис. 3, а, б):

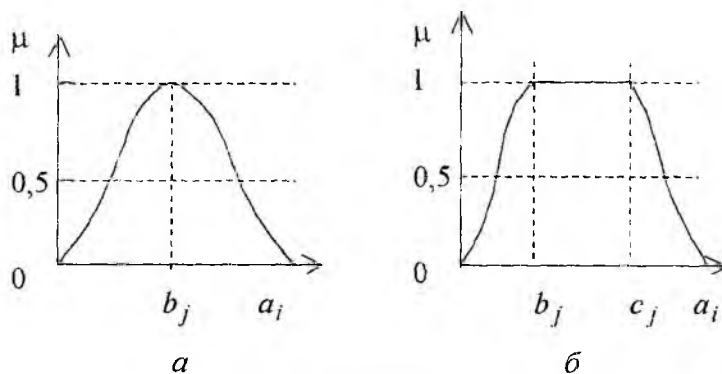


Рис. 3

а)  $\mu(a_i) = 1$  при  $a_i = b_j$  и  $0 \leq \mu(a_i) < 1$  для любых  $a_i \neq b_j$ ;

б)  $\mu_{b,c}(a_i) = 1$  при  $b_j \leq a_i \leq c_j$  и  $0 \leq \mu_{b,c}(a_i) < 1$ , если  $a_i < b_j$  и  $a_i > c_j$

Пусть эксперты определили значения  $a_i$  в виде лингвистической переменной типа (а), где  $b_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ , является нечетким множеством [13]  $b_j = \{ \langle \mu_{b_j}(a_i), a_i \rangle \}$ .

Тогда обобщенную групповую оценку  $a_i$  можно сформировать как нечеткое множество  $b_i^{CP} = \bigcap_{j=1}^N b_j$  или нечеткое множество  $b_i^{CP} = \bigcup_{j=1}^N b_j$ . Функции принадлежности нечеткому множеству  $c_i$  определяются как [14]:

$$\mu_{\cap b_i}(a_i) = \min_j \{\mu_{b_j}(a_i)\}, \quad (14)$$

или 
$$\mu_{\cap b_i}(a_i) = \prod_{j=1}^N \mu_{b_j}(a_i) \quad (15)$$

$$\mu_{\cup b_i}(a_i) = \max_j \{\mu_{b_j}(a_i)\} \quad (16)$$

или 
$$\mu_{\cup b_i}(a_i) = \sum_{j=1}^N \mu_{b_j}(a_i) - \prod_{j=1}^N \mu_{b_j}(a_i). \quad (17)$$

Выбор конкретной формулы из (14)-(17) отражает степень «оптимизма» или «пессимизма» в оценке  $a_i$ .

Алгоритмы построения функций принадлежности и способы их линейной аппроксимации предложены в [14, 15]. Однако в [3] приведен анализ этих процедур и показано, что в силу субъективизма формирования суждений на всех этапах формализации лингвистической переменной, достаточно определить значения  $b_i^{CP}$  для точечной оценки и  $b_i^{CP}, c_i^{CP}$  для интервальной. Анализ ситуации показывает, что как и в случае детерминированных оценок, рассмотренные ранее подходы. Так, аналогично (4) приблизительную среднюю точечную среднегрупповую оценку можно сформировать как

точечную и как интервальную, используя оценку вычислим как 
$$b_i^{CP} = \sum_{j=1}^N b_j \cdot q_j / \sum_{j=1}^N q_j.$$

## 2. Формирование различных видов оценок вектора предпочтений на основе объективных методов идентификации.

Объективные методы оценивания вектора предпочтений индивидуума, основанные на компараторной идентификации, позволяют получить количественные оценки в виде: 1) точечных значений; 2) интервалов, где границы заданы в виде точечных значений.

Для определения предпочтений индивидуума воспользуемся методологией, изложенной в [3]. Компараторная идентификация может проводиться в условиях активного или пассивного эксперимента. В активных экспериментах исследователи вмешиваются в процесс выбора и просят индивидуума, осуществляющего выбор, указать структуру своих предпочтений на множестве заданных альтернатив  $X$ , т.е. установить для них отношения порядка и эквивалентности  $x_i \succ x_j, x_i \sim x_j, i, j = \overline{1, N}, i \neq j$ . Пассивный эксперимент – это наблюдение за поведением индивидуума в естественных условиях без предварительной специальной подготовки.

Рассмотрим идентификацию вектора предпочтений индивидуума в ходе пассивного эксперимента. В этой ситуации можно только зафиксировать акт выбора альтернативы  $x^c$  и считать ее наиболее предпочтительной на множестве всех доступных альтернатив  $X$ , не имея информации о структуре предпочтений. Это означает, что  $P_c > P_v, v = \overline{1, N}, v \neq c$  и

$$k_{11}^H a_1 + k_{12}^H a_2 + \dots + k_{1n}^H a_n \leq P_c$$

$$k_{v1}^H a_1 + k_{v2}^H a_2 + \dots + k_{vn}^H a_n \leq P_c$$

$$k_{N1}^H a_1 + k_{N2}^H a_2 + \dots + k_{Nn}^H a_n \leq P_c$$

Или, обозначив  $k_{vi}^* = k_{vi}^H - k_{ci}^H$ ,  $v = \overline{1, N}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , получим  $N - 1$  неравенств вида:

$$k_{v1}^* a_1 + k_{v2}^* a_2 + \dots + k_{vn}^* a_n \leq 0 \quad (18)$$

при 
$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (19)$$

$$a_i \leq 1, \quad (20)$$

$$a_i \geq 0. \quad (21)$$

Ограничения (18)-(21) линейны относительно искомым неизвестных  $a_i$  и представляют собой полуплоскости (18), (20), (21) и плоскость (19), ограничивающие в  $n$ -мерном пространстве некоторый выпуклый многогранник, являющийся множеством допустимых значений  $\Omega$  вектора предпочтений  $a(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$ . На этом множестве можно определить его точечную и интервальную оценку.

### 2.1 Точечная оценка $a_i$ .

Точечная оценка  $a_i$  представляет собой решение системы неравенств (18)-(21) и, как показано в [3, 16], таким решением является чебышевская точка

$$L = \max_{a \in \Omega} \min_j |\eta_j(a)|,$$

где  $\eta_j(a)$ ,  $j = \overline{1, N-1}$  – ограничения-неравенства типа  $k_{j1}^* a_1 + k_{j2}^* a_2 + \dots + k_{jn}^* a_n \leq L$  и  $L = a_{n+1}$ .

Если система (18)-(21) совместна, то  $L < 0$ . Значение  $|L|$  определяет наименьшее отклонение точки  $a^* (a_1^*, \dots, a_i^*, \dots, a_n^*) \in \Omega$  до границ области  $\Omega$  и является мерой устойчивости найденного решения.

Математическая модель определения точечной оценки  $a^* (a_1^*, \dots, a_i^*, \dots, a_n^*)$  имеет вид:

$$\min a_{n+1} \quad (22)$$

$$-k_{j1}^* a_1 - k_{j2}^* a_2 - \dots - k_{jn}^* a_n + a_{n+1} \geq 0, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad a_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (24)$$

### 2.2 Интервальная оценка $a_i$ .

Компараторная модель (22)-(24) позволяет определить границы интервалов  $[b_i; c_i]$  в результате решения следующих оптимизационных задач для всех  $i = \overline{1, n}$ :

$$b_j = \min a_i, \quad c_j = \max a_i \quad (25)$$

при ограничениях  $k_{j1}^* a_1 + k_{j2}^* a_2 + \dots + k_{jn}^* a_n \leq 0, \quad j = \overline{1, N-1}$  (26)

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad a_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (27)$$

Значения  $b_j$  и  $c_j$  в моделях (25)-(27) формируют самые широкие интервалы допустимого изменения  $a_j$ . Более узкие интервалы получим, используя все значения  $a_j$ , сформировав из них матрицы

$$\left\| \begin{array}{cccc} a_{11}^{\min} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & \dots & a_{ji}^{\min} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N-1,1} & \dots & a_{N-1,i} & \dots & a_{N-1,n}^{\min} \end{array} \right\| \quad \text{или} \quad \left\| \begin{array}{cccc} a_{11}^{\max} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & \dots & a_{ji}^{\max} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N-1,1} & \dots & a_{N-1,i} & \dots & a_{N-1,n}^{\max} \end{array} \right\| \quad (28)$$

и выбрав в каждом столбце минимальный и максимальный элементы. Матрицы (28) для каждого  $a_j$  дают различные интервалы  $[b_j^{\min}, c_j^{\min}]$  и  $[b_j^{\max}, c_j^{\max}]$ , и использование одного из них в дальнейшем определяется условиями конкретной ситуации выбора.

Следующим этапом решения проблемы управления поведением однородной группы индивидуумов является определение стратегий распределения ресурсов на управление, когда информация о предпочтениях получена каким-либо способом из представленных в настоящей статье.

**Список литературы:** 1. Энджел Д.Ф., Блэкуэлл Р.Д., Миниард П.У. Поведение потребителей, СПб: Питер Ком, 1999. 768 с. 2. Петров Э.Г., Калита Н.И. Формализация проблемы управления поведением социальной группы. //Вісник ЧІТІ. 1999, №4. С. 45-49. 3. Овезгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. Киев: Наукова думка, 2002. 163 с. 4. Гришко С.И. Исследование потребительских предпочтений //Бизнесинформ. 1997, №23. С.72-75. 5. Бешелев С.Я., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с. 6. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнайдерман М.И. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. М.: Наука, 1984. – 120 с. 7. Ружавишников В.О., Паниотто В.И., Чурилов Н.И. Опросы населения (Методический опыт). М. Финансы и статистика, 1984. 207 с. 8. Экспертные оценки в социологическом исследовании /Под ред. Крымского. Киев: Наукова думка, 1990. 318 с. 9. Теория выбора и принятия решений /Макаров И.М., Виноградская Т.М. и др. М.: Наука, 1982. 328 с. 10. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с. 11. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. М.: Статистика, 1978. 248 с. 12. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с. 13. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/ А.Н. Борисов, А.В. Алексеев и др. М.: Радио и связь, 1989. 304 с. 14. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184с. 15. Роттштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. Винница: «Універсум-Вінниця», 1999. 302 с. 16. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. М.: Наука, 1967. 460с.

Поступила в редколлегию 28.07.2003

УДК 519.81

Э.Г. ПЕТРОВ, Д.А. БУЛАВИН

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧЕБЫШЕВСКОЙ ТОЧКИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ МНОГОФАКТОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

### Введение.

В общем случае на содержательном уровне проблема принятия решений формулируется следующим образом. Определена некоторая цель, которую необходимо достигнуть. Требуется выбрать наиболее эффективное решение из множества альтернативных путей достижения цели. Для этого лицо, принимающее решение (ЛПР), должен проанализировать ситуацию: особенности цели, существующие ограничения, множество возможных путей ее достижения и т.д., и только после этого выбрать наиболее приемлемое решение. Выбор ЛПР основывается на представлениях о предпочтительности возможных решений. ЛПР производит выбор, основываясь на некоторых правилах или ценностях, которые часто называют принципом оптимальности ОР.

Тогда постановку задачи принятия решений можно записать в следующем виде: имеется пара  $\langle X, OP \rangle$ , где  $X$  - множество вариантов решений (альтернатив),  $OP$  - принцип оптимальности [1,2]. В общем случае решением задачи  $\langle X, OP \rangle$  считают, полученное с помощью принципа оптимальности подмножество  $X^0 \subset X$ . Следовательно, исследование общей проблемы принятия решений требует последовательного решения еще трех задач:

Формирование множества допустимых решений  $X$ ;

Выбор и обоснование системы оценок, позволяющих установить на множестве  $X$  отношение порядка (Задача оценивания);

Определение наилучшего (оптимального) решения  $X^0 \subset X$  (Задача оптимизации)

Центральной из них является задача оценивания [3]. Трудность ее решения заключается в том, что в большинстве ситуаций не возможно выбрать единственный критерий, который смог бы полностью охарактеризовать всю систему в целом. Именно из-за этого появляется необходимость:

– сформулировать множество частных критериев, полностью описывающих все важные параметры системы;

– выбрать метрику на множестве частных критериев, дающую возможность установить на множестве решений  $x \in X$  отношение порядка.

Наиболее общий подход к решению задачи оценивания заключается в формировании некоторой обобщенной оценки вида:

$$P(x) = F[\lambda_i, k_j(x)], i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

где  $k_j(x)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – частные критерии (характеристики) однозначно определенные для каждого  $x \in X$ ;

$\lambda_i$  – коэффициенты изоморфизма, приводящие разнородные частные критерии к единой размерности (или безразмерному виду), одинаковому интервалу изменения и учитывающие различную их значимость (вес) в обобщенной оценке  $P(x)$ .

В общем случае проблема идентификации структуры модели (1) требует решения задач структурной и параметрической идентификации, то есть соответственно определения вида оператора  $F$  и значений параметров  $\lambda_i$ .

Структурная идентификация предполагает:

- определение значимых факторов, т.е. частных критериев, оказывающих влияние на выходные данные модели;
- определение структуры, иными словами вида оператора, устанавливающего связь между входными и выходными характеристиками модели.

Задача параметрической идентификации предусматривает определение конкретных количественных значений параметров модели, при этом классические методы идентификации, непригодны для идентификации моделей интеллектуальной деятельности. Перспективным для этих целей является использование метода компараторной идентификации [4,5].

### **1. Метод компараторной идентификации модели индивидуального многофакторного оценивания.**

Идентификацией объекта является определение его характеристик на основе опытного исследования этого объекта. Идентификация является самой трудоемкой и самой ответственной операцией при анализе объектов. К настоящему времени теория идентификации превратилась в обширное по содержанию и богатое по методам учение, тем не менее, еще многие актуальные проблемы ждут в ней еще своего решения. Одной из самых актуальных задач в настоящее время является задача расширения класса объектов, поддающихся эффективной идентификации.

Классическая задача идентификации заключается в том, чтобы по входным  $x$  и выходным  $y$  сигналам определить закон  $y = F(x)$  преобразования сигналов этим объектом. Такую идентификацию называют прямой, поскольку она осуществляется при непосредственном доступе к выходным сигналам объекта. Однако, в некоторых случаях появляется необходимость идентификации объекта, когда у исследователя нет прямого доступа к информации о выходном сигнале. Объекты, рассматриваемые в статье, относятся именно к такому типу. В разных ситуациях, оценки даваемые человеком тем или иным свойствам объекта субъективны, их невозможно непосредственно измерить никакими физическими приборами. В таких случаях классические методы прямой идентификации для изучения процессов оценивания неприменимы. А наиболее эффективными для применения методам являются методы косвенной идентификации. Из них самым удобным и широко применяемым является метод компараторной идентификации [5].

В теории многофакторного оценивания в настоящее время общепринятой является гипотеза о существовании скалярной функции полезности [6]. Согласно этой гипотезе, каждая локальная характеристика альтернативного решения имеет некоторую полезность для лица, принимающего решения и существует некоторая обобщенная полезность, являющаяся функцией локальных критериев. Таким образом из двух альтернатив  $x_1, x_2 \in X$  и при этом  $x_1 \succ x_2$  (альтернатива  $x_1$  предпочтительней альтернативы  $x_2$ ), следует, что  $P(x_1) > P(x_2)$ , где,  $P(x_1), P(x_2)$  - функции полезности альтернатив [5]. То есть, из двух альтернатив одна оказывается предпочтительней другой, только в том случае, когда полезность первой альтернативы превосходит полезность второй:

$$x_1 \succ x_2 \Leftrightarrow P(x_1) > P(x_2) \quad (2)$$

Функция  $P$ , удовлетворяющая соотношению (2), является функцией полезности. В общем случае, справедливо и обратное.

В настоящее время наиболее широко используемые две формы функции полезности: аддитивная

$$P_k(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i k_i(x) \quad (3)$$

и мультипликативная

$$P_k(x) = \prod_{i=1}^n \lambda_i k_i(x). \quad (4)$$

Наиболее информативной ситуацией является та, в которой коэффициенты изоморфизма заданы численно. Так как  $\lambda_i$  - это константы, то (4) можно переписать следующим образом:

$$P_k(x) = \prod_{i=1}^n \lambda_i \prod_{i=1}^n k_i(x). \quad (5)$$

Рассмотрение (5) показывает, что мультипликативная оценка не позволяет учесть «веса» частных критериев, так как произведение  $\prod \lambda_i$  является постоянным масштабным множителем и не влияет на соотношение полезностей различных решений  $x \in X$ . Поэтому более универсальной широко применяемой является аддитивная функция полезности.

Формула (3) имеет смысл только тогда, когда  $\lambda_i$  учитывают важность частных критериев, и одновременно являются коэффициентами изоморфизма. Чаще всего определение таких коэффициентов является большой проблемой, поэтому было предложено представить аддитивную функцию полезности в виде:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n a_i k_i^H(x) \quad (6)$$

где  $a_i$  - это относительные безразмерные весовые коэффициенты, для которых выполняются следующие ограничения

$$0 \leq a_i \leq 1, \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad (7)$$

а  $k_i^H(x)$  - нормализованные, то есть приведенные к изоморфному виду частные критерии.

Нормализация производится по формуле

$$k_i^H(x) = \left( \frac{k_i(x) - k_{i_{\max}}}{k_{i_{\min}} - k_{i_{\max}}} \right), \quad (8)$$

где  $k_i(x)$  - значение частного критерия;

$k_{i_{\min}}$ ,  $k_{i_{\max}}$  - соответственно наилучшее и наихудшее значение частного критерия, которые он принимает на области допустимых значений  $x \in X$ .

В зависимости от вида экстремума частного критерия, имеем

$$k_{i_{\min}} = \begin{cases} \max_{x \in X} k_i(x), & \text{если } k_i(x) \rightarrow \max, \\ \min_{x \in X} k_i(x), & \text{если } k_i(x) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (9)$$

$$k_{inx} = \begin{cases} \min_{x \in X} k_i(x), \text{ если } k_i(x) \rightarrow \max, \\ \max_{x \in X} k_i(x), \text{ если } k_i(x) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом на аксиоматическом уровне решена задача структурной идентификации функции полезности. Однако практическое использование формулы (6) возможно только при условии, что известны коэффициенты  $a_j$ . Таким образом, возникает задача параметрической идентификации модели (6). Ее решение в настоящее время основано на различных методах экспертного оценивания, когда специалисты – ЛПР и эксперты побуждаются к осознанию и структуризации своих предпочтений относительно значимости различных частных критериев  $k_i(x)$ .

Альтернативным является компараторный метод параметрической идентификации. Он заключается в следующем. ЛПР предлагается множество допустимых решений  $X = \{x_j, j = \overline{1, m}\}$  и предлагается указать наиболее предпочтительную по его мнению альтернативу. Предположим, что это альтернатива  $x_l$ . Тогда на основе соотношения (2) можно записать, что

$$P(x_l) > P(x_j); \quad \forall j \neq l; j = \overline{1, m} \quad (11)$$

В результате получим  $(m-1)$  неравенство определяющее область возможных значений весовых коэффициентов  $a_i, i = \overline{1, n}$ . В качестве точечного значения весовых коэффициентов принимается Чебышевская точка [5, 7].

Для описанной выше процедуры идентификации аддитивной функции полезности характерны следующие особенности:

- субъективизм и слабая аргументированность выбора структуры оценки;
- невозможность в рамках аддитивной оценки учесть нелинейность полезности частных критериев от их абсолютного значения и их взаимовлияние;
- низкая точность как экспертных, так и компараторных процедур определения значений весовых коэффициентов  $a_i$ .

Ниже предлагается основанный на идеях компараторной идентификации метод определения вида многофакторной оценки полезности решений, позволяющий преодолеть недостатки аддитивной оценки.

## 2. Постановка задачи.

Пусть имеется множество альтернатив (решений)  $X = \{x_j, j = \overline{1, m}\}$  каждая из которых характеризуется набором частных критериев  $k_i, i = \overline{1, n}$ . Значения частных критериев  $k_i(x_j)$  однозначно определены. На основе анализа указанной информации ЛПР осуществляет:

- выбор из  $X$  наиболее предпочтительного решения, например  $x_1$ ;
- ранжирование всех решений  $x \in X$  в порядке убывания их предпочтительности, т.е. устанавливает отношение порядка на множестве альтернатив  $X$

$$x_1 \succ x_2 \succ \dots \succ x_m.$$

Это означает, что в первом случае справедливо утверждение (11), а во втором соотношении вида

$$P(x_1) > P(x_2) > \dots > P(x_m) \quad (12)$$

На основе этой информации необходимо синтезировать математическую модель индивидуального выбора ЛПР, то есть модель формирования обобщенной полезности  $P(x_i)$ . При этом априорные ограничения на вид функции  $P(x_i)$  не накладываются.

### 3. Использование метода Чебышевской точки для определения весовых коэффициентов индивидуальной функции полезности.

Структуру модели будем определять как частный случай полинома Колмогорова-Габова вида:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n a_i k_i'(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^n a_i k_i''(x) * k_g''(x) + \dots, \quad i = \overline{1, n}; g = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Этот полином позволяет описать любую нелинейную зависимость и не накладывает никаких априорных ограничений на аддитивность или мультипликативность, так как содержит в своем составе, как первые, так и вторые составляющие элементы, и все возможные их комбинации.

Задача заключается в выборе в рамках полинома (13) такой структуры модели функции полезности (1) минимальной сложности, которая удовлетворяет, в зависимости от вида исходной информации, соответствующим неравенствам (11) или (12). Это означает, что необходимо решить задачи структурной (определить число членов полинома и конкретный вид каждого из них) и параметрической (определить значения коэффициентов при всех членах полинома) идентификации.

Пусть в результате рассмотрения ряда альтернатив, ЛПР выбрал альтернативу  $R_4$ , как наилучшую, т.е.  $R_4 \succ R_1$ ,  $R_4 \succ R_2$ ,  $R_4 \succ R_3$ ,  $R_4 \succ R_5$ . Из этого следует система неравенств (14)

$$\begin{cases} a_1 k_{41} + a_2 k_{42} + a_3 k_{43} + a_4 k_{44} \geq a_1 k_{11} + a_2 k_{12} + a_3 k_{13} + a_4 k_{14} \\ a_1 k_{41} + a_2 k_{42} + a_3 k_{43} + a_4 k_{44} \geq a_1 k_{21} + a_2 k_{22} + a_3 k_{23} + a_4 k_{24} \\ a_1 k_{41} + a_2 k_{42} + a_3 k_{43} + a_4 k_{44} \geq a_1 k_{31} + a_2 k_{32} + a_3 k_{33} + a_4 k_{34} \\ a_1 k_{41} + a_2 k_{42} + a_3 k_{43} + a_4 k_{44} \geq a_1 k_{51} + a_2 k_{52} + a_3 k_{53} + a_4 k_{54} \end{cases} \quad (14)$$

Отсюда

$$\begin{cases} (k_{11} - k_{41})a_1 + (k_{12} - k_{42})a_2 + (k_{13} - k_{43})a_3 + (k_{14} - k_{44})a_4 \leq 0 \\ (k_{21} - k_{41})a_1 + (k_{22} - k_{42})a_2 + (k_{23} - k_{43})a_3 + (k_{24} - k_{44})a_4 \leq 0 \\ (k_{31} - k_{41})a_1 + (k_{32} - k_{42})a_2 + (k_{33} - k_{43})a_3 + (k_{34} - k_{44})a_4 \leq 0 \\ (k_{51} - k_{41})a_1 + (k_{52} - k_{42})a_2 + (k_{53} - k_{43})a_3 + (k_{54} - k_{44})a_4 \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Введем обозначение  $(k_{11} - k_{41}) = b_{11}, \dots, (k_{51} - k_{41}) = b_{41}$ .

Тогда

$$\begin{cases} b_{11}a_1 + b_{12}a_2 + b_{13}a_3 + b_{14}a_4 \leq 0 \\ b_{21}a_1 + b_{22}a_2 + b_{23}a_3 + b_{24}a_4 \leq 0 \\ b_{31}a_1 + b_{32}a_2 + b_{33}a_3 + b_{34}a_4 \leq 0 \\ b_{41}a_1 + b_{42}a_2 + b_{43}a_3 + b_{44}a_4 \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

Следовательно, сформировано 4 неравенства вида (15), где  $a_i, i = \overline{1, n}$  - коэффициенты относительной важности частных критериев, для которых выполняются

условия неотрицательности  $a_i \geq 0, \forall i = \overline{1, n}$ , ограничения сверху  $a_i \leq 1, \forall i = \overline{1, n}$ , и равенства  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ .

В нашем случае, в качестве решения системы (16) наиболее правильно выбирать единственную точку, которая будет устойчива к различным вариациям границ области возможных значений. Такое решение называется Чебышевской точкой, и оно является самым устойчивым решением на рассматриваемой области.

Обозначим Чебышевскую точку  $A_u^* = \{a_i^*\}_{i=\overline{1, n}}$ . Тогда, как показано в [8]

$$A_u^* = \arg \max_{A_u} \min_j |\eta_j(A_u)|,$$

где  $\eta_j, j = \overline{1, m}$  – ограничения неравенства, которые входят в математическую модель (16).

Следовательно, Чебышевская точка – это максиминное решение на множестве допустимых значений матрицы индивидуальных предпочтений ЛПР.

Рассмотрим алгоритм нахождения Чебышевской точки. Введем в каждое неравенство модели (16) дополнительную переменную  $L = a_{n+1}$ , где  $n$  – размерность матрицы  $A_u$ . Тогда в общем случае

$$b_{j1}a_1 + b_{j2}a_2 + b_{j3}a_3 + b_{j4}a_4 + L \geq 0 \quad (17)$$

Значение переменной  $L$  определяет расстояние от любой точки до границы полупространства, определяемого неравенством (17). Тогда, как показано в [8], определение Чебышевской точки сводится к нахождению

$$A_u^* = \arg \max_{A_u \in \Omega^1} L \quad (18)$$

где область  $\Omega^1$  – определяется ограничителями вида (17).

Отсюда следует, что математическая модель нахождения матрицы индивидуальных предпочтений ЛПР как Чебышевской точки будет иметь вид (18) при следующих условиях:

$$\begin{aligned} b_{j1}a_1 + b_{j2}a_2 + b_{j3}a_3 + b_{j4}a_4 + L &\leq 0, \quad j = \overline{1, m}; \\ b_{j1}a_1 + b_{j2}a_2 + b_{j3}a_3 + b_{j4}a_4 &= 0, \quad j = \overline{m+1, N}; \\ -1 \leq b_{ij} &\leq 1 \quad \forall j = \overline{1, N}, i = \overline{1, n}; \\ a_i &\geq 0; \forall i = \overline{1, n} \quad a_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая, что все соотношения, включенные в (19) являются линейными функциями, задача нахождения Чебышевской точки, представляет стандартную задачу линейного программирования и может быть реализована с помощью известных алгоритмов, в нашем случае, с помощью симплекс-метода.

#### 4. Применение метода генетических алгоритмов для определения структуры модели индивидуальной функции полезности.

При дальнейшем изложении основных идей ГА мы не будем придерживаться стиля книги Холланда, а подойдем к ним как к процедуре *глобальной оптимизации*. Эта, хотя и

несколько упрощенная по сравнению с голландской, трактовка ГА вызвала сильный резонанс в литературе, и как показало время, вполне обоснованно. Почти два десятилетия исследований ГА на тестовых многоэкстремальных функциях ушли на доказательство именно этой грани могущества ГА, оставив в некоторой тени их выдающиеся адаптивные способности [9].

Генетические алгоритмы (ГА) основаны на механизмах натуральной селекции. ГА реализуют схему «выживание сильнейших» среди рассмотренных структур, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования эволюции поиска. В каждой генерации новое множество искусственных последовательностей создается, используя части старых и добавляя новые части с «хорошими свойствами». [10]

ГА начинает работу с некоторого случайного набора решений, который называется *популяцией*. Каждый элемент из популяции называется *хромосомой* и представляет некоторое решение проблемы. Хромосомы эволюционируют на протяжении множества итераций, носящих название *поколений* (генераций). По результатам итераций хромосома оценивается с использованием *функции соответствия*[11].

Рассмотрим пример с 5 альтернативами и соответственно 4 частными критериями: частота процессора, объем ОЗУ, объем жесткого диска и цена.

Причем, количественные характеристики частных критериев для каждой альтернативы задаются ЛПР на первом этапе, путем внесения данных в таблицу. В результате перед ЛПР предстает картина, иллюстрированная в табл. 1.

После того, как ЛПР занес данные в таблицу, он должен определить какие критерии стремятся к максимуму, а какие к минимуму. Затем количественные характеристики критериев нормируются по формуле (8).

В данном случае первые три частных критерия стремятся к максимуму, а последний к минимуму.

В результате преобразований получаем таблицу нормированных коэффициентов, представленную в табл. 2.

Далее ЛПР предлагается выбрать наилучшую, по его мнению, альтернативу. Допустим, что ЛПР выбрал четвертую альтернативу, как самую лучшую. Следующим шагом определяется значение аддитивной функции полезности.

Для начала вычисляются весовые коэффициенты, а затем подставляются в линейный полином Колмогорова-Габора. Таким образом, аддитивная функция полезности примет следующий вид (20):

$$P_{add} = 0,61k_2 + 0,39k_4 \quad (20)$$

Приступим к механизму генетических алгоритмов, учитывая результаты полученные, с помощью метода Чебышевской точки, на каждом этапе кроссинговера.

Пусть существует две хромосомы: одна родитель, содержащая в себе полностью записанный полином Колмогорова-Габора (рис. 1), а вторая ребенок, содержащая в себе только составляющие первого слагаемого (рис. 2).

Таблица 1

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$R_1$	1000	132	40	2300
$R_2$	600	198	80	1600
$R_3$	900	256	50	2700
$R_4$	600	256	70	1200
$R_5$	900	132	60	2300

Таблица 2

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$R_1$	1	0	0	0,267
$R_2$	0	0,532	1	0,733
$R_3$	0,75	1	0,25	0
$R_4$	0	1	0,75	1
$R_5$	0,75	0	0,5	0,267

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 1

1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 2

Хромосома ребенка будет для нас результирующей, то есть кратчайшим полиномом удовлетворяющим условию:

$$R_4 > R_1, R_4 > R_2, R_4 > R_3, R_4 > R_5. \quad (21)$$

Именно это условие (21) будет критерием, на основе которого мы будем проводить отбор.

Тогда, с помощью механизма кроссинговера, один ген родителя переходит к ребенку, и в случае улучшения хромосомы – остается, иначе возвращается обратно. Иными словами, сначала от хромосомы-родителя к хромосоме-ребенку переходит одно слагаемое(ген), и хромосома-ребенок принимает следующий вид (рис. 3):

1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 3

После этого, методом Чебышевской точки вычисляются весовые коэффициенты, для полученной хромосомы, затем проверяется, удовлетворяет ли хромосома-ребенок нашему условию (21), если нет, слагаемое возвращается хромосоме родителю, а в хромосому-ребенок направляется следующее слагаемое. И производятся аналогичные операции для следующего гена. Таким образом, выполняется вся схема, до полного перебора генов хромосомы родителя. Если, оптимальный вариант не найден, начинается попарный полный перебор всех генов. Если оптимальный вариант снова не найден, начинаем передавать по три гена. И так до тех пор, пока не найдется вариант, удовлетворяющий критерию (21).

Следующим шагом является выбор функции полезности, представленной в виде полинома Колмогорова-Габора, оптимальной длины. То есть, кратчайшего полинома удовлетворяющего условию (21) и одновременно обладающего максимальной полезностью. Для этого введем еще одно условие:

$$\Delta = P_{ген} - P_{од}, \Delta \rightarrow \max \quad (22)$$

Таким образом, после нахождения полинома Колмогорова-Габора оптимальной длины удовлетворяющего условию (21), мы выполняем проверку данного полинома, для выбранной альтернативы подставляя частные критерии. В нашем случае получается полином следующей длины:

$$P_{ген} = 0,429k_2^2 + 0,571k_4^2 \quad (23)$$

Отсюда полезность альтернатив следующая:

- $R_4 = 1;$
- $R_3 = 0,429;$
- $R_2 = 0,4277;$
- $R_5 = 0,04;$
- $R_1 = 0,04.$

Полезность альтернативы  $R_4$  максимальна, следовательно остальные альтернативы действительно хуже и задача решена правильно.

### Выводы.

Результаты исследований показали, что применение новой методики с использованием генетических алгоритмов и вычислением Чебышевской точки, дает ощутимый выигрыш во времени, и точности показателей. А также является более наглядным для ЛПР, нежели другие методы.

Результирующая Чебышевская точка имеет следующие параметры:

$a_1: 0,00;$        $a_2: 0,00;$        $a_3: 0,00;$        $a_4: 0,00;$

$a_5: 0,00;$        $a_6: 0,429;$        $a_7: 0,00;$        $a_8: 0,571;$

$L = 0,572.$

Значение переменной  $L$  в модели (19) определяет максимальное уклонение решения  $A_{ii}^*$  от границ допустимой области, поэтому оно характеризует:

Грубость решения, т.е. устойчивость к изменению коэффициентов  $b_{ij}$ ;

Величину области допустимых значений  $A_{ii}$ ;

Степень неопределенности принятого значения матрицы индивидуальных предпочтений  $A_{ii}$ .

**Список литературы:** 1. Петров Э.Г. Организационное управление городом и его подсистемами (методы и алгоритмы). Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. 144с. 2. Теория выбора и принятия решений / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов. М.: Наука, 1982. 328с. 3. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / Под ред. А. И. Половинкина. М.: Радио и связь, 1981. 344 с. 4. Эйкофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 238 с. 5. Овезгельдыев А.О., Петров К.Э. Компараторная идентификация параметров линейных моделей многофакторного оценивания // Радиоэлектроника и информатика. 1998. 2 (03). 6. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М.: Наука, 1970. 124с. 7. Овезгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. К.: Наукова думка. 2002. 161 с. 8. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. М.: Наука, 1967. – 460с. 9. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрошев, С.А. Сергеев. Х.: Основа, 1997. 112 с. 10. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы. Таганрог. 1999г. 11. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. Винница: «Универсум-Винница», 1999. 320с.

Поступила в редколлегию 10.09.2003

УДК 519.87

О.Ф. МИХАЛЬ

## ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ СЛАБО СТРУКТУРИРОВАННЫХ ОБРАЗОВ НА ЛОКАЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ НЕЧЕТКИХ АЛГОРИТМАХ

### Введение.

Задача распознавания слабо структурированных образов (РССО), приобрела актуальность в связи с развитием систем технического зрения для робототехники. Интеллектуальный контекст задачи (обучаемость систем РССО) связан с использованием методов нечеткой логики (НЛ) [1]. Представление информации на основе лингвистических переменных (ЛгП) соответствует парадигмам человеческого мышления, что является аспектом искусственного интеллекта. Прогресс в технических системах с использованием принципов НЛ сопровождается повышением уровня технических требований ко вновь разрабатываемым нечетким системам, прежде всего в части производительности. Перспективен принцип локальной параллельности (ЛП) [2, 3], позволяющий существенно экономить ресурсы используемой вычислительной системы. Цель настоящей работы - описание организации систем РССО, построенной на ЛП алгоритмах НЛ.

### 1. Распознавание образов.

Структурированность – есть наделенность структурой. На интуитивном уровне под структурой понимается совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, т.е. сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях [4]. В математике - структура есть родовое название, объединяющее понятия, применимые к множествам, произвольной природы. Для определения структуры задают отношения, в которых находятся элементы множеств, и постулируют, что отношения удовлетворяют аксиомам структуры [5]. Объекты могут быть структурированы в большей или меньшей степени, в зависимости от числа устойчивых связей. Термин “слабая структурированность” понимается нами далее в интуитивном смысле, с учетом следующего разъяснения.

Описание предметной области (ПО) есть интеллектуальный процесс, включающий отображение множества объектов ПО на элементы модели, и перевод связей между объектами на язык отношений между элементами модели. Элементы модели есть распознаваемые образы – отображения объектов ПО из пространства ПО в перцепционное пространство (ПП) (пространство восприятия); связи и отношения – это распознавательные признаки (РПр), наблюдаемые в ПП. Объект ПО всегда тождественен самому себе. ПП ограничено техническими характеристиками системы. Поэтому устойчивые связь объектов ПО отображаются во множество РПр неадекватно. Т.о. понятие слабой структурированности приобретает смысл: образ может быть назван слабо структурированным, если не все свойства соответствующего объекта ПО отображены в виде РПр при отражении пространства ПО в ПП. Поэтому, применительно к системам РССО, структурированность есть свойство распознающей системы, а не ПО.

Система РССО имеет датчики для восприятия пространства ПО с находящимися в нем объектами и получения образов объектов в ПП. Информация, находящаяся в ПП, обрабатывается: полученные значения интерпретируются как РПр. Знания, накапливаются в экспертной системой ЭС. Система обучается на наборах РПр тестовых объектов; затем заполняется наборами РПр образцовых объектов; наконец, посредством сравнения РПр, идентифицирует образ распознаваемого объекта с одним из образцовых. Этим определяются три альтернативных режима работы РССО: обучение, заполнение базы данных (БД)

и собственно распознавание. Рассмотрим более подробно структуру и процесс обучения ЭС со ссылками на рис. 1(a-u). Имеется обучающая последовательность из  $n$  объектов  $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ , каждый из которых характеризуется  $m$  РПр  $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{im}$ . РПр определяются посредством замеров, производимых на образах объектов в блоке РПр. Т.о., для ЭС  $i$ -й объект  $A_i$  существует в виде набора значений РПр  $P_{ij}$  ( $j=1,2,\dots,m$ ). На рис. 1(a) значения замеров  $j$ -го РПр для всех  $n$  объектов представлены в виде отсчетов по оси абсцисс, которые группируются ( $G_1, G_2, \dots, G_5$ ) в соответствии со структурой объектов обучающей последовательности. Группируемость наблюдается на рис. 1(a) "визуально", в виде областей сгущения отсчетов. Если обучающая последовательность является *репрезентативной*, группирование отражает определенные свойства ПО по  $j$ -му РПр. При этом любой следующий вводимый отсчет ( $P_{xy}$ ) в интуитивном смысле может быть соотнесен с одной из образовавшихся групп:  $P_{xy} \in G_3$ . "Визуально" это будет проявляться как сохранение областей сгущения.

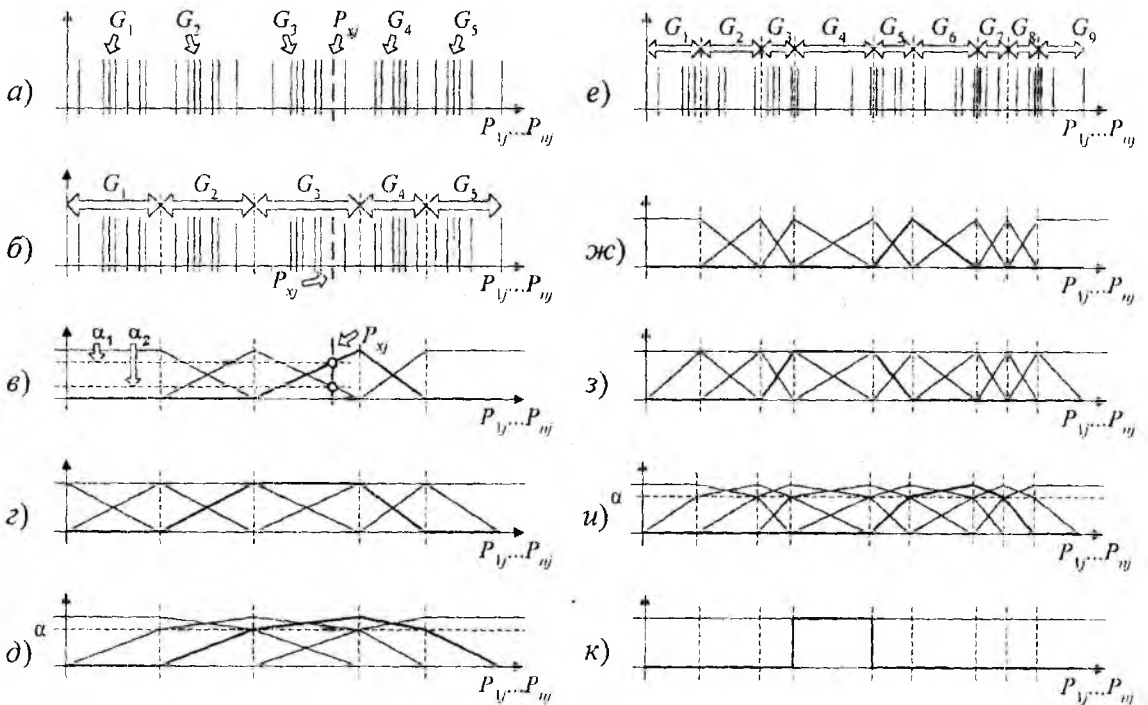


Рис. 1. Группировка значений  $j$ -го распознавательного признака (а, б, е) и построение профилей функций принадлежности термов лингвистической переменной (в-д, ж-к).

На рис. 1, б, е представлены два варианта разбиения. Исходными здесь являются заданное количество групп отсчетов  $p$ , не пересекаемость ( $G_k \cap G_l = \emptyset; k, l=1, 2, \dots, p; k \neq l$ ) и по возможности одинаковое количество  $N_r$  ( $r=1, 2, \dots, p$ ) отсчетов в группах:  $N_1=N_2=\dots=N_{(m-pq)}=q+1, N_{(m-pq+1)}=N_{(m-pq+2)}=\dots=N_p=q$ ; где  $q=[m/p]$ ; квадратными скобками обозначено взятие целой части числа. На рис. 2, б –  $p=5$ , на рис. 1, е – значение  $p=9$ . В обоих случаях  $m=32$ . Соответственно,  $q=6$  (б) и  $q=3$  (е). Объемы групп, как показано, при этом составляют (7, 7, 7, 6, 6) (б) и (4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3) (е) отсчетов. Границы между группами определены как полусуммарные значения соседних отсчетов, отнесенных к разным группам. Процедура группировки отличается однозначностью при  $p \leq m$ . При  $p > m$  процедура теряет смысл: часть групп остаются пустыми, следовательно нет возможности построить границы раздела между ними.

Остальные графики рис. 1 иллюстрируют процесс построения профилей функций принадлежности (ФП), применяемых в НЛ [1] для описания нечетких объектов и ситуаций.

Представлены, в частности, треугольный ( $\epsilon, \zeta$ ), трапециидальный ( $z, \varepsilon$ ) и сложный “двугрупирующий” ( $\delta, \iota$ ) профили ФП. Профили строятся по сгруппированным данным ( $b, e$ ) и в нечетко-логическом смысле интерпретируются как термы ЛгП, соответствующей  $j$ -му РПр. По построению, треугольных профилей ( $p-1$ ) штук, трапециидальных ( $p-2$ ), “двугрупирующих” – ( $p-3$ ), поскольку указанные профили строятся, соответственно, по двум, трем и четырем соседствующим группам отсчетов. Выбор уровня  $\alpha$  при построении “двугрупирующих” профилей ( $\delta, \iota$ ) должен осуществляться с привлечением дополнительных соображений. В остальном, нормировка оси ординат соответствует представлениям НЛ.

Выбор вида ФП для использования в ЭС определяется особенностями ПО, требованиями к точности ее описания и др. Допустим простейший прямоугольный профиль ФП ( $\kappa$ ), но применительно к ЭС он мало интересен, т.к. соответствует четкому случаю. Ниже рассмотрены ФП треугольного профиля ( $\epsilon, \zeta$ ), экономные при описании и обработке. Так, система, иллюстрируемая рис. 1  $\epsilon, \zeta$ , допускает не менее двух альтернатив.

После рассмотрения всей обучающей последовательности, разбиение на группы закончено, определены границы между группами, построены профили ФП термов ЛгП отдельных РПр, - система обучена: обладает набором критериев для классификации образцовых объектов.

## 2. Локально-параллельная экспертная система. Предварительный вариант.

НЛ система на ЛП алгоритмах тем эффективнее, чем меньше в ней промежуточных конкатенаций – деконкатенаций. Для этого НЛ операции должны быть упорядочены по форматам представления входных и выходных данных. Рассмотрим вариант ЛП реализации ЭС с БЗ применительно к задаче РССО, представленной выше.

Объект  $A_i$  характеризуется  $m$  РПр  $P_{ij}$  ( $j=1,2,\dots,m$ ), по каждому из которых строится ЛгП. При заполнении БД каждый из образцовых объектов  $A_i$  “промеряется” по каждому из РПр  $P_{ij}$ . Результат – значение РПр – попадает в один из интервалов  $G$ . Этому объекту  $A_i$  по РПр  $P_{ij}$  ставится в соответствие несколько термов ЛгП, соответствующей РПр  $P_{ij}$ ; а именно, термы с ненулевым значение ФП. При треугольных профилях таких термов не более двух. В ЛП представлении каждый из термов изображается в виде конкатенации значений РПр на каждом из интервалов  $G$ . Так, значение  $P_{xy}$  (рис. 1  $a$ ) попадает в интервал  $G_3$  ( $b$ ), при этом имеется два ненулевых терма ( $\epsilon$ ),

$$(00\dots0)(00\dots0)(\alpha_1)(00\dots0)(00\dots0)_2; (00\dots0)(00\dots0)(\alpha_2)(00\dots0)(00\dots0)_2; \quad (1)$$

(числа условно представлены в двоичной системе счисления, отдельные сегменты выделены скобками), в которых  $P_{xy}$  соответствуют ненулевые значения ФП:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В таком виде к ним применимы ЛП операции НЛ. Поскольку  $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$ , запись (1) информационно избыточна. Ситуация однозначно описывается указанием номера интервала и одного из значений ФП, т.е. парой  $(G, \alpha)$ . Указанные данные и целесообразно конкатенировать в РгП. Элементы в паре  $(G, \alpha)$  несут разную нагрузку по точности значения, соответствующего РПр:  $G$  указывает группу (грубый признак),  $\alpha$  – уточняет значение внутри группы (точный признак). Поиск по БД целесообразно вести сначала по  $G$  (сужение области поиска), а затем по  $\alpha$  (уточнение в рамках суженной области). Для реализации такой схемы удобно конкатенировать  $G$  и  $\alpha$  в разные РгП. Каждое РгП будет содержать при этом информацию по нескольким РПр.

На рис. 2 представлены профили термов ЛгП, соответствующих трем РПр. Вертикальными пунктирными линиями обозначены значения РПр, измеренные для нескольких объектов. Четыре из них ( $A_1 - A_4$ ) образцовые, образующие БД, пятый ( $A_5$ ) и шестой ( $A_6$ ) – распознаваемые. Интервалы значений РПр, в которые попали отсчеты значений  $A_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ), обозначены под осью абсцисс литерами  $G_j$  ( $j$  – номер интервала слева направо).

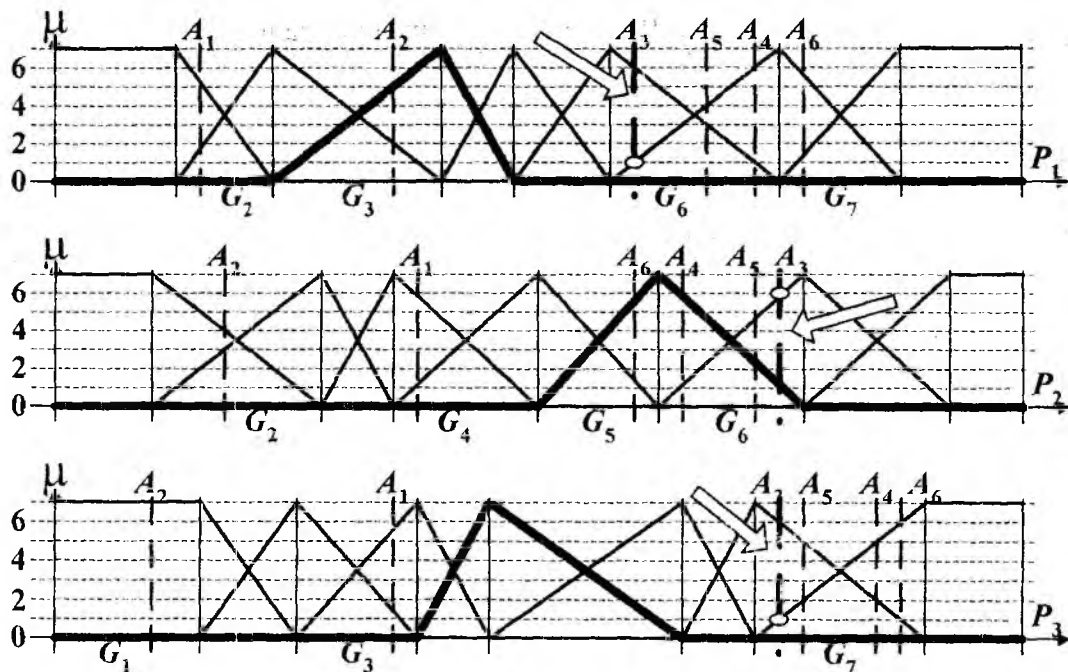


Рис. 2. Профили термов лингвистических переменных распознавательных признаков  $P_1 - P_3$ , с отсчетами значений, соответствующих объектам  $A_1 - A_6$ .

Конкатенации значений РПр имеют вид (см. левую колонку, одинарную индексацию):

$$\begin{array}{ll}
 A_1(G)=A_{11}(G)=(010)(100)(011)_2; & A_{21}(G)=(001)(011)(011)_2; \\
 A_2(G)=A_{12}(G)=(011)(010)(001)_2; & A_{22}(G)=(011)(001)(001)_2; \\
 A_3(G)=A_{13}(G)=(110)(110)(111)_2; & A_{23}(G)=(101)(110)(110)_2; \\
 A_4(G)=A_{14}(G)=(110)(110)(111)_2; & A_{24}(G)=(110)(101)(111)_2; \\
 A_5(G)=A_{15}(G)=(110)(110)(111)_2; & A_{25}(G)=(110)(110)(110)_2; \\
 A_6(G)=A_{16}(G)=(111)(101)(111)_2; & A_{26}(G)=(110)(101)(111)_2;
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 A_1(\alpha)=A_{11}(\alpha)=(010)(001)(101)_2; & A_{21}(\alpha)=(111)(100)(011)_2; \\
 A_2(\alpha)=A_{12}(\alpha)=(101)(011)(111)_2; & A_{22}(\alpha)=(010)(111)(111)_2; \\
 A_3(\alpha)=A_{13}(\alpha)=(001)(110)(001)_2; & A_{23}(\alpha)=(100)(010)(100)_2; \\
 A_4(\alpha)=A_{14}(\alpha)=(110)(001)(101)_2; & A_{24}(\alpha)=(001)(100)(011)_2; \\
 A_5(\alpha)=A_{15}(\alpha)=(100)(101)(010)_2; & A_{25}(\alpha)=(011)(001)(101)_2; \\
 A_6(\alpha)=A_{16}(\alpha)=(001)(110)(110)_2. & A_{26}(\alpha)=(110)(010)(011)_2.
 \end{array} \quad (2)$$

Кратко поясним структуру записи. Сегменты, соответствующие  $P_1, P_2, P_3$  упорядочены слева направо. В  $A_3(G)$  двоичное представление  $(110)(110)(111)_2$  соответствует посегментному десятичному представлению  $(6)(6)(7)_{10}$ . Сопоставим с рис. 3: объект  $A_3$  по РПр  $P_1$  и  $P_2$  находится в шестой группе ( $G_6$ ), по РПр  $P_3$  – в седьмой группе ( $G_7$ ). Принадлежность к соответствующим группам на рисунке выделена стрелками. В  $A_3(\alpha)$  двоичное представление  $(001)(110)(001)_2$  соответствует посегментному десятичному представлению  $(1)(6)(1)_{10}$ . Сопоставим с рис. 2: объект  $A_3$  по РПр  $P_1$  и  $P_3$  имеет значение восходящего фронта ФП  $\bar{\mu}=1$ , по РПр  $P_2$  – значение  $\bar{\mu}=6$ . Точки пересечения восходящих фронтов с соответствующими уровнями  $\bar{\mu}$  выделены кружками.

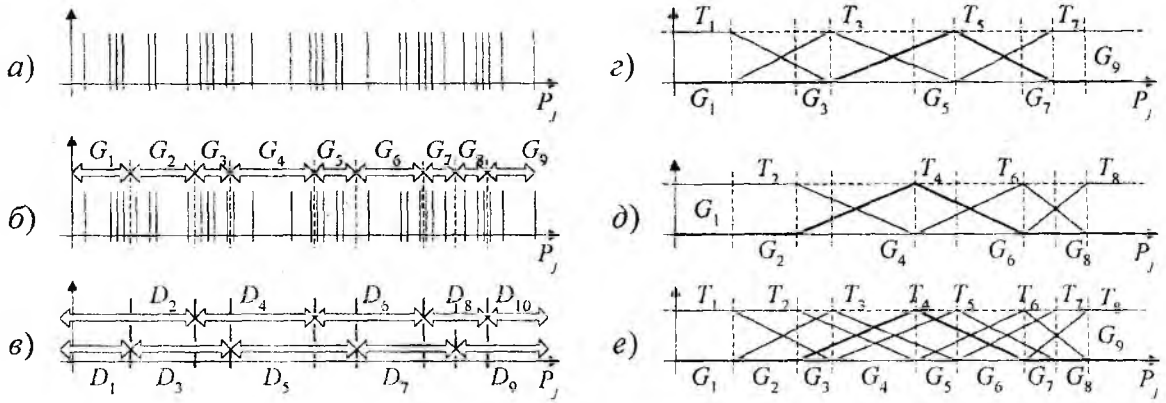


Рис. 3. Модифицированная лингвистическая переменная с двумя перекрывающимися группами термов. Группировка значений распознавательного признака (а-в) и построение профилей функций принадлежности (г-е).

Распознавание объекта  $A_5$  осуществляется сравнением с образцовыми объектами сначала по грубому признаку, затем - по точному. Сравнение по грубому признаку состоит в сопоставлении числа  $A_5(G)$  последовательно с числами  $A_1(G) - A_4(G)$ . Равенство чисел соответствует совпадению во всех сегментах; неравенство – расхождение распознаваемого набора признаков с образцовым хотя бы в одном сегменте. В рассматриваемом примере  $A_5(G) = A_3(G)$  и  $A_5(G) = A_4(G)$ . Таким образом, на этапе грубого сравнения поле поиска в БД сузилось до двух объектов:  $A_3$  и  $A_4$ .

Сравнение по точному признаку состоит в сопоставлении значений ФП. Как отмечалось, благодаря тому, что известен аналитический вид профиля ФП, для заданного интервала может указываться только одно отсчетное значение. В рассматриваемом примере принято, что указывается значение ФП по восходящему профилю. Значения РПр по грубому признаку совпадают; это значит, что в  $A_i(G)$  совпадают интервалы  $G_j$ , для которых указаны значения точных признаков в  $A_i(\alpha)$ . Поэтому, применительно к рассматриваемому примеру, значения ФП в  $A_5(\alpha)$  могут непосредственно посегментно сопоставляться со значениями в  $A_3(\alpha)$  и  $A_4(\alpha)$ . В качестве меры близости удобно использовать абсолютное расстояние по Хеммингу:

$$\rho(A, B) = \sum_{i=1}^p |\mu(a_i) - \mu(b_i)|, \quad (3)$$

где  $A, B$  – сравниваемые объекты (образцовый и распознаваемый);

$p$  – число РПр,;

$i$  – текущий номер РПр;

$a_i$  и  $b_i$  – измеренные значения текущего РПр, ФП соответствующих РПр.

Данная процедура не содержит операций деления (как для относительного расстояния) и извлечения корня (как для расстояния в метрике Евклида), что удобно для ЛП варианта реализации. Ниже представлено пошаговое описание и тестовый пример ЛП варианта соответствующего алгоритма.

**Обозначения.** Символы  $\wedge, \vee$  и  $\langle xor \rangle$  обозначают побитовые логические операции;

$q$  – длина сегмента;  $(\dots \gg q)$  – поразрядный сдвиг на  $q$  бит в сторону младших разрядов;  $i, p$  – текущее и предельное значения индекса цикла суммирования (см. (2)). Применительно к ЛП алгоритмам,  $p \leq r/q$ , где  $r$  – разрядность вычислительного средства, на котором реализуется рассматриваемый ЛП алгоритм. Для отдельного манипулирования сегментами, в ЛП алгоритмах константы используются Константы в  $E_0, E_1, E_2, L_1, L_2$ , формирование которых описаны в [2, 3]. Для результатов прореживания РПГ  $A$  использу-

ются обозначения  $A_1$  и  $A_2$ , не тождественные с обозначениями, примененными на рис. 3 для отсчетов  $A_1$  и  $A_2$ .

*Локально-параллельный алгоритм нахождения абсолютного расстояния Хемминга.*

Шаг 1. Прореживание исходных РгП:

$$A1=A \wedge E_1(1); A2=A \wedge E_2(1); B1=B \wedge E_1(1); B2=B \wedge E_2(1);$$

Шаг 2. Разметка одной из пар РгП (установка единиц в младших разрядах пустых сегментов):  $A1=A1 \vee L_2; A2=A2 \vee L_1$ .

Шаг 3. Формирование полумасок, соответствующих

$$“A > B” : M_1=(A1-B1) \wedge L_2; M_2=(A2-B2) \wedge L_1;$$

Шаг 4. Формирование полной маски, соответствующей

$$“A > B” : M=M_1 \vee M_2; M=M-(M >> n);$$

Шаг 5. Формирование сопряженной маски, соответствующей

$$“A \leq B” : \bar{M} = M < xor > E_0;$$

Шаг 6. Формирование посегментного модуля разности:

$$S = ((A \wedge M) - (B \wedge M)) \vee ((B \wedge \bar{M}) - (A \wedge \bar{M}));$$

Шаг 7. Начало цикла суммирования сегментов:  $i=1$ .

Шаг 8. Прореживание частичной суммы:  $S_1=S \wedge E_1(i); S_2=S \wedge E_2(i);$

Шаг 9. Частичное суммирование:  $S=S_1+(S_2 >> in);$

Шаг 10. Приращение  $i: i++$ . При  $i < p$  переход на Шаг 8; иначе возврат текущего значения  $S$  в качестве результата. Конец алгоритма.

### 3. Локально-параллельная экспертная система. Окончательный вариант.

Рассмотренный *предварительный* вариант ЛП организации ЭС удобен для демонстрации принципов кодировки информации, двухуровневого отбора (раздельно по грубым и точным признакам) и ЛП алгоритма определения абсолютного расстояния Хемминга. Ограничение представленного варианта состоит в *детерминированности* отбора по грубому признаку. В нем могут теряться некоторые потенциально правильные решения. Поясним сказанное примером.

Рассмотрим образ  $A_6$ . Как показано на рис. 2, его отсчеты расположены рядом с отсчетами  $A_4$  и принадлежат к одним и тем же термам, построенным на соседствующих группах:  $P_1:(G_6, G_7)$ ,  $P_2:(G_5, G_6)$  и  $P_3:(G_7, G_8)$ . При этом разности значений ФП по соответствующим РПр составляют 0, 0 и 1; т.о. абсолютное расстояние Хемминга равно  $(1)_{10}$ . Однако, как следует из (2), ни один из образцовых образов  $A_1 - A_4$  при отборе по грубому признаку не будет выбран для последующего проведения сопоставления по точному признаку. Это связано с тем, что они принадлежат к разным группам отсчетов. Так что, хотя  $A_4$  и  $A_6$  расположены рядом и имеют *близкие* значения ФП в *совпадающих* термах ЛгП, но по РПр  $P_1: A_6 \in G_7, A_6 \in G_7$ ; по РПр  $P_2: A_4 \in G_6, A_6 \in G_5$ ; только по РПр  $P_3: A_4, A_6 \in G_7$ ; а для выбора по грубому признаку требуется полное совпадение.

Отмеченное ограничение принципиально отсутствует, если сравнение распознаваемого образа с образцовыми производится непосредственно по профилям ФП. Термы в представлении вида (1) несут полную информацию, что исключает потерю решений. Однако, процедура сравнения при этом становится одноэтапной и чрезвычайно громоздкой, поскольку включает полный перебор БД по полному набору признаков. Ограничение можно обойти, применив *модифицированное* разбиение областей признаков на группы и соответствующее построение нескольких (не менее двух) *перекрывающихся* наборов термов. По существу, речь идет о модифицированном избыточном определении набора термов ЛгП, при котором сохраняется двухэтапность (сравнение по грубым и точным признакам) процедуры сопоставления образов. Предлагаемый подход иллюстрируется рис. 3, на примере одного РПр  $P_j$ .

Исходные данные - набор из 33 отсчетов  $P_j$  - соответствуют представленным на рис. 1, а. Для построения наборов из  $n$  термов с двукратным перекрытием (т.е. в общей сложности  $2n$  термов) требуется разбить область  $P_j$  на  $2n+1$  не перекрывающихся соседствующих интервалов. Выше рассматривалась процедура разбиения области на интервалы с по возможности равномерным распределением отсчетов. При  $n=4$  требуется 9 интервалов:  $G_1, G_2, \dots, G_9$ . Такое разбиение с построением границ раздела по среднему арифметическому соседних отсчетов, относящихся к смежным интервалам, представлено на рис. 1, е и рис. 3, б.

Как отмечалось, построение границ соответствует этапу обучения ЭС. Далее по разбиению области  $P_j$  (рис. 3, в) однозначно строятся перекрывающиеся наборы профилей ФП термов (рис. 3, г - первый (нечетный) набор, д - второй (четный) набор, е - два набора вместе) ЛгП, соответствующей РПр  $P_j$ . В рассматриваемом примере принята сквозная нумерация термов, слева направо, с расстановкой обозначений  $T_1, T_2, \dots, T_8$  на рис. 3, г-е вблизи вершин профилей соответствующих ФП. Способ построения профилей ФП понятен из рис. 3, г-е. Все термы кроме первого (в нечетном наборе) и последнего (в четном) - включают 4 интервала:  $T_i: (G_{i-1}, G_i, G_{i+1}, G_{i+2})$ . Первый и последний термы строятся по 3 интервалам. Такая структура аналогична (является частным случаем,  $\alpha = M/2$ ) рассмотренной выше (рис. 1, и) системе "двухтреугольных" профилей ФП. При этом основная часть области значений  $P_j$  перекрывается четырехкратно (группы  $G_3-G_7$ , рис. 3, е), ближе к периферии перекрытие уменьшается ( $G_2, G_8$  - трехкратное;  $G_1, G_9$  - однократное), что компенсируется "более определенными" значениями ФП. Особенность представленной структуры - невозможность пропуска решений, типа описанного выше.

При ЛП представлении информации удобно ввести парную нумерацию групп  $D_1-D_{10}$ , рис. 3 в. При этом описание принадлежности некоторого отсчета определенной группе значений области  $P_j$  сводится к двукратному применению системы описания, согласно рассмотренному выше предварительному варианту. Проиллюстрируем сказанное примером, рис. 4, построенным с использованием данных (2) (обе колонки, двойная индексация).

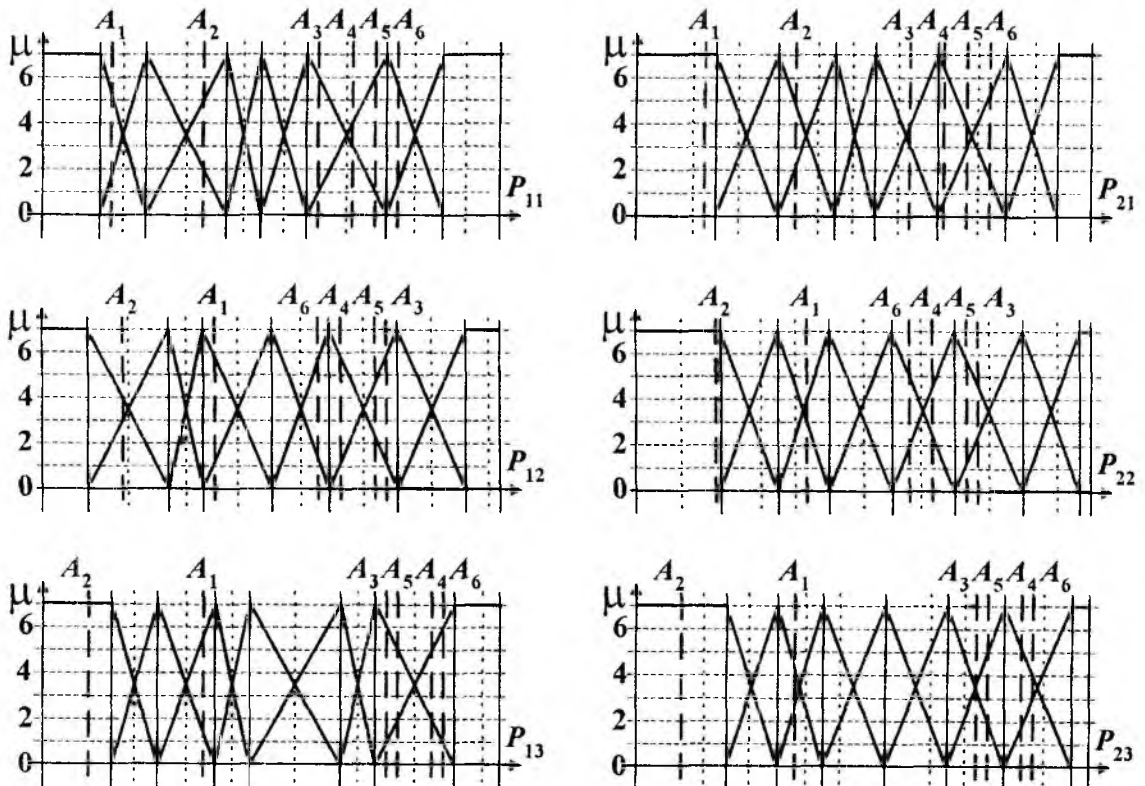


Рис. 4. Профили термов лингвистических переменных с двукратным перекрытием по трем распознавательным признакам.

Сопоставление пары  $(A_4, A_6)$  осуществляется в два этапа:  $(A_{14}, A_{16})$  и  $(A_{24}, A_{26})$ . Легко видеть, что  $A_{14} \neq A_{16}$  (не совпадают два сегмента) и  $A_{24} = A_{26}$ . Сказанное соответствует на рис. 5 попаданию отсчетов  $A_4$  и  $A_6$  на графиках  $P_{11}$  и  $P_{12}$  в разные группы, на остальных графиках – в одну группу. Поэтому хотя бы по одному набору признаков  $(P_{21}-P_{23})$  образ  $A_4$  будет выбран для точного сравнения с  $A_6$ .

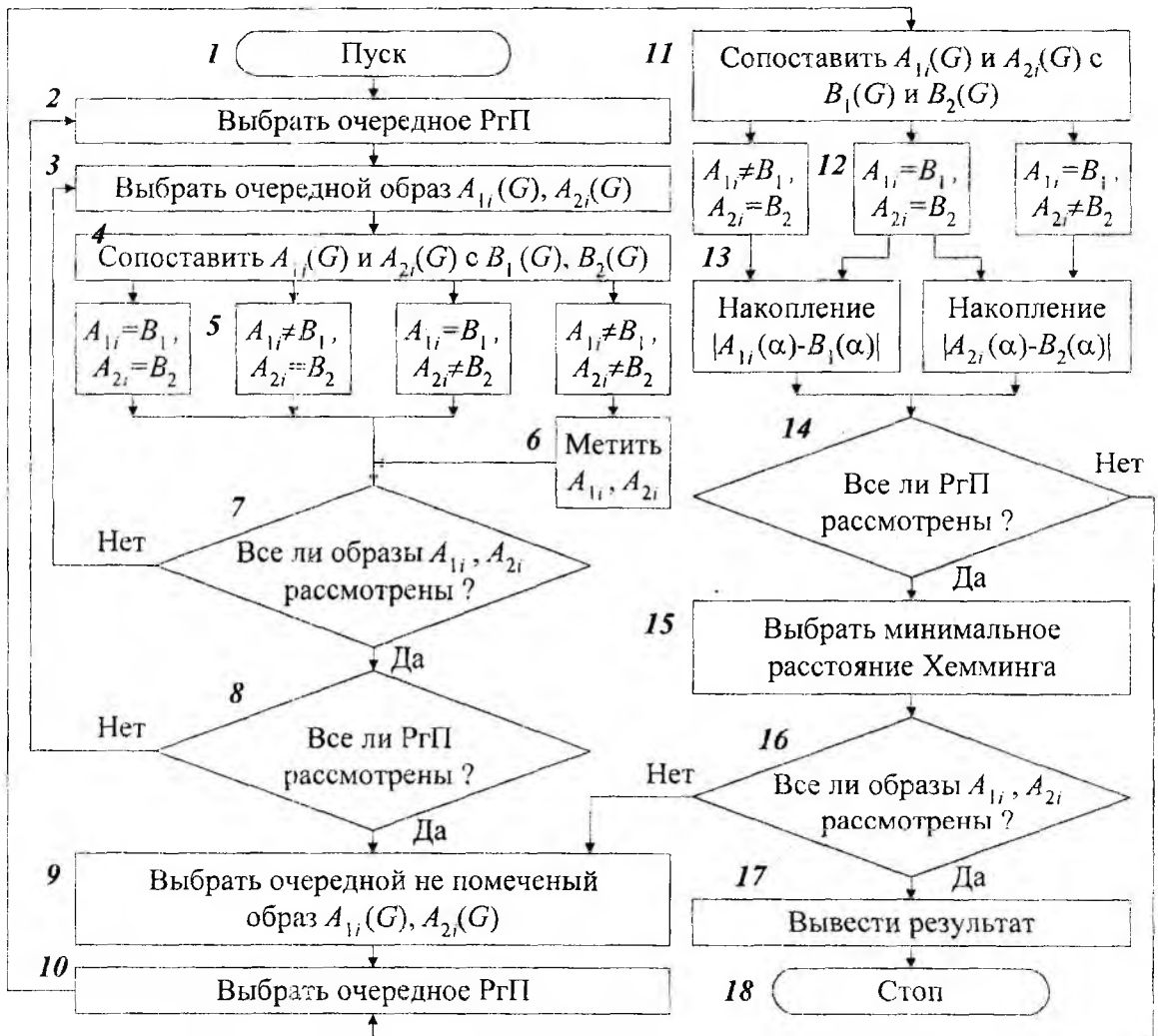


Рис. 5. Блок-схема логической сети алгоритма сопоставления образов.

Алгоритм сопоставления удобно изобразить в виде логической сети рис. 5, аналогично рассмотренному в [6]. Объект, подлежащий распознаванию  $(B_1, B_2)$ , сопоставляется с образцовыми объектами  $(A_{1i}, A_{2i})$ . Блоки 1-8 соответствуют грубому сравнению  $(A_{1i}(G) с B_1(G) и A_{2i}(G) с B_2(G))$ , 9-18 – точному  $(A_{1i}(α) с B_1(α) и A_{2i}(α) с B_2(α))$ . Обращает на себя внимание двукратное сопоставление  $(A_{1i}, A_{2i}) с (B_1, B_2)$ : блоки 4-5 и 11-12. Вызвано оно следующим. Как отмечалось, на этапе отбора по грубому признаку осуществляется отсеивание образцовых объектов посредством простановки меток (блок б); на этапе точного сравнения оставленные (не помеченные) образцовые объекты рассматриваются повторно. При этом если имеется большое число РП, под каждое из  $A_{1i}, A_{2i}, B_1,$  и  $B_2$  имеется несколько РгП. При грубом сравнении сопоставление идет по каждому из РгП раздельно, причем цикл перебора образцовых объектов (3-7) вложен в цикл перебора РгП (2-8), а не наоборот; поскольку при этом в процессе перебора при каждом следующем номере РгП объем образцовых объектов сокращается. При точном сравнении цикл по РгП (10-14) является внутренним, а цикл выбора образцовых объектов (9-16) – внешним. При

этом расчет расстояния Хемминга (3) (накопление модулей разностей 13) осуществляется только для одной из групп (при совпадении по грубому признаку  $A_{1i}(G) \neq B_1(G)$ ,  $A_{2i}(G) = B_2(G)$  или  $A_{1i}(G) = B_1(G)$ ,  $A_{2i}(G) \neq B_2(G)$  12), либо для обеих групп (при совпадении по грубому признаку  $A_{1i}(G) = B_1(G)$ ,  $A_{2i}(G) = B_2(G)$  12). Таким образом, сравнение по грубому признаку осуществляется двукратно: первый раз в процессе отсеивания 5, второй раз на уже отобранном ограниченном подмножестве 12.

В результате работы алгоритма выбирается минимальное расстояние Хемминга (блок 15) и, соответствующий, образцовый объект  $A_i$ , который отождествляется с распознаваемым объектом  $B$ .

### **Выводы.**

Исследованы принципы организации нечеткой системы распознавания слабо структурированных образов при реализации на локально-параллельных алгоритмах. Предложен метод построения термов лингвистических переменных, обеспечивающий приблизительно (эмпирически) равномерное распределение образцовых объектов по группам распознавательных признаков. Предложен двухуровневый вариант системы, в котором осуществлено распознавание сначала по грубым, затем по точным признакам, с форсированным сокращением объема просматриваемого материала, содержащегося в БД, по мере последовательного перехода к новым распознавательным признакам. Предложен локально-параллельный вариант алгоритма определения минимума абсолютного расстояния Хемминга для построения критерия сходства распознаваемого объекта с образцовым. Рассмотренная система реализована в сокращенном варианте, ограниченном по количеству распознавательных признаков.

**Список литературы:** 1. Л. Заде. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: "Мир". 1976. 2. О.Ф. Михаль, О.Г. Руденко. Принцип локальной параллельности в задачах обработки нечеткой информации. Расширенный набор операций. // Доповіді НАН України 2000. № 1. С. 75-78. 3. О.Ф. Михаль, О.Г. Руденко. Принципы организации систем нечеткого регулирования на однородных локально-параллельных алгоритмах. // "Управляющие системы и машины". 2001. №3. С.3-10. 4. БСЭ. М.: "Советская энциклопедия", 1976. Т.24, Кн.1. С.598. 5. Математическая энциклопедия. Под ред. И.М.Виноградова. Т.5, М.: "Советская энциклопедия". 1985. С.249. 6. О.Ф. Михаль. Локально-параллельные однородные алгоритмы нечетких операций, основанных на процедурах сложения, вычитания и сравнения. // "Вестник ХГПУ", Новые решения в современных технологиях, Харьков, 2000. Вып. 118. С. 6-9. 7. О.Ф. Михаль, О.Г.Руденко. Организация эволюционных нечетких экспертных систем на локально-параллельных алгоритмах. // Международная конференция по индуктивному моделированию "International Conference on Inductive Modelling (ICIM - 2002). Львов. Т.3, С. 79 - 84.

*Поступила в редколлегию 22.01.2003.*

УДК 519.95:612.018

С.И. ЛАПТА

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРОРАЛЬНОГО ТЕСТА ТОЛЕРАНТНОСТИ К ГЛЮКОЗЕ С ФИЗИОЛОГИЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ АБСОРБЦИИ ГЛЮКОЗЫ В КИШЕЧНИКЕ И ЕЕ ВОЗМОЖНЫЕ КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Данная статья посвящена построению и анализу математической модели перорального теста толерантности к глюкозе (ПТТГ) с физиологической функцией абсорбции глюкозы в кровь из желудочно-кишечного тракта человека. Этот тест уже давно используется в клинической практике как для диагностики сахарного диабета и близких к нему состояний с нарушенной толерантностью к глюкозе, так и для диагностики нарушений всасывания глюкозы в кишечнике. Он состоит в измерении уровня глюкозы в цельной капиллярной крови натощак (который составляет 60-100 мг% – 60-100 мг глюкозы на 100 мл крови), и затем еще несколько раз после приема внутрь стандартной глюкозной нагрузки величиной 75 г. В норме кривая нарастания уровня гликемии максимально поднимается на 30-60 минуте после перорального приема глюкозы до 120-140 мг% и возвращается к исходному значению через 2-2,5 часа [1]. Характерная слабоосцилляционная динамика изменения уровня гликемии при проведении этого теста в норме со специфической гипогликемической фазой представлена на рис. 1 (кривая  $g_a$ ).

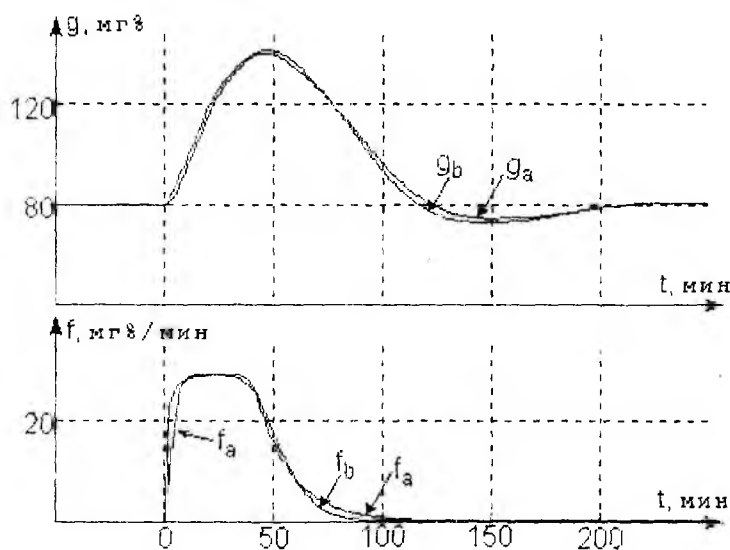


Рис. 1

Известно, что форма и характер гликемической кривой перорального глюкозотолерантного теста (рис. 1, кривая  $g_a$ ) зависят от множества различных факторов: интенсивности поступления в кровь экзогенной глюкозы, состояния системы регуляции уровня глюкозы в крови (состояния печени, поджелудочной и эндокринных желез, вегетативной нервной системы и др.). Поэтому при исследовании функции всасывания глюкозы в кишечнике нейрогормональные факторы, влияние которых ранее не представлялось возможным учесть, оказались

столь принципиальной проблемой, что ПТТГ был исключен из гастроэнтерологической практики. Вместо него для этой цели в последнее время стали применять тест с *D*-ксилозой [2]. Считают, что этот тест является удовлетворительным скрининговым тестом для определения всасывания углеводов. Однако его критерии очень приближенны и, главное, неизвестно, насколько адекватно всасывание *D*-ксилозы характеризует всасывание глюкозы.

ПТТГ, как средство ранней диагностики сахарного диабета, весьма подробный в первоначальной разработке, в дальнейшем в клинической практике все более упрощался [3,4]. Такое скептическое отношение к нему обусловлено тем, что хотя вся его гликемическая кривая как-то качественно и отражает состояние системы регуляции углеводного обмена, отдельные гликемические значения и их комбинации оказались диагностически незначимыми для дифференцирования различных нарушений толерантности к глюкозе. Отсюда был сделан вывод о неэффективности ПТТГ и о нецелесообразности его использова-

ния. Однако, очевидно, следует говорить о неумении извлечь нужную информацию из данных этого теста. По-видимому, вместо непосредственных гликемических данных ПТТГ следует разумным образом находить, определяемые по ним, другие величины, значения которых могут служить диагностическими параметрами состояния системы регуляции углеводного обмена. Роль таких параметров могут играть, например, значения коэффициентов соответствующей математической модели, подогнанной к гликемическим данным обследуемого пациента.

Среди большого множества математических моделей углеводного обмена либо моделей динамики гликемии, обсуждавшихся в литературе, лишь немногие могут действительно воспроизводить гликемическую кривую ПТТГ, включая ее возможную гипогликемическую фазу. Физиологически адекватной из них является единственная модель, предложенная автором в работе [5] и обобщенная позже в [6]. В отличие от остальных, по сути демонстрационных моделей, в ней реально учтена доза глюкозной нагрузки. Эта модель представляет собой дифференциально-разностное уравнение 1-го порядка с запаздывающим аргументом относительно уровня концентрации глюкозы в крови  $g(t)$ :

$$\begin{aligned} g'(t) &= (1 - \alpha)f(t) - \beta^- (g(t - \tau^-) - g_b) - \gamma Es(g(t - 1) - g^*) - \mu Es(g(t - 1) - g_u), & t \geq 0, \\ g(t) &= \phi(t) = g_b, & -\tau^- \leq t \leq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время в минутах, индекс “-” берется всюду при положительных значениях отклонения уровня гликемии  $g(t)$  от его базального значения  $g_b$ , а “+” при его отрицательных значениях, в соответствии с направлением изменения уровня гликемии при этом;

$\alpha$  – коэффициент интенсивности утилизации глюкозы, контролируемой инсулином, при ее экзогенном поступлении;

$\beta^-$  и  $\tau^-$  – коэффициент интенсивности и время запаздывания в гипогликемической регуляции, осуществляемой инсулином при гипергликемических отклонениях уровня глюкозы в крови от его базального значения;

$\beta^+$  и  $\tau^+$  – коэффициент интенсивности и время запаздывания в гипергликемической регуляции при гипогликемических отклонениях, осуществляемой контррегуляторными гормонами в процессах гликогенолиза и глюконеогенеза;

$g^*$ ,  $g_u$  – почечный порог глюкозурии и порог инсулиннезависимой утилизации глюкозы соответственно;

$\gamma > 0$  и  $\mu > 0$  – параметры, характеризующие их интенсивности;

$Es(z) = ze(z)$ , где  $e(z)$  – единичная функция Хевисайда;

$\phi(t)$  – начальная функция;

$f(t)$  – интенсивность поступления в кровь экзогенной глюкозы, характер которого может быть как пероральным, так и внутривенным.

В случае ПТТГ  $f(t)$  – функция всасывания глюкозы в кишечнике. Ранее ее представляли гипотетически: прямоугольным импульсом [7], экспоненциально убывающей функцией [8] либо центральной частью гауссовой кривой [5], что весьма противоречило физиологическим представлениям.

С целью повышения физиологической адекватности модели (1) найдем действительный вид функции всасывания глюкозы в кишечнике. Для этого построим вспомогательную математическую модель этого процесса.

Известно [9], что всасывание глюкозы происходит в основном в тонкой кишке, куда она поступает из желудка, особенно в ее проксимальных (ближних к желудку) отделах: в двенадцатиперстной и тощей кишках. В желудок глюкоза попадает практически сразу по-

сле ее перорального приема и, почти не задерживаясь в нем, проходит в кишечник. Всасывание глюкозы начинается сразу при ее попадании в тонкую кишку.

Биохимический механизм процесса абсорбции глюкозы в кишечнике также известен. Согласно современным представлениям [10,11], всасывание глюкозы в кровь из кишечного тракта происходит через два одноклеточных слоя-барьера, разделенных межклеточным интерстициальным пространством (рис.2).

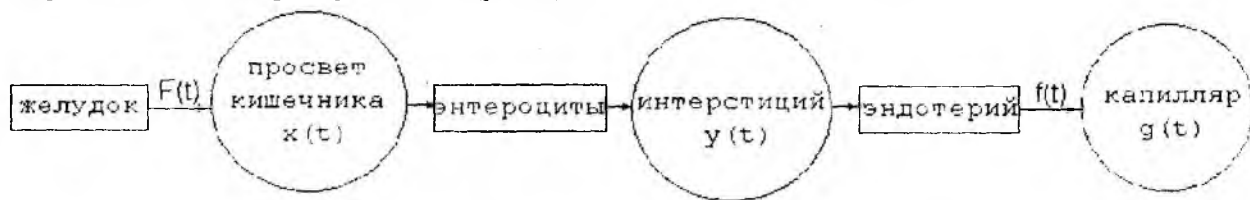


Рис. 2

Первый из них представляет собой слой энтероцитов слизистой кишечника, второй – эндотерий (стенку капилляра). Соответственно наличию двух барьеров между просветами кишечника и капилляра и сам процесс поступления глюкозы в кровь происходит в два этапа: непосредственно абсорбция глюкозы через слой энтероцитов в интерстиций и реабсорбция глюкозы из интерстиция в капилляр через эндотерий. Механизмы этих элементарных процессов принципиально различаются между собой.

Трансцеллюлярный перенос глюкозы через слой энтероцитов происходит  $Na^+$ -зависимым вторичным активным транспортом посредством ферментов-белков против градиента глюкозы [10]. Его интенсивность не зависит от концентрации глюкозы в интерстиции, а определяется лишь ее концентрацией в просвете кишечника (прямо пропорциональна ей в предположении неограниченного числа ферментов-переносчиков во внутриклеточном пространстве энтероцитов). Естественная ограниченность концентрации ферментов-переносчиков глюкозы в энтероцитах обуславливает эффект насыщения процесса абсорбции глюкозы на первом барьере.

Трансцеллюлярный транспорт глюкозы через эндотерий осуществляется диффузией, обусловленной разностью эффективных давлений реабсорбции (разностью между онкотическим и гидростатическим давлениями) в капилляре и в интерстиции [11]. Этот процесс также носит активный характер и происходит против градиента концентрации глюкозы с помощью других ферментов-белков. Его интенсивность не зависит от концентрации глюкозы в капилляре, а определяется, прежде всего, концентрацией ферментов-переносчиков глюкозы в эндотерии и концентрацией глюкозы в интерстиции, при ее небольших значениях. Поэтому зависимость интенсивности этого процесса от концентрации глюкозы в интерстиции, как впрочем и всех ферментативно определяемых процессов, также имеет плато насыщения.

Для упрощения задачи моделирования абсорбции глюкозы в кишечнике мы не будем рассматривать геометрическую структуру и размеры просветов тонкого кишечника и капилляров, размеры и объемы энтероцитов, эндотерия и интерстиция, их внутреннее строение, а ограничимся лишь приведенным простым физиологическим описанием транспорта глюкозы через энтероциты и эндотерий. Такой подход позволяет построить двухкомpartmentную функционально-феноменологическую математическую модель всасывания глюкозы в желудочно-кишечном тракте, которая воспроизводит лишь аналитическую связь и динамику изменения концентрации глюкозы в кишечнике, интерстиции и капилляре.

Поскольку, в конечном счете, нас интересует интенсивность поступления экзогенной глюкозы в кровеносное русло, удобно количество глюкозы в кишечнике и в интерстиции относить не к собственным объемам, а нормировать их на 100 мл крови. Обозна-

чим нормированные таким образом количества глюкозы в первом и во втором компар-  
тментах через  $x(t)$  и  $y(t)$ , соответственно.

Перорально принятая глюкоза поступает в первый компартмент с интенсивностью  $F(t)$ , абсорбируется из первого компартмента во второй и реабсорбируется из второго компартмента в кровоток с интенсивностью  $f(t)$ . Хотя ферментативно обусловленные процессы абсорбции глюкозы на энтероцитах и ее реабсорбции на эндотерии имеют различную природу, математически они описываются однотипно. Действительно, скорости транспорта глюкозы через первый и второй барьеры, соответственно, можно представить в виде:

$$A(1 - e^{-\delta x}), \quad B(1 - e^{-\beta y}),$$

который соответствует физиологическим представлениям. При этом скорость переноса глюкозы из левого компартмента в правый не зависит от ее количества в правом компар-  
тменте. Эта скорость транспорта прямо пропорциональна концентрации глюкозы в левом компартменте при небольших ее значениях или при малых величинах параметра процесса  $\delta$  ( $\beta$ ). При неограниченном возрастании концентрации глюкозы в левом компартменте интенсивность ее перехода в правый компартмент достигает максимальной величины, равной  $A$  ( $B$ ). В соответствии с приведенными соотношениями динамика изменения уровня гликемии в первом и во втором компартментах и интенсивность поступления ее в третий компартмент, которую обозначим через  $f(t)$ , описываются системой дифференци-  
альных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(t) - A(1 - e^{-\delta x}), & (2) \\ \frac{dy}{dt} = A(1 - e^{-\delta x}) - B(1 - e^{-\beta y}), & (3) \\ f(t) = \left( \frac{dg}{dt} \right)_{\text{экз}} = B(1 - e^{-\beta y}). & (4) \end{cases}$$

Поскольку интересующая нас функция экзогенного поступления глюкозы в третий компартмент  $f(t)$  определяется по формуле (4) только через функцию  $y(t)$ , задача сводится к нахождению решения нормальной системы двух обыкновенных нелинейных диф-  
ференциальных уравнений 1-го порядка (2), (3) с начальными условиями, которые разумно принять в виде:  $x(0) = 0$ ,  $y(0) = 0$ . Известно [12], что для обеспечения существования и единственности решения такой задачи Коши правые части уравнений системы должны удовлетворять определенным условиям теоремы Пикара, которые в данном случае выполняются при условии непрерывности функции  $F(t)$ .

Сначала следует найти общее решение первого уравнения системы (2)-(4), содержащее только одну неизвестную функцию  $x(t)$ . Это неоднородное дифференциальное уравнение 1-го порядка при малых значениях параметра  $\delta \rightarrow 0$  вырождается в линейное неод-  
нородное дифференциальное уравнение

$$\frac{dx}{dt} + A\delta x = F(t),$$

решение которого, как известно, находится методом вариации произвольной постоянной Лагранжа. Поэтому можно ожидать, что и более общее дифференциальное уравнение (2) можно решить этим же способом. Сначала находим общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = -A(1 - e^{-\delta x}), \quad (5)$$

Решение этого дифференциального уравнения 1-го порядка с разделяющимися переменными имеет вид

$$x(t) = \frac{1}{\delta} \ln(1 + C e^{-\delta A t}), \quad (6)$$

где  $C$  – произвольная постоянная. Согласно методу вариаций произвольной постоянной Лагранжа решение неоднородного уравнения (2) будем искать в том же виде (6), считая, что  $C$  является функцией аргумента  $t$ :  $C = C(t)$ . Эта функция подлежит определению из условия выполнения уравнения (2). Для нее получаем линейное неоднородное дифференциальное уравнение 1-го порядка

$$C'(t) - \delta F(t)C(t) = \delta F(t)e^{\delta A t},$$

решение которого находим тем же методом вариации произвольной постоянной Лагранжа:

$$C(t) = C e^{\int_0^t F(s) ds} + \delta e^{\int_0^t F(s) ds} \int_0^t F(u) e^{-\delta A u - \delta \int_0^u F(s) ds} du,$$

где  $C$  – произвольная постоянная.

Подставив эту функцию в формулу (6) вместо постоянной  $C$ , получим общее решение уравнения (2):

$$x(t) = \frac{1}{\delta} \ln \left[ 1 + C e^{\int_0^t F(s) ds - \delta A t} + \delta e^{\int_0^t F(s) ds - \delta A t} \int_0^t F(u) e^{-\delta A u - \delta \int_0^u F(s) ds} du \right].$$

Его частное решение при начальном условии  $x(0) = 0$  имеет вид:

$$x(t) = \frac{1}{\delta} \ln \left[ 1 + \delta e^{\int_0^t F(s) ds - \delta A t} \int_0^t F(u) e^{-\delta A u - \delta \int_0^u F(s) ds} du \right]. \quad (7)$$

В случае глюкозной пероральной нагрузки, заданной в виде начального условия в кишечнике

$$x(0) = Q, \quad (8)$$

где  $Q$  – доза нагрузки, нормированная на 100 мл крови, и  $F(t) \equiv 0$  уравнение (2) системы (2)–(4) вырождается в однородное уравнение (5). При его решении с начальным условием (8) получим

$$x(t) = \frac{1}{\delta} \ln [1 + (e^{\delta Q} - 1) e^{-\delta A t}]. \quad (9)$$

После нахождения функции  $x(t)$  уравнение (3) можно переписать в виде

$$\frac{dy}{dt} = \varphi(t) - B(1 - e^{-\beta y}), \quad (10)$$

который совпадает с уравнением (2) с точностью до обозначений. При этом функция  $\varphi(t) = A(1 - e^{-\delta x})$  определяется следующими выражениями, согласно формулам (7), (9) соответственно:

$$\varphi(t) = \delta A \frac{e^{\delta \int_0^t F(s) ds} - \delta A t}{\int_0^t F(u) e^{\delta \int_0^u F(s) ds} du}, \quad (11)$$

$$\varphi(t) = A \frac{e^{\delta Q} - 1}{e^{\delta A t} + e^{\delta Q} - 1}. \quad (12)$$

Решение дифференциального уравнения (10) с начальным условием  $y(0) = 0$  можно сразу записать аналогично выражению (7), произведя замену функции  $F(t)$  на функцию  $\varphi(t)$  и параметров  $A, \delta$  на  $B, \beta$ , соответственно. При подстановке найденной функции  $y(t)$  в формулу (4), получаем искомую функцию абсорбции глюкозы в кровь в желудочно-кишечном тракте:

$$f(t) = \beta B \frac{e^{\beta \int_0^t \varphi(s) ds} - \beta B t}{\int_0^t \varphi(u) e^{\beta \int_0^u \varphi(s) ds} du}, \quad (13)$$

где функция  $\varphi(t)$  определяется выражением (11) при произвольной функции  $F(t)$  поступления глюкозы в кишечник или выражением (12) при глюкозной нагрузке, заданной в виде начального условия (8). Нахождение вида функции  $F(t)$  представляет значительные трудности. Для этого необходимо решение дополнительной задачи транспорта глюкозы по пищеводу, заполнения ею желудка и эвакуации ее из него при отсутствии прямых клинических данных об этом и гипотетических физиологических предположениях, которые нельзя проверить. Поэтому в дальнейшем, по-видимому, целесообразно ограничиться случаем глюкозной нагрузки, заданной в виде начального условия в кишечнике (8), считая, что после ее перорального приема, вся она попадает в кишечник практически мгновенно.

В случае начального условия (8) решение задачи, определяемое формулами (12), (13), было численно проанализировано на ПЭВМ. Точность счета оценивалась по выполнению закона сохранения количества глюкозы при ее всасывании в кишечнике при пероральном тесте. При нормальном всасывании вся перорально принятая глюкоза успевает абсорбироваться в тонкой кишке за время ее нахождения там до эвакуации в толстую кишку [9]. Поэтому площадь под кривой функции всасывания в норме должна быть равна дозе глюкозы, принятой перорально и нормированной на 100 мл крови. Во всей серии численных экспериментов, проведенных на модели в широких пределах изменения значений ее параметров, точность счета была не хуже 1%.

Для идентификации значений параметров модели (2)-(4) и проверки ее физиологической адекватности, в связи с отсутствием методов прямого определения функции всасывания глюкозы в кишечнике, был использован, разработанный автором метод восстанов-

ления вида этой функции по гликемическим данным двух тестов (внутривенного и перорального) на основе модели (1) [5,6]. Для нахождения согласно этой процедуре вида функции всасывания глюкозы в кишечнике в норме были использованы справочные клинические данные внутривенного и перорального тестов, приведенные в литературе [13]. По этим данным были найдены значения основных параметров модели (1):

$$\beta^- = 0,018 \text{ мин}^{-1}; \beta^+ = 0,022 \text{ мин}^{-1}; \tau^- = 29 \text{ мин}; \tau^+ = 50 \text{ мин}; \mu = 0,0457 \text{ мин}^{-1};$$

$$\gamma = 0,02 \text{ мин}^{-1}; g_B = 80 \text{ мг\%}; g^* = 170 \text{ мг\%}; g_u = 170 \text{ мг\%}.$$

Значение параметра  $\alpha$  при стандартной внутривенной нагрузке равно 0,660; при стандартной пероральной нагрузке  $\alpha = 0,963$ . При обработке клинических данных была построена кривая функции всасывания  $f_a$ , представленная на фиг. 1, которую следует считать в качестве нормы в процессе всасывания глюкозы в кишечнике.

Полученная нами модельная кривая  $f_b$  при следующих значениях параметров модели (2)-(4)

$$\delta = 0,003 \frac{1}{\text{мг\%}}; \beta = 0,05 \frac{1}{\text{мг\%}}; A = B = 30 \frac{\text{мг\%}}{\text{мин}}; Q = 1500 \text{ мг\%},$$

приведенная на том же рис. 1, хорошо согласуется с ней, что позволяет судить о физиологической адекватности построенной модели всасывания глюкозы в кишечнике. На этом же рис. 1, используя модель (1), построены соответствующие гликемические кривые  $g_a$  и  $g_b$  перорального теста толерантности к глюкозе с нагрузками, определяемыми функциями  $f_a$  и  $f_b$ , практически совпадающие друг с другом.

Проведенный на модели (1)-(4) численный анализ зависимости динамики всасывания глюкозы в кишечнике от дозы перорально принятой глюкозной нагрузки, дал результаты, проиллюстрированные на рис. 3, хорошо согласующиеся с физиологическими представлениями и клиническими наблюдениями.

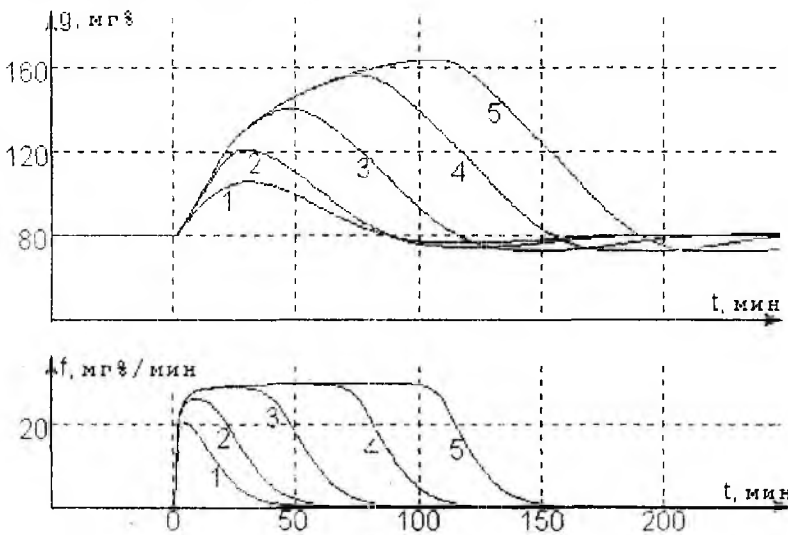


Рис. 3

Кривые 1-5 на рис. 3 соответствуют дозе глюкозной пероральной нагрузки, нормированной на 100 мл крови, равной 375, 750, 1500 (стандартная), 2500 и 3500 мг%. На рис.3 приведены также соответствующие гликемические кривые.

Следует отметить нелинейную зависимость максимального подъема гликемической кривой от величины дозы глюкозной нагрузки. Значительное увеличение дозы слабо влияет на подъем гликемической кривой, но приводит к удлинению ее гипергликемической фазы,

что согласуется с клиническими наблюдениями [14]. Уменьшение глюкозной нагрузки ниже стандартной вызывает укорочение гипергликемической фазы и снижение ее амплитуды. Такая зависимость вида гликемической кривой от величины глюкозной нагрузки

обусловлена ограниченностью функции всасывания глюкозы в кишечнике, т.е. наличием предельной интенсивности ее поступления в кровь (кривые  $f$  на рис. 3). Интенсивность абсорбции глюкозы в кишечнике, описываемая функцией  $f$  сначала возрастает, затем, при достаточной дозе глюкозной нагрузки, достигнув некоторой предельной величины, определенное время остается неизменной, а потом монотонно спадает до нуля. Уменьшение дозы глюкозной нагрузки приводит к вырождению плато кривой функции интенсивности ее абсорбции в кишечнике в локальный максимум.

С помощью модели (1)-(4) можно рассмотреть и проанализировать патологические состояния мальабсорбции, которые до сих пор не удавалось достаточно адекватно исследовать даже косвенными методами. На рис. 4 приведено семейство кривых 1-4 функции всасывания с предельной интенсивностью всасывания, равной 30 (норма), 20, 15 и  $10 \frac{\text{мг}\%}{\text{мин}}$  и соответствующие им гликемические кривые при стандартной глюкозной нагрузке  $Q = 1500 \text{ мг}\%$ .

Признаком нормального всасывания глюкозы в кишечнике при стандартной пероральной нагрузке считается повышение содержания сахара на 40-60 мг% (кривые 1-3 на рис. 4), повышение же его менее, чем на 30 мг% (кривые 4 на рис. 3), как полагают [9], свидетельствует о нарушении всасывания. Очевидно, что модель (1)-(4) позволяет производить более точное описание патологических состояний мальабсорбции.

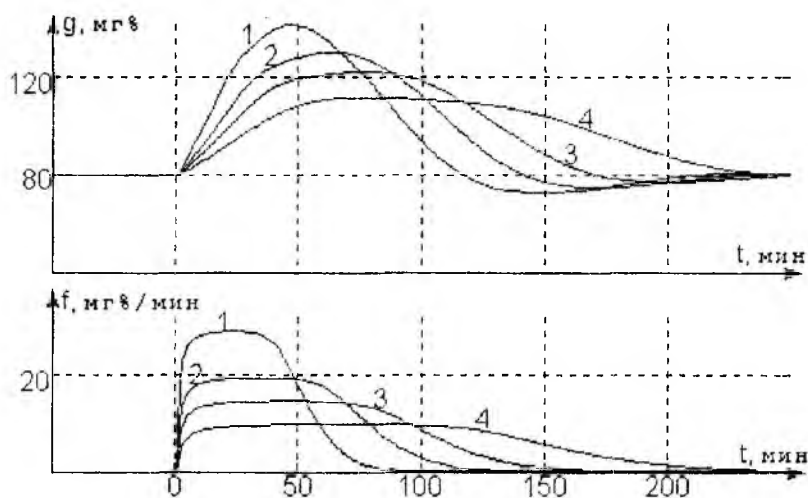


Рис. 4

- Список литературы: 1. *Endocrinology and metabolism* / P. Felig, J.D. Baxter, L.A. Frohman. 3d ed., McGraw-Hill, INC., 1995. 1940 p. 2. *Внутренние болезни. В 10 книгах. Книга 7: Пер. с англ.* / Под ред. Е. Браунвальда, К.Дж. Иссельбахера, Р.Г. Петерсдорфа и др. М.: Медицина. 1996. 720 с. 3. *Сахарный диабет: Доклад Исследовательской группы ВОЗ*. М.: Медицина 1987. 125 с. 4. *Definition, Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus and its Complications: Report of a WHO Consultation. Part 1: Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus*. Geneva: WHO. Department of Noncommunicable Disease Surveillance, 1999. 59p. 5. *Ланга С.И., Ланга С.С.* Функционально-феноменологическая модель перорального глюкозотолерантного теста. // Проблемы бионики. Харьков, №52, 2000. С. 52-57. 6. *Ланга С.И., Ланга С.С., Жемчужкина Т.В.* Однокомпарментная математическая модель внутривенного теста толерантности к глюкозе. // АСУ и приборы, Харьков, 2001. №115. С. 103-111. 7. *Антомонов Ю.Г., Кифоренко С.И., Микульская И.А., Пароконная Н.К.* Математическая модель системы сахара крови. К.: Наукова думка, 1971, 84 с. 8. *Дэвис М.Дж.* Дифференциальная модель сахарного диабета / Математическое моделирование. М., 1979. С.128-139. 9. *Фролькис А.В.* Функциональная диагностика заболеваний кишечника. М.: Медицина. 1973, 256 с. 7. *Маршалл В.* Клиническая биохимия. СПб., Бином, 2000. 368 с. 8. *Вандер А.* Физиология почек. СПб.: Питер, 2000. 256 с. 11. *Матвеев Н.М.* Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высшая школа. 1967, 409 с. 13. *Клиническая оценка лабораторных тестов.* / Под ред. Н.У. Тица. М.: Медицина. 1986, 356 с. 14. *Дзеранова Н.Я., Шлимович П.Б.* Динамика уровня глюкорективного инсулина в плазме крови после приема внутрь разных количеств глюкозы. Проблемы эндокринологии. т. 17, 1971, № 3. С. 14-17.

Поступила в редколлегию 22.09.2002

УДК 658.012.011.56

В.М. ЛЕВЫКИН, М.В. ЕВЛАНОВ

## ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКТОРОВ МЕЖДУ КАТЕГОРНЫМИ МОДЕЛЯМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время процессы проектирования информационных систем (ИС) различного назначения представляются, как правило, последовательностью моделей создаваемой системы на различных этапах проектных работ. При этом проектируемая ИС рассматривается в общем случае как вариант усовершенствования бизнес-процессов объекта автоматизации, позволяющий с помощью создаваемой ИС достигнуть поставленные перед предприятием цели технического, экономического или социального характера. Модели, описывающие ИС на различных стадиях проектных работ, являются, главным образом, визуальными и создаются с целью облегчить понимание разработчиками ИС предметной области и правил выполнения бизнес-процессов объекта автоматизации. Поэтому обобщенную последовательность создания моделей ИС в ходе проектирования можно представить схемой, показанной на рис. 1.

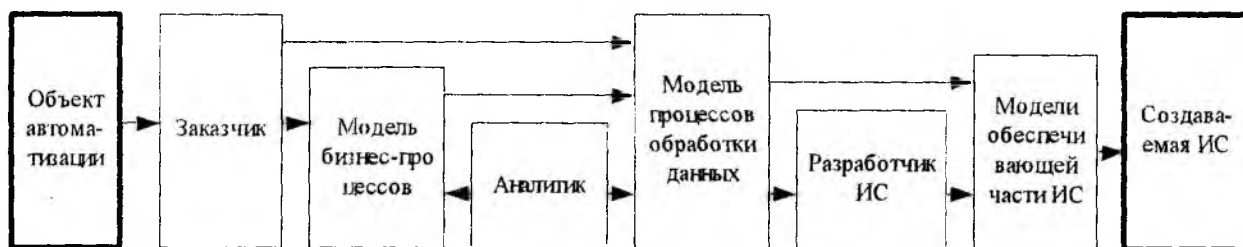


Рис. 1 – Обобщенная схема последовательности моделей проектируемой информационной системы.

Сразу необходимо предупредить читателя о том, что в данной работе не ставится целью описание всех элементов последовательности моделей и правил трансформации этих элементов друг в друга. Показанная на рис. 1 схема лишь подчеркивает важность постоянно существующей проблемы адекватной трансформации моделей, разработанных на различных этапах проектирования ИС. В настоящее время эту проблему решают с помощью так называемых CASE-средств. Назначение данных средств многообразно: построение и анализ моделей предметной области и интерфейсов, архитектуры, алгоритмов и структур данных, проектирование баз данных и генерация их схем для основных СУБД, разработка приложений и создание их программного кода, реинжиниринг процессов и баз данных и т.д. [1]. Однако, получаемые с помощью CASE-средств модели являются не столько результатом работы самого CASE-средства, сколько результатом работы представителей заказчика ИС, аналитика ИС и разработчиков ИС, вкладывающих в формируемую модель свои знания, опыт и приобретенные навыки.

Не менее важной проблемой проектирования ИС является проблема привязки разработанных моделей ИС с элементами системы, которая находится в промышленной эксплуатации. Подобный подход значительно расширяет область использования моделей ИС, облегчает процессы мониторинга и реинжиниринга эксплуатируемой ИС, а также позволяет упростить методы аналитической обработки хранимой в базе данных ИС информации. В настоящее время работы в соответствии с данным подходом ведутся в двух основных направлениях [1]:

- разработка средств моделирования, которые стандартно или опционально входят в некоторые крупные ИС;

- создание новых CASE-средств, которые предусматривают возможность организации связей моделей бизнес-процессов предприятия и, соответственно, моделей ИС с реальными данными из базы данных эксплуатируемой ИС.

Среди работ по второму направлению особо стоит отметить CASE-средство ARIS. Это средство позволяет моделировать бизнес-процессы предприятия и систему управления этим предприятием с четырех точек зрения – организационная структура, функциональная структура, структура данных, структура процессов. У каждой из этих точек зрения есть три описания – требования, спецификации и внедрения. Поэтому ARIS позволяет рассматривать любое предприятие с 12 различных позиций [1]. Этот подход весьма сложен для современного состояния проблемы визуального моделирования, однако позволяет моделировать процессы предприятия с весьма высоким качеством.

Таким образом, решение проблемы адекватной и надежной трансформации моделей ИС друг в друга является актуальным, поскольку позволит значительно сократить объем работ, выполняемых аналитиками, разработчиками и администраторами ИС в настоящее время вручную. Эти работы можно разделить на такие направления:

- работы по синтезу новых моделей ИС или ее отдельных элементов в соответствии с последовательностью проектных работ;
- работы по мониторингу ИС и анализу показателей ее эксплуатации;
- работы по реинжинирингу ИС и ее отдельных компонент.

#### **Анализ существующих решений.**

Следует отметить, что практические решения проблемы трансформации моделей ИС в современных CASE-средствах носят, как правило, лишь частный характер. Это связано со статичным представлением моделей ИС и организацией соответствующих способов хранения и отображения моделей (модели хранятся в файлах и отображаются как статичные визуальные диаграммы) [1]. Несколько лучше обстоят дела в CASE-средстве ARIS – там для хранения моделей используется объектная СУБД, что облегчает трансформацию моделей друг в друга [1]. Однако такое представление моделей позволяет в лучшем случае отображать лишь синтаксические описания моделей ИС, не учитывая при этом семантические особенности данных моделей.

Среди математических аппаратов, описывающих соответствия элементов исходной модели и элементов конечной модели ИС, наиболее предпочтительным считается аппарат теории категорий. Эти предпочтения определяются следующим рядом практических соображений:

- теория категорий позволяет формализовать описания как элементов модели (класс объектов категории), так и связей данных элементов (класс морфизмов категории) с учетом особенностей реализации данных связей (между двумя объектами категории может быть несколько различных морфизмов);
- в теории категорий для каждой категории предполагается определение частичной бинарной операции умножения морфизмов [2], что облегчает формализацию описаний структурных моделей за счет определения структурных цепочек элементов на модели ИС;
- некоторые классы морфизмов, а также определенные на объектах категории коконусы морфизмов [2] позволяют формализовать описания таких свойств объектных моделей ИС, как полиморфизм, наследование свойств и инкапсуляция.

#### **Постановка задачи исследования.**

Исходя из данных предположений, в дальнейшем будем рассматривать модели ИС на различных этапах проектирования в виде категорий. Для решения проблемы формализованного представления процессов трансформации моделей, обозначим некоторую исходную модель ИС как категорию  $A$ , а некоторую конечную модель ИС, получаемую в

результате трансформации, как категорию В. Тогда сам процесс трансформации моделей в соответствии с полученными в работе [3] выводами можно будет рассматривать в виде некоторого обобщенного ковариантного функтора  $\Phi_B^A$  – частного случая отображения категории А в категорию В при выполнении условий [2]:

$$\forall a \in Ob^A \quad \exists \Phi_B^A(a) \in Ob^B, \tag{1}$$

$$\forall \alpha \in H_A(a_i, a_j) \subseteq Mor^A \quad \exists \Phi_B^A(\alpha) \in H_B(\Phi_B^A(a_i), \Phi_B^A(a_j)) \in Mor^B, \tag{2}$$

$$\forall 1_a \in Mor^A \quad \exists \Phi_B^A(1_a) = 1_{\Phi_B^A(a)} \in Mor^B, \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \forall \alpha \in H_A(a_i, a_j) \in Mor^A, \beta \in H_A(a_j, a_k) \in Mor^A \\ \exists \Phi_B^A(\alpha\beta) = \Phi_B^A(\alpha)\Phi_B^A(\beta) \in Mor^B, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $Ob^A$  – класс объектов категории А, описывающих элементы исходной модели ИС;  
 $a$  – любой объект, относящийся к классу объектов  $Ob^A$  категории А;  
 $Ob^B$  – класс объектов категории В, описывающих элементы конечной модели ИС;  
 $Mor^A$  – класс морфизмов категории А, описывающих связи элементов исходной модели ИС;

$H_A(a_i, a_j)$  – множество морфизмов, определенных в категории А для объекта  $a_i$  как начала морфизма и объекта  $a_j$  как конца морфизма, при этом  $i \neq j$  являются идентификаторами объектов категории А;

$\alpha$  – морфизм, являющийся элементом множества  $H_A(a_i, a_j)$ ;

$Mor^B$  – класс морфизмов категории В, описывающих связи элементов конечной модели ИС;

$H_B(\Phi_B^A(a_i), \Phi_B^A(a_j))$  – множество морфизмов, определенных в категории В для объекта  $\Phi_B^A(a_i)$  как начала морфизма и объекта  $\Phi_B^A(a_j)$  как конца морфизма;  $1_a$  – единичный морфизм, определенный для объекта  $a$  категории А;

$1_{\Phi_B^A(a)}$  – единичный морфизм, определенный для соответствующего объекта категории В;  $\alpha\beta$  – частичная бинарная операция умножения морфизмов категории А.

Условия (1) – (4) позволяют утверждать, что определение обобщенного ковариантного функтора  $\Phi_B^A$  целесообразно разделить на две связанные между собой задачи:

- определение правил трансформации объектов категории А (категории-начала функтора) в объекты категории В (категории-конца функтора);
- определение правил трансформации морфизмов категории А (категории-начала функтора) в морфизмы категории В (категории-конца функтора).

Эти задачи решены в работе [3] для обобщенного ковариантного функтора, описывающего процесс проектирования распределенных баз данных ИС, причем решение приведено в виде обобщенного алгоритма. Однако этот алгоритм сформулирован с учетом единой природы категорных представлений моделей ИС и ее базы данных. В общем случае такое утверждение несправедливо, поскольку для проектирования обеспечивающей части ИС одновременно может использоваться структурный и объектный подходы к мо-

делированию ИС. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос о возможности существования единой аналитической модели обобщенного ковариантного функтора как основной операции, обуславливающей автоматизированное выполнение трансформации моделей ИС в ходе проектных работ.

**Изложение материала исследования.**

Задать модель функтора – это значит:

- задать классы объектов и морфизмов категории А;
- задать классы объектов и морфизмов категории В;
- задать совокупность удовлетворяющих условию (1) правил отображения объектов категории А в объекты категории В,
- задать совокупность удовлетворяющих условиям (2)-(4) правил отображения морфизмов категории А в морфизмы категории В.

Тогда в общем случае любой одноместный ковариантный функтор  $\Phi_B^A$  можно определить как

$$\Phi_B^A = (Ob^A, Ob^B, Mor^A, Mor^B, \Phi_{Ob^A}^{Ob^B}, \Phi_{Mor^A}^{Mor^B}), \quad (5)$$

где  $\Phi_{Ob^A}^{Ob^B}$  – база правил трансформации элементов класса объектов категории А в элементы класса объектов категории В;

$\Phi_{Mor^A}^{Mor^B}$  – база правил трансформации элементов класса морфизмов категории А в элементы класса морфизмов категории В.

Следует отметить, что представление баз правил трансформации элементов классов объектов и морфизмов категории А в элементы аналогичных классов категории В  $\Phi_{Ob^A}^{Ob^B}$  и  $\Phi_{Mor^A}^{Mor^B}$  как некоторых функций является лишь частным случаем. В общем случае данные базы правил следует рассматривать как реализацию некоторых функциональных операторов, которые связывают две модели с принципиально разными алфавитами.

Представление ковариантного функтора в виде выражения (5) позволяют с учетом выполнения условий (1)-(4) сформулировать следующие правила существования функтора

$$Ob^A \subseteq \Phi_{Ob^B}^{Ob^A}(Ob^A) \subseteq Ob^B, \quad (6)$$

$$Mor^A \subseteq \Phi_{Mor^B}^{Mor^A}(Mor^A) \subseteq Mor^B. \quad (7)$$

Данные правила для моделей ИС можно интерпретировать следующим образом: тезаурус исходной модели ИС не превышает по размерам и сложности тезаурус конечной модели ИС. При этом размеры тезауруса, используемого для создания модели ИС, определяется количеством объектов соответствующей категории. Семантическая сложность тезауруса, используемого для создания модели ИС, определяется количеством морфизмов соответствующей категории.

Подобная интерпретация будет справедливой только для тех случаев, когда уровни представления исходной и конечной моделей ИС, которые описываются категорией-началом функтора и категорией-концом функтора соответственно, будут адекватны друг другу. На практике чаще всего характерна иная ситуация: от моделей, описывающих бизнес-процессы предприятия, разработки переходят к моделям, описывающим информа-

ционную систему управления этим предприятием, а от них, в свою очередь, – к моделям, описывающим отдельные виды обеспечений ИС. Возможны и обратные переходы – например, в ходе реверс-инжиниринга (обратного проектирования) базы данных ИС. Поэтому существование баз правил  $\Phi_{Ob^A}^{Ob^B}$  и  $\Phi_{Mor^A}^{Mor^B}$  возможно только при выполнении одного из переходов, показанных следующими диаграммами

$$\begin{array}{ccc} MTez(Ob^A) \rightarrow MTez(Ob^B) & Tez(Ob^A) \rightarrow Tez(Ob^B) & \\ \uparrow & \downarrow & , \quad \downarrow \quad \downarrow & , \end{array} \quad (8)$$

$$Tez(Ob^A) \rightarrow Tez(Ob^B) \quad mTez(Ob^A) \rightarrow mTez(Ob^B)$$

$$\begin{array}{ccc} MTez(Mor^A) \rightarrow MTez(Mor^B) & Tez(Mor^A) \rightarrow Tez(Mor^B) & \\ \uparrow & \downarrow & , \quad \downarrow \quad \downarrow & , \end{array} \quad (9)$$

$$Tez(Mor^A) \rightarrow Tez(Mor^B) \quad mTez(Mor^A) \rightarrow mTez(Mor^B)$$

где  $Tez(\bullet)$  – текущий уровень представления тезаурус модели ИС;

$MTez(\bullet)$  – макро-уровень представления тезауруса модели ИС, для которого тезаурус текущего уровня представления является частным случаем (иногда – подмножеством);

$mTez(\bullet)$  – микро-уровень представления тезауруса модели ИС, который является частным случаем (иногда – подмножеством) тезауруса текущего уровня представления;

Тогда аналитическую модель одноместного ковариантного функтора (5) можно представить следующим образом

$$\Phi_B^A = (L_{Tez(A)}, Ob^A, Mor^A, L_{Tez(B)}, Ob^B, Mor^B, \Phi_{Ob^A}^{Ob^B}, \Phi_{Mor^A}^{Mor^B}), \quad (10)$$

где  $L_{Tez(A)}$  – уровень представления тезауруса исходной модели ИС, которая описана категорией  $A$ ;

$L_{Tez(B)}$  – уровень представления тезауруса конечной модели ИС, которая описана категорией  $B$ .

Уровни представлений тезауруса определяются, исходя из сложившейся иерархии представлений ИС. Примером такой иерархии может служить используемая технологией структурного проектирования ИС SADT классификация моделей ИС [4]:

- модели бизнес-процессов объекта автоматизации (уровень 0);
- модели потоков данных, модели потоков работ (уровень 1);
- модели «сущность-связь», диаграммы классов (уровень 2).

Данное описание иерархии представлений ИС является справедливым и в случае использования методов объектно-ориентированного проектирования ИС. Однако, современные реализации данных методов, основанные на языке визуального моделирования UML, обладают гораздо большим количеством визуальных моделей ИС. Так, большинство технологий визуального объектно-ориентированного проектирования ИС базируются на следующих моделях [5, 6]:

- диаграммы бизнес-прецедентов;
- диаграммы вариантов использования;
- диаграммы последовательности;
- диаграммы кооперации;
- диаграммы классов
- CRC-диаграммы;

- диаграммы состояний;
- диаграммы компонентов;
- диаграммы размещения.

При этом большинство методик предпроектного обследования объекта автоматизации с использованием визуальных объектно-ориентированных моделей допускают использование в качестве вспомогательных моделей рассмотренные ранее модели бизнес-процессов объекта автоматизации и модели потоков данных [6]. При этом модели структурного проектирования применяются, главным образом, для определения границ бизнес-процессов изучаемого объекта автоматизации, а также для определения границ проектируемой ИС.

Таким образом можно утверждать, что выбор иерархии представления моделей ИС обусловлен используемыми методологиями, технологиями и конкретными средствами проектирования ИС.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Исходя из сказанного выше, следует вывод о существовании двух основных способов реализации одноместного ковариантного функтора  $\Phi_B^A$  между категорными представлениями моделей ИС. Первый способ предполагает реализацию функтора  $\Phi_B^A$  как поиск таких баз правил  $\Phi_{Ob^A}^{Ob^B}$  и  $\Phi_{Mor^A}^{Mor^B}$ , которые однозначно определяли бы соответствие заранее заданных остальных элементов модели (10). Второй способ предполагает поиск таких объектов и морфизмов категории  $B$ , которые удовлетворяли бы заранее заданным базам правил трансформации, объектам и морфизмам категории  $A$ , а также учитывали бы разность уровней представления моделей  $LTez(A)$  и  $LTez(B)$ . В настоящее время большинство CASE-средств осуществляют трансформацию моделей ИС друг в друга в соответствии со вторым способом реализации функтора, что делает весьма актуальной проблему дальнейшей детализации модели (10).

В заключение хотелось бы отметить, что рассмотренная в данной статье проблема является одной из множества проблем, возникающих в ходе изучения и совершенствования методов и способов проектирования ИС. Представленные решения (в частности, модель (10)) показывают необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на создание языков или графических средств моделирования ИС, которые наилучшим образом соответствовали бы как общим целям проектирования ИС, так и целям отдельных проектных работ.

**Список литературы:** 1. Черников А. Программирование бизнеса // Компьютерное обозрение. 2002. № 47. С. 40-46. 2. Цаленко М.Ш., Шульгейфер Е.Г. Основы теории категорий. М.: Наука, 1974. 256 с. 3. Левыкин В.М., Евланов М.В., Мухайрат Мохаммад. Концепция построения CASE-системы разработки информационных управляющих систем // АСУ и приборы автоматики. 2001. Вып. 114. С. 55-59. 4. Маклаков С.В. Моделирование бизнес-процессов с BPwin 4.0. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 224 с. 5. У. Богге, М. Богге. UML и Rational Rose. М.: Лори, 2001. 582 с. 6. Мацяшек Л.А. Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 432 с.

Поступила в редколлегию 1.09.2003

УДК 574.64:593.17

Е. В. УСЕНКО

**БИОМОНИТОРИНГ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ИНFUЗОРИЙ  
TETRAHYMENA PYRIFORMIS КАК ТЕСТ-СИСТЕМЫ**

Прогрессирующее ухудшение экологической ситуации водных объектов обусловило необходимость включения в систему мониторинга окружающей природной среды эффективных методов интегральной оценки вредного воздействия загрязняющих веществ на биологические объекты. Биотестирование позволяет оценить влияние токсикантов на живые организмы и дает возможность на количественном основании за счет получения конкретных цифровых данных характеризовать уровень токсичности водной среды для гидробионтов. Для этой цели применяются биотесты с использованием организмов, относящихся к различным систематическим группам и трофическим уровням: бактерии, водоросли, инфузории, ракообразные, высшие растения, рыбы и др. При этом широкое использование биотестов в практике предусматривает стандартизацию процедуры биотестирования и ряда параметров, влияющих на результаты токсикологических анализов загрязнений.

Среди перспективных методов биотестирования следует выделить биотест на инфузориях тетрахименах, который получил широкое распространение в последние годы. Преимущество данного метода перед другими связано в первую очередь с особенностями тест-объекта, а именно:

- инфузории являются представителями биоценозов водных экосистем; широко распространены в водоемах и принимают активное участие в круговороте веществ, входя в состав организмов - консументов;
- они проявляют достаточную чувствительность к широкому кругу токсикантов различной химической природы;
- инфузории имеют относительно короткий цикл развития (около шести часов при оптимальных условиях), что позволяет проследить даже в краткосрочном эксперименте (24 ч) влияние токсиканта на нескольких поколениях тест-объекта;
- инфузории тетрахимены объединяют признаки отдельной клетки и целого организма, так что биотестирование происходит одновременно на клеточном и организменном уровнях;
- они характеризуются рядом особенностей, которые сближают их с высшими животными: кислотно-щелочной тип пищеварения, наличие ряда аналогичных ферментных систем, хорошо развитых митохондрий, которые обеспечивают энергетический обмен; имеются система транспорта электронов, универсальный код нуклеиновых кислот, сходный с кодом высших животных [1,2].

Проведенные эксперименты [3] по определению токсичности 67 химических соединений для теплокровных животных и тетрахимен выявили корреляционную зависимость в токсическом действии ксенобиотиков на испытанные тест-объекты. Достаточно четкая корреляция между величинами токсичности, установленными для тетрахимен и теплокровных, наблюдались в отношении веществ, принадлежащих к группам неэлектролитов и цитотоксикантов, в меньшей степени – к группе общеядовитых веществ.

В другой серии экспериментов [4] получены достоверные сопоставимые данные по токсичности сточных вод в различных разбавлениях для теплокровных и некоторых видов гидробионтов, в том числе инфузوري.

Таким образом, биотест на тетрахименах позволяет не только прогнозировать опасность загрязнений для состояния водных экосистем, но и проводить раннюю экспрессную (по сравнению с анализами на теплокровных) диагностику потенциального риска загряз-

нений водной среды для здоровья человека, так как тетрахимен применяют для биологической оценки качества пищевых продуктов и сельскохозяйственных кормов [5].

Биотест на тетрахименах нами был использован для определения генотоксичности водной среды по изменению удельной радиоактивности нуклеиновых кислот [6].

Приведенные данные свидетельствуют о широких возможностях биотеста на тетрахименах для токсической оценки различных объектов, в том числе водной среды и источников ее загрязнения, в связи с этим стандартизация метода на *Tetrahymena pyriformis* является необходимой задачей.

**Целью работы** являлась разработка модифицированного метода биотестирования на инфузориях тетрахименах для определения качества воды по токсикологическому показателю. Модификация метода связана с требованиями его использования на практике в мониторинге и контроле водной среды и источников ее загрязнения: достаточная унификация, возможность получения однозначно интерпретируемых воспроизводимых результатов.

Для осуществления указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- подобрать оптимальные условия культивирования тест-объекта и биотестирования;
- установить метрологические характеристики метода;
- провести апробацию биотеста на сточных и природных водах.

Одним из требований, которым должен соответствовать тест-объект, является возможность получения достаточного количества клеток в инокулянте для проведения экспериментов. К основным факторам, влияющим на рост и размножение инфузорий в культуре, относятся температура. В связи с этим нами были проведены эксперименты по выбору температурного режима для культивирования тест-объекта.

Для выбора оптимальной температуры культивирования тест-объекта сравнивали интенсивность размножения инфузорий при двух температурных режимах: 20-22°C и 26-28°C. Количество клеток в трехсуточной культуре, выращенной при температуре 26-28°C, было вдвое большим, чем в культуре, выращенной при более низком температурном режиме (20-22°C) (табл. 1).

Таблица 1

Температура, °C	Количество клеток инфузорий × 10 <sup>4</sup>
20-22	8,3 ± 0,3
26-28	16,2 ± 0,5

На основании результатов экспериментов нами рекомендуется использовать для культивирования тетрахимен с целью получения инокулянта с достаточной плотностью клеток температуру выращивания 26-28°C.

На результаты биотестирования в значительной степени влияет ряд факторов как биотических, так и абиотических. Существенным биотическим фактором является возраст тест-объекта, используемого для биотестирования.

С целью выбора возраста культуры тетрахимен, при котором они проявляют наибольшую чувствительность к действию токсикантов, испытывали два возраста культуры: через 3 и 7 суток после посева на питательную среду. Трехсуточная культура находится в конце экспоненциальной фазы роста, а семисуточная – в конце стационарной. В качестве токсиканта использовали раствор  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  с концентрацией 0,1 мг/л  $\text{Cu}^{2+}$ . Биотестирование продолжалось 24 часа.

Результаты экспериментов показали следующее. При внесении трехсуточной культуры количество клеток снизилось на 60%, а при внесении семисуточной – на 21%. Таким образом по показателю чувствительности тест-объекта для биотестирования рекомендуется трехсуточная культура.

Экспериментальным путем подбиралось также время проведения биотестирования. По литературным данным [7,8] рекомендуется для краткосрочного биотестирования 24 и

48 часов. В проведенных экспериментах с модельным токсикантом  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  (концентрации от 0,1 до 2,5 мг/л  $\text{Cu}^{2+}$ ) была выявлена одинаковая зависимость интенсивности размножения клеток от концентрации токсиканта при 24 и 48-ми часовой продолжительности эксперимента, поэтому для краткосрочного биотестирования был выбран промежуток времени 24 часа (рис. 2).

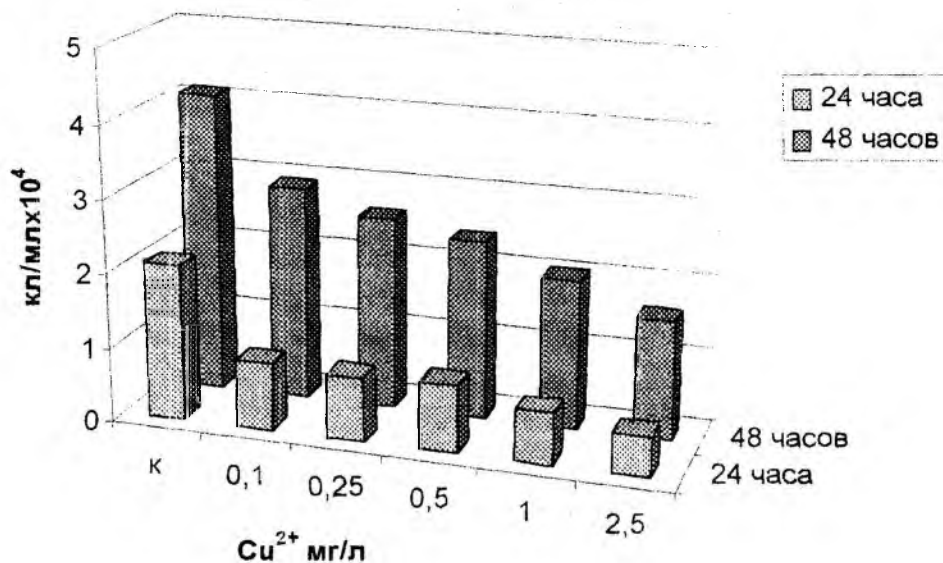


Рис. 1

Зависимость интенсивности размножения *Tetrahymena pyriformis* от различных концентраций меди через 24 часа и 48 часов после внесения токсиканта.

Метрологические характеристики устанавливали согласно “Керівному нормативному документу” (КНД) 211.1.051 [9]. Проверку пригодности тест-объекта для биотестирования определяли на эталонное вещество двуххромовокислый калий ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), так как оно не имеет в составе молекулы кристаллической воды, хорошо растворяется и водные растворы стабильны. Определяли среднюю эффективную концентрацию  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  –ЭК50, которая вызывает уменьшение количества на 50% и более по сравнению с контролем.

Для проверки пригодности тест-объекта для биотестирования непосредственно перед его проведением определяют ЭК50  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  за 24 часа. Если значение ЭК50 находится в установленном диапазоне реагирования, тест-объект можно использовать для биотестирования. ЭК50 определяли в 16 независимых экспериментах. Были выявлены следующие значения ЭК50  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (табл. 2).

Установка метрологических характеристик метода необходима для обеспечения единых определений токсичности по данному методу. Главной метрологической характеристикой метода биотестирования является воспроизводимость результатов биотестирования. Воспроизводимость результатов – характеристика качества биотестирования, которая отражает близость результатов тестирования, полученных по разной методике, на одном эталонном веществе, но в разных условиях (например, в разное время).

Таблица 2

№ п/п	ЭК50 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
1	0,1
2	0,3
3	0,2
4	0,4
5	0,1
6	0,3
7	0,4
8	0,2
9	0,4
10	0,3
11	0,2
12	0,1
13	0,1
14	0,4
15	0,2
16	0,3

При статистической обработке экспериментальных данных наряду с другими показателями вычисляли дисперсию – величину, отражающую степень варьирования признака, что в данном случае и характеризует воспроизводимость результатов определения токсичности растворов эталонного вещества ( $K_2Cr_2O_7$ ). В наших экспериментах дисперсия в среднем составила 30 %, что соответствует концентрации  $K_2Cr_2O_7$  – 0,81 мг/л. Низкая величина концентрации бихромата кальция, при которой вероятно достоверное превышение контроля по интенсивности размножения инфузорий, свидетельствует о воспроизводимости результатов определения токсичности растворов эталонного вещества ( $K_2Cr_2O_7$ ).

Таким образом в результате проведенных экспериментов установлена воспроизводимость метода, обеспечивающего единство определений токсичности, и диапазон реагирования тест-объекта на эталонное вещество ( $K_2Cr_2O_7$ ), который используется для проверки пригодности культуры инфузорий к биотестированию, что также обуславливает получение достоверных результатов.

С целью установления сферы применения разработанного метода биотестирования на *Tetrahymena pyriformis* для определения токсичности воды, а также для отработки методики в условиях биотестирования различных вод была проведена его апробация на сточных, природных (поверхностных и подземных) водах и источниках питьевого водоснабжения.

При биотестировании сточных вод проводили краткосрочные эксперименты (24 часа), при биотестировании речных, подземных и питьевых вод – длительные (96 часов). О наличии токсического действия судили по достоверному снижению прироста клеток в опыте по сравнению с контролем. Для определения уровня токсичности анализируемых вод готовили серию их разбавлений и определяли наименьшее разбавление (по кратности), при котором не проявлялось токсическое действие. Результаты апробации представлены в таблице 3.

Таблица 3

Вода	Количество проб		Процент токсичных проб	Максимальное разбавление (раз)
	Протестированных	Токсичных		
Сточная	39	9	23,0	2-4
Речная	104	81	77,8	2-16
Подземная	9	7	77,7	2-8
Питьевая	270	122	45	2-4

Приведенные в таблице 3 данные свидетельствуют о преимущественном обнаружении токсичности биотестом на инфузориях токсичности в пробах речных и подземных вод по сравнению с пробами сточных вод. Можно предположить, что степень очистки сточных вод была достаточно высокой, на что указывает и минимальное разбавление, при котором не обнаруживалась токсичность: 2-4 раз. Возможно, в связи с этим при краткосрочном биотестировании (24 часа) проб сточных вод было выявлено только 23 % токсичных.

Частота обнаружения токсичности в пробах речных и подземных вод была практически одинаковой – 77,7 и 77,8 %, при этом отдельные пробы речных и подземных вод обладали высоким уровнем токсичности: минимальное разбавление, при котором не проявлялось токсическое действие, достигало, соответственно, 16 и 8 раз.

При биотестировании проб питьевых вод выявлено 43 % токсичных проб с достаточно высоким уровнем токсичности от 2 до 4. Результаты биотестирования проб питьевых вод свидетельствуют о потенциальной опасности исследуемых вод для здоровья человека.

Итоги апробации показали возможность применения метода биотестирования на *Tetrahymena rufiformis* для определения токсичности поверхностных и подземных вод, а также источников питьевого водоснабжения. Краткосрочное биотестирование может быть использовано для выявления высокотоксичных сточных вод, в случае же невысокого уровня их токсичности следует продлевать время биотестирования до 96 часов.

**Список литературы:** 1. *Игнатьев А.Д., Исаев М.К., Долгов В.А. и др.* Модификация метода биологической оценки пищевых продуктов с помощью ресничной инфузории тетрахимена пириформис // Вопросы питания. 1980. №1. С. 70-71. 2. *Пожаров А.В., Шелемотов С.А.* Использование экспресс-биотестирования для оценки антропологической ситуации // Дефектоскопия. 1992, № 4. С. 70-71. 3. *Куценко С.А.* Культура инфузорий тетрахимена грушевидная как тест-объект токсикологических исследований // Проблемы санитарной охраны водоемов. Сб. тез. докл. конф. Пермь, 1988. С. 94-95. 4. *Барков Л.В., Этлин С.Н., Лахонина Г.М.* Дифференциальная токсичность водных сред // Актуальные проблемы гигиенического регламентирования химических факторов в объектах окружающей среды. Сб. тез. докл. конф. Пермь, 1989. С.21-22. 5. *Методические рекомендации для использования экспресс-метода биологической оценки продуктоле и кормов.* М.: ВАСХНИЛ, 1990. 42 с. 6. *А.с. Способ определения генотоксичности водорастворимых веществ* / Усенко Е.В., Божков А.И., Калиман П.А. // БИ. 1994, № 30. С.190. 7. *Унифицированные методы исследования качества вод.* Ч. III. Методы биологического анализа вод. М., 1983. С. 142-146. 8. *Моравцева В.* Простейшие как тест-объект и индикаторные организмы для оценки качества вод // Гидробиологический журнал. 1988, 24, № 5. С. 29-33. 9. 12. *КНД 211.1.051 – 96.* Київ, 1997. 33 с.

*Поступила в редколлегию 20.09.2003.*

УДК 519.81

Н.С. ШИЛО

## АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ МАКСИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ПРАВИЛЬНОСТИ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТЕНИЙ ЛПР

### Постановка проблемы и задачи исследования.

В работе [1] предложен метод параметрической идентификации модели выбора альтернативы, т.е. определения предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР). В качестве модели выбора принята традиционная аддитивная функция полезности, метод идентификации ее параметров основан на идеях компараторной идентификации. Особенностью синтезированной модели идентификации является то, что она определяет множество возможных значений (полиэдр) и поэтому является некорректной по Адамару [2]. В связи с этим возникает необходимость регуляризации исходной задачи, т.е. определения критерия выбора единственного точечного решения из допустимой области. В работах [1, 3] предложено использовать в качестве критериев выбора точечного решения Чебышевскую точку, модель максимизации силы предпочтений ЛПР, модель максимизации функции правильности выбора предпочтений (ММФПВП). Однако, необходима оценка адекватности предложенных критериев. В статье [4] предложена методика оценки адекватности результатов точечной идентификации предпочтений ЛПР по различным критериям. Целью данной статьи является проведение вычислительного эксперимента с целью получения объективной оценки как ММФПВП, так и других критериев точечной идентификации.

### Анализ проблемы.

Построение ММФПВП основано на анализе исходных данных, предложенных ЛПР для оценки и выбора. Пусть ЛПР оценивает набора альтернатив  $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$ , причем каждая альтернатива описывается набором частных характеристик  $K = \{k_j\}, j = \overline{1, m}$ , допускающим объективное количественное измерение. Для обеспечения сравнимости альтернатив, значения разнородных частных характеристик  $K = \{k_j\}, j = \overline{1, m}$  нормализованы, т.е. определены их функции полезности вида [1]:

$$p_j[k_j(x)] = \left( \frac{k_j(x) - k_{jnn}}{k_{jnn} - k_{jnx}} \right)^{\alpha_j}, \quad (1)$$

где  $k_j(x)$  – фактическое абсолютное значение частного критерия альтернативы  $x$ ;

$k_{jnn}, k_{jnx}$  – наилучшее и наихудшее значение частного критерия на всем множестве альтернатив, на котором производится выбор;

$\alpha_j$  – коэффициент нелинейности, определяющий вид зависимости функции полезности частных характеристик от значения критерия. Для простоты рассматриваем линейную зависимость  $\alpha_j = 1$ .

В результате, множество альтернатив  $X$ , характеризуется матрицей

$$\Theta = \left\| \begin{array}{cccc} p_1[k_1(x_1)] & p_2[k_2(x_1)] & \dots & p_m[k_m(x_1)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1[k_1(x_n)] & p_2[k_2(x_n)] & \dots & p_m[k_m(x_n)] \end{array} \right\|. \quad (2)$$

В соответствии с теорией полезности и правилом рационального поведения, выбор ЛПР некой альтернативы  $x_s \in X$ , из набора альтернатив  $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$  означает, что ее полезность для него максимальна. Можно предположить, что выбор ЛПР, помимо субъективных мотивов и предпочтений, связан с объективным анализом значений характеристик  $K = \{k_j\}, j = \overline{1, m}$  набора альтернатив  $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$ , предложенного ему для оценки. Пусть выбранная альтернатива  $x_s \in X$ , по некоторым, наиболее предпочтительным для ЛПР, характеристикам, имеет значительный "выигрыш" в значениях, по сравнению с остальными альтернативами. Из этого предположения вытекает гипотеза, на основе которой и строится предлагаемый метод идентификации предпочтений: для выбранной ЛПР альтернативы  $x_s \in X$ , характеристики со значительными "выигрышами" в значениях должны иметь более высокие значения весовых коэффициентов [2]. Объективно оценить выигрыш в значениях альтернатив относительно друг друга можно с помощью таблицы нормализованных значений частных характеристик (1). В результате, можно сформировать представление о сильных и слабых сторонах каждой альтернативы (характеристиках, имеющих большой выигрыш в значениях для заданной альтернативы, и характеристиках, имеющих малый выигрыш в значениях).

Формирование функции правильности выбора предпочтений  $\omega(a_j)$  позволяет оценить, насколько точно подобран весовой коэффициент  $a_j \in A, j = \overline{1, m}$  для характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$  при условии, что ЛПР выбрал альтернативу  $x_s \in X$  из набора альтернатив. Функция  $\omega(a_j)$  изменяется в интервале  $[0, 1]$ , причем значение  $\omega(a_j) = 0$ , означает, что весовой коэффициент  $a_j \in A, j = \overline{1, m}$  выбран абсолютно неправильно, а  $\omega(a_j) = 1$  – абсолютно правильно. Если разделить для каждой альтернативы все характеристики на две группы: характеристики, для которых значения имеют значительный выигрыш ( $p_j[k_j(x_s)] \geq 0.5, j = \overline{1, v}$ , где  $v$  - число характеристик в первой группе) и характеристики, для которых значения имеют незначительный выигрыш ( $p_j[k_j(x_s)] < 0.5, j = \overline{v+1, m}$ , где  $m$  - общее число характеристик), то правило выбора весовых коэффициентов:

$$\omega(a_j) = \begin{cases} a_j, & p_j[k_j(x_s)] \geq 0.5 \\ 1 - a_j, & p_j[k_j(x_s)] < 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, модель максимизации функции правильности выбора предпочтений (матрицы весовых коэффициентов  $A = \{a_j\}, j = \overline{1, m}$ ) имеет вид:

$$A^* = \arg \max_{A \in \Omega_0} \sum_{j=1}^m \omega(a_j),$$

$$\omega(a_j) = \begin{cases} a_j, & p_j[k_j(x_s)] \geq 0.5 \\ 1 - a_j, & p_j[k_j(x_s)] < 0.5 \end{cases}$$

при условиях

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j < 0 \quad c = \overline{1, w}; \quad (4)$$

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j \leq 0 \quad c = \overline{w+1, w+o};$$

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j = 0 \quad c = \overline{w+o+1, w+o+z};$$

$$\eta_{c+I}(A) \equiv a_j + a_\rho - 1 \leq 0, \quad j = \overline{1, m-1}, \quad \rho = \overline{j+1, m};$$

$$-1 \leq b_{cj} \leq 1, \quad c = \overline{1, w+o+z}, \quad j = \overline{1, m};$$

$$\sum_{j=1}^m a_j = 1; \quad a_j \geq 0, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $p_j[k_j(x_v)] - p_j[k_j(x_s)] = b_{cj}$ ,  $x_v, x_s \in X$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $c = \overline{1, w+o+z}$ ;

$w$  – количество строгих неравенств в модели;

$o$  – количество нестрогих неравенств в модели;

$z$  – количество уравнений в модели;

$I$  – количество дополнительных неравенств в модели.

Для проверки адекватности и точности ММФПВП используем методику оценки адекватности результатов точечной идентификации предпочтений ЛПР по различным критериям [3]. Основная идея данной методики состоит в следующем: если нет возможности точно идентифицировать реальные предпочтения ЛПР, то можно задать эти предпочтения и рассматривать их как эталон. Тогда, появляется возможность оценить результаты идентификации по различным критериям относительно этого эталона и, следовательно, определить наиболее точные и адекватные критерии точечной идентификации.

Для наглядности анализа оценим адекватность и точность Чебышевской точки (ЧТ), модели максимизации силы предпочтений ЛПР (ММСП), а также средней точки  $A^{cp} = \{a_j^{cp}\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , которую также можно использовать в качестве критерия точечной идентификации предпочтений ЛПР. Нахождение средней точки (СТ) предполагает выполнение следующих шагов:

1. Решаем задачу нахождения интервальных оценок матрицы весовых коэффициентов  $A = \{a_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , удовлетворяющих области допустимых значений  $\Omega_\theta$  [1].

Для решения задачи необходимо по каждой  $j$ -й переменной матрицы весовых коэффициентов  $A = \{a_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , последовательно решить  $2n$  оптимизационных задач вида:

$$a_j \rightarrow \max_{A^* \in \Omega_\theta} \quad \forall j = \overline{1, m};$$

$$a_j \rightarrow \min_{A^* \in \Omega_\theta} \quad \forall j = \overline{1, m};$$

при условиях

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j < 0 \quad c = \overline{1, w}; \tag{5}$$

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j \leq 0 \quad c = \overline{w+1, w+o};$$

$$\eta_c(A) \equiv \sum_{j=1}^m b_{cj} \cdot a_j = 0 \quad c = \overline{w+o+1, w+o+z};$$

$$\eta_{c+I}(A) \equiv a_j + a_\rho - 1 \leq 0, \quad j = \overline{1, m-1}, \quad \rho = \overline{j+1, m};$$

$$-1 \leq b_{cj} \leq 1, \quad c = \overline{1, w+o+z}, \quad j = \overline{1, m};$$

$$\sum_{j=1}^m a_j = 1; a_j \geq 0, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $p_j[k_j(x_v)] - p_j[k_j(x_s)] = b_{cj}$ ,  $x_v, x_s \in X$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $c = \overline{1, w+o+z}$ :

$w$  – количество строгих неравенств в модели;

$o$  – количество нестрогих неравенств в модели;

$z$  – количество уравнений в модели;  $l$  – количество дополнительных неравенств в модели.

2. Находим среднее арифметическое каждой  $j$ -й переменной

$$a_{cpj} = \frac{a_j^{\max} - a_j^{\min}}{2}. \quad (6)$$

3. Для того, чтобы выполнялось условие  $\sum_{j=1}^m a_j = 1$ , нормируем каждую  $j$ -ю переменную

$$a_{cpj}^n = \frac{a_{cpj}}{\sum_{j=1}^m a_{cpj}}. \quad (7)$$

Средняя точка  $A^* = \{a_{cpj}^n\}$ ,  $j = \overline{1, m}$  является простейшим решением задачи идентификации предпочтений ЛПР, поскольку не требует введения дополнительной целевой функции, оптимизация которой позволит определить численное значение матрицы  $A$ .

**Анализ адекватности критериев на примере.**

Сравнение адекватности и точности результатов идентификации по различным критериям точечной идентификации будем проводить на примере выбора ЛПР модели бензиновой газонокосилки (Таблица 1). Данный пример является в некоторой степени утрированным, поскольку как число, так и сами характеристики могут быть отличными от приведенных. Однако, следует отметить, что качественные характеристики не рассматриваются, поскольку задача идентификации строится исходя из гипотезы, что все характеристики допускают количественную оценку. Также отметим, что приведенный набор характеристик был использован экспертами журнала для сравнительного анализа достоинств и недостатков различных моделей газонокосилок. Число альтернатив было выбрано небольшим для упрощения анализа и наглядности примера.

Таблица 1

Альтернативы	Характеристики*							
	Мощн. двигат. л.с., $k_1$	Ширина кошения см., $k_2$	Максим. высота среза мм, $k_4$	Число ступ. регулир. высоты среза, $k_5$	Объем травосбор. л., $k_6$	Масса кг, $k_7$	Цена у.е., $k_8$	
40В	$x_1$	3	40	65	3	65	20	300
LR43PB	$x_2$	3.75	43	75	4	50	23	350
47В	$x_3$	3.7	47	75	4	65	26	485
4241ZB	$x_4$	6.5	57	85	7	80	46	510

\* Данные примера взяты из журнала "Идеи вашего дома", №7, 2001.

Результаты нормализации представлены в таблице 2.

Таблица 2

Альтернативы		Характеристики						
		Мощн. двигат. л.с., $k_1$	Ширина кошения см, $k_2$	Максим. высота среза мм, $k_4$	Число ступ. регулир. высоты среза, $k_5$	Объем травосбор. л., $k_6$	Масса кг, $k_7$	Цена у.е., $k_8$
40В	$x_1$	0	0	0	0	0.5	1	1
LR43PB	$x_2$	0.214	0.176	0.5	0.25	0	0.885	0.762
47В	$x_3$	0.2	0.412	0.5	0.25	0.5	0.769	0.119
4241ZB	$x_4$	1	1	1	1	1	0	0

В качестве критериев адекватности и точности весовых коэффициентов использованы следующие показатели [3]

$$\sum_{j=1}^m |a_j^{\text{эм}} - a_j|, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m (a_j^{\text{эм}} - a_j)^2, \quad (9)$$

где  $a_j^{\text{эм}}$  – эталонное значение весового коэффициента частной характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$ ,

$a_j$  – модельное значение весового коэффициента частной характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$ , полученное с помощью одного из критериев точечной идентификации.

Эталонные весовые коэффициенты вычислены следующим образом:

$$a_j^{\text{эм}} = \frac{bal_j}{\sum_{j=1}^m bal_j}, \quad (10)$$

где  $bal_j$  – балльная оценка частной характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$ .

Адекватность и точность полезностей альтернатив оценивается с помощью следующих показателей

$$\sum_{i=1}^n |P^{\text{эм}}(x_i) - P(x_i)|, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n (P^{\text{эм}}(x_i) - P(x_i))^2, \quad (12)$$

где  $P^{\text{эм}}(x_i)$  – эталонное значение полезности альтернативы  $x_i$ ;

$P(x_i)$  – модельное значение полезности альтернативы  $x_i$ .

Эталонные полезности определяются следующим образом:

$$P^{\text{эм}}(x_i) = \sum_{j=1}^m a_j^{\text{эм}} p_j[k_j(x_i)], \quad (13)$$

где  $a_j^{эм}$  – эталонное значение весового коэффициента частной характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$ ;

$p_j[k_j(x_i)]$  – значение функции полезности частной характеристики  $k_j \in K, j = \overline{1, m}$  для альтернативы  $x_i \in X, i = \overline{1, n}$ .

Тогда, наиболее адекватной, точной и эффективной можно считать идентификацию с помощью такого критерия, результаты которой позволяют получить

- наименьшие значения показателей адекватности весовых коэффициентов (8) и (9);
- совпадение с выбором потребителя наиболее полезной альтернативы, или совпадение с установленным потребителем отношением предпочтения;
- наименьшие значения показателей адекватности полезностей альтернатив (11) и (12).

В ходе эксперимента исследователем были случайным образом подобраны балльные оценки, а затем вычислены эталонные весовые коэффициенты, причем так, чтобы каждая  $x_i \in X, i = \overline{1, n}$  получила максимальную полезность, т.е. "была выбрана ЛПР". Набор эталонных весовых коэффициентов представлен в таблице 3.

Таблица 3

Выбранная альтернатива	Эталонные весовые коэффициенты характеристик						
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$x_1$	0.031	0.063	0.031	0	0.25	0.313	0.313
$x_2$	0.171	0.086	0.086	0.114	0.057	0.257	0.229
$x_3$	0	0.02	0.235	0	0.314	0.392	0.039
$x_4$	0.278	0.139	0.111	0.278	0.167	0	0.028

Используя эталонные весовые коэффициенты были вычислены эталонные полезности альтернатив и, в соответствии с полученными значениями полезностей, на заданном наборе альтернатив  $X$  были установлены отношения предпочтения (табл. 4).

Таблица 4

Эталонные полезности альтернатив				Альтернатива, имеющая максимальную эталонную полезность	Установленное отношение предпочтения
$P(x_1)$	$P(x_2)$	$P(x_3)$	$P(x_4)$		
0.75	0.548	0.45	0.375	$x_1$	$P(x_1) > P(x_2) > P(x_3) > P(x_4)$
0.514	0.525	0.395	0.514	$x_2$	$P(x_2) > P(x_1) = P(x_4) > P(x_3)$
0.588	0.498	0.589	0.569	$x_3$	$P(x_3) > P(x_1) > P(x_4) > P(x_2)$
0.139	0.239	0.336	0.944	$x_4$	$P(x_4) > P(x_3) > P(x_2) > P(x_1)$

Анализ результатов показывает, что при выборе ЛПР альтернативы  $x_1$ , критерий точечной идентификации, наиболее адекватно идентифицирующий весовые коэффициенты – ММФВПП, поскольку он имеет минимальные значения показателей адекватности (8) и (9), а наиболее точно идентифицирует полезности альтернатив ЧТ, так как получила минимальные значения (11) и (12). Кроме того, анализ полученных полезностей показывает, что эти критерии позволили в обоих случаях однозначно выявить наиболее предпочтительную альтернативу.

При выборе ЛПР альтернативы  $x_2$  наименьшие значения показателей адекватности (8)-(9) и (11)-(12) получает СТ. Но СТ не позволяют правильно выявить наиболее пред-

почтительную альтернативу:  $x_4$  вместо  $x_2$ . Это означает, что результаты идентификации по СТ нельзя использовать, поскольку не выполняется гипотеза о том, что ЛПР выбрал альтернативу  $x_2$ . ММФПВП и ЧТ однозначно и правильно идентифицируют выбранную альтернативу  $x_2$ , однако эти критерии не достигают наименьших значений показателей адекватности.

Для выбранной ЛПР альтернативы  $x_3$  наименьшие значения показателей адекватности (8)-(9) и (11)-(12) получает ММФПВП и при этом он позволяет однозначно выявить выбранную альтернативу.

При выборе ЛПР альтернативы  $x_4$ , наиболее адекватным критерием точечной идентификации является ЧТ, поскольку он имеет минимальные значения показателей адекватности (8)-(9) и (11)-(12). Кроме того, анализ полученных полезностей показывает, что как ЧТ, так и все остальные критерии, позволили однозначно выявить наиболее предпочтительную альтернативу.

Анализ результатов идентификации предпочтений ЛПР при выборе им единственной, наиболее предпочтительной альтернативы из набора, с помощью различных критериев точечной идентификации позволяет сделать вывод, что для выбранного примера ЧТ и ММФПВП являются критериями, для которых выполняется гипотеза о выборе ЛПР определенной альтернативы во всех четырех случаях, т.е. они точно определяют выбранную ЛПР альтернативу, даже если ее результаты идентификации не получают наименьших значений показателей адекватности (8)-(9) и (11)-(12). ММФПВП в двух случаях из четырех наиболее точно идентифицирует весовые коэффициенты, а ЧТ – полезности альтернатив (Рис.1). Наименее точным критерием, не позволяющим правильно определить выбранную ЛПР альтернативу в трех случаях из четырех, является СТ.

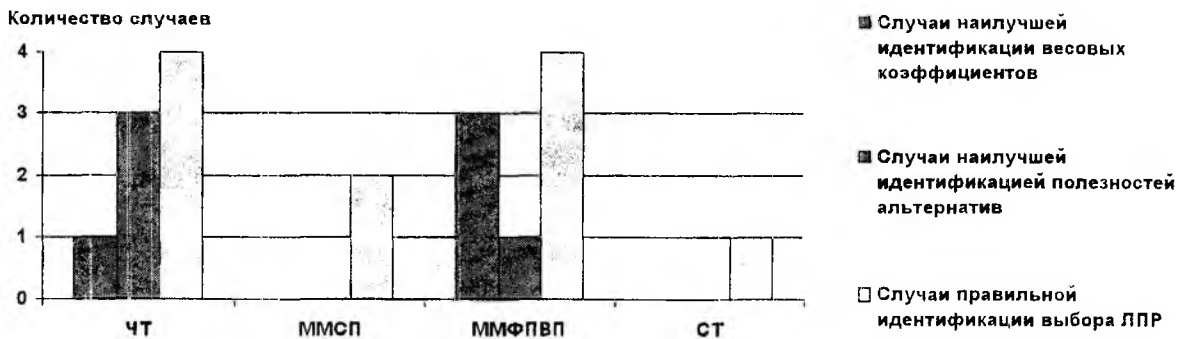


Рис. 1. Характеристики работы критериев точечной идентификации при выборе ЛПР единственной альтернативы из множества заданных альтернатив.

Похожую ситуацию можно наблюдать при установлении отношения предпочтения на множестве альтернатив. Так, для отношения предпочтений  $P(x_1) > P(x_2) > P(x_3) > P(x_4)$  наиболее точно и адекватно идентифицируют весовые коэффициенты ЧТ и ММФПВП, поскольку они имеют наименьшие значения показателя адекватности (9), а более точные полезности можно получить с помощью ЧТ. Кроме того, и ЧТ, и ММФПВП позволяют точно восстановить заданное отношение предпочтения.

Для эталонного отношения  $P(x_2) > P(x_1) = P(x_4) > P(x_3)$  наименьшие значения показателей адекватности (8) и (9) получает СТ, а (11) – (12) – ЧТ. Однако СТ не восстанавливает эталонное отношение предпочтения – получаем  $P(x_4) > P(x_2) > P(x_3) > P(x_1)$ , поэтому результаты идентификации по СТ нельзя использовать: не выполняется гипотеза о том, что ЛПР установил заданное отношение предпочтения. Эталонное отношение предпочтения успешно восстанавливают ММФПВП и ЧТ.

Наименьшие значения показателей адекватности (8)-(9) и (11)-(12) для эталонного отношения  $P(x_3) > P(x_1) > P(x_4) > P(x_2)$  получил ММФПВП, и при этом ему удалось точно восстановить эталонное отношение.

При задании ЛПР эталонного отношения предпочтения  $P(x_4) > P(x_3) > P(x_2) > P(x_1)$  наиболее точные весовые коэффициенты получаются при идентификации по методу СТ, а полезности альтернатив – с помощью ЧТ. Отношение предпочтений  $P(x_4) > P(x_3) > P(x_2) > P(x_1)$  удалось точно восстановить всем методам.

Рассматривая результаты идентификации предпочтений ЛПР в случае установления им отношения предпочтения на множестве альтернатив, можно сделать вывод, что в примере ЧТ и ММФПВП удастся наиболее точно восстановить эталонные отношения предпочтений, а ММСП и СТ – хуже всего (рис. 2).

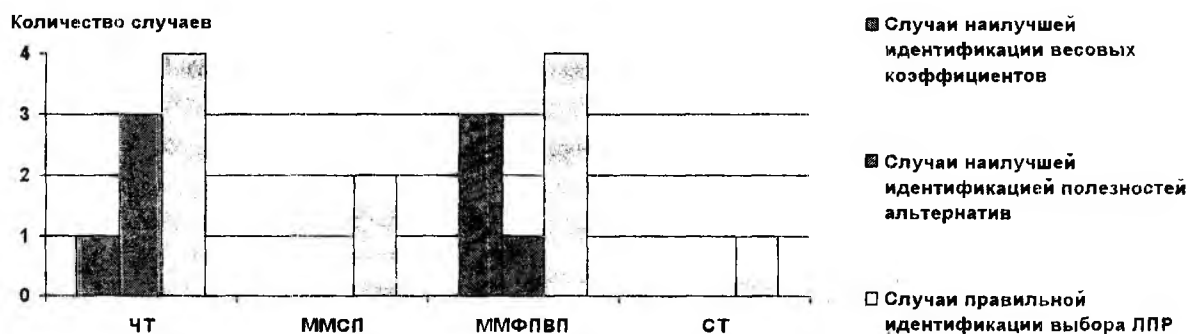


Рис. 2. Характеристики работы критериев точечной идентификации при установлении отношения предпочтения на множестве заданных альтернатив.

**Выводы.** Представленный анализ адекватности и точности различных критериев точечной идентификации с помощью методики оценки адекватности результатов точечной идентификации предпочтений ЛПР предполагает признание ММФПВП критерием, если и не всегда достигающим наименьших значений показателей адекватности, но позволяющим как точно выявить выбранную ЛПР альтернативу, так и всегда точно восстановить установленное отношение предпочтения.

Как видно из результатов идентификации предпочтений ЛПР с помощью ММФПВП, для каждой из альтернатив, характеристики, получающие по результатам идентификации не нулевые весовые коэффициенты, имеют значительный выигрыш в значениях. Кроме того, характеристики, имевшие более высокие выигрыши, получают более высокие весовые коэффициенты. Проанализировав адекватность и точность ММФПВП можно сделать вывод, что данная модель не только позволяет оценить структуру предпочтений ЛПР, но и, в ряде случаев, наилучшим образом идентифицировать предпочтения и полезности альтернатив. Следовательно, ММФПВП можно применять как альтернативный критерий точечной идентификации для анализа и идентификации предпочтений ЛПР.

**Список литературы:** 1. Овезгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. - К.: Наукова думка, 2002, 164 с. 2. Петров Э.Г. Новолжшлова М.В., Гребенник И.В., Соколова Н.А. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах. - Херсон: ОЛДІ-плюс, 2003. 380с. 3. Шило Н.С. Использование модели максимизации функции правильности выбора предпочтений для идентификации предпочтений ЛПР // Вестник ХГТУ. 2003. № 2. С. 52-57. 4. Петров Э.Г., Шило Н.С. Методика оценки адекватности моделей точечной идентификации индивидуальных предпочтений ЛПР // РИ. 2003. №2. С.97-103.

Поступила в редколлегию 10.09.2003

УДК 538.00.00

Н.Н. ГРИГОРЬЕВА, Н.Д. ВАСИЛЬЕВ, А.И. ДОХОВ, И.И. ЗИМА, В.И. СТРЕЛЬЧЕНКО

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОЛЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЮСТРЫ ЧИЖЕВСКОГО  
НА ЭПИТЕЛИАЛЬНЫЕ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА**

На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что многие объекты, подверженные внешним воздействиям электрических полей, излучают кроме традиционных электромагнитных волн так называемые роторные излучения, которые могут оказывать иное воздействие на человеческий организм, чем те, которые зафиксированы в их технических условиях. К числу таких объектов относится, в частности, аппаратура аэроионопрофилактики, применяемая для оздоровления и очистки воздуха от пыли и микроорганизмов и называемая люстрой Чижевского. Учитывая массовость применения этой аппаратуры, проведены эксперименты по регистрации воздействия ее роторных излучений на эпителиальные клетки человека и их обнаружению с помощью специально разработанных приемных устройств.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы показать, что при работе люстры Чижевского имеет место дополнительный полевой фактор воздействия на человека, существование которого необходимо учитывать при ее сертификации и эксплуатации.

В экспериментах была использована серийно выпускаемая люстра «Элион-132Ш». Предполагается, что оздоровительное воздействие люстры достигается за счет обогащения воздуха отрицательными аэроионами кислорода  $O_2^-$  и их диффузией в живые ткани и клетки. Для этого люстра формирует последовательность отрицательных электрических импульсов амплитудой 30 кВ, подаваемых по кабелю на ионизирующие электроды.

Под действием высоковольтного напряжения ионизирующие электроды формируют поток электронов и аэроионов, бомбардирующих молекулы воздуха. Эти заряженные частицы движутся с ускорением, создавая импульсный ионный ток и электромагнитное излучение, обусловленное их поступательным движением в электрическом поле. Примером излучений, обусловленных поступательным движением зарядов, является тормозное и комбинационное излучения плазмы [1]. Одновременно эти заряженные частицы являются источниками роторных излучений, обусловленных их вращательным движением в магнитном поле Земли. Роторные излучения можно подразделить на спиральное и солитонное.

Спиральное роторное излучение возникает вследствие ларморовского закручивания заряженных частиц при их движении в магнитном поле. Частицы совершают вращательное движение в плоскости, перпендикулярной полю, и это вращение, как и всякое ускоренное движение заряда, согласно законам электродинамики, приводит к появлению электромагнитного излучения. Спиральное роторное излучение электронов учитывается, например, в ускорительной технике и называется бетатронным [1].

Солитонное роторное излучение, обусловлено вращением частиц вокруг своей оси.

Аэроионы воздуха одновременно являются ионрадикалами, имеющими помимо заряда нескомпенсированные магнитные моменты, обусловленные их роторным вращением вокруг своей оси. Поскольку они находятся в магнитном поле Земли, то происходит их зеэмановское распределение по двум энергетическим уровням (нижнему и верхнему), соответствующим ориентации магнитных моментов по полю и против поля. Переориентация магнитных моментов из положения против поля в положение по полю происходит через прецессию и сопровождается излучением квантов магнитной и электромагнитной энергии, имеющих солитонную природу [2]. Аналогичными свойствами обладают также свободные электроны и протоны воздуха. Воздействие высоковольтных импульсов аппа-

рата на электроны, протоны и ионрадикалы воздуха увеличивает их прецессию и вызывает солитонное излучение.

Люстра Чижевского излучает оба вида роторных волн. Они имеют шумовой характер и могут быть спонтанными или стимулированными. В излучении спиральных роторных волн участвуют частицы как верхнего, так и нижнего магнитных энергетических уровней. Эти излучения имеют электромагнитную природу и являются, как правило, стимулированными. Для их стимулирования могут быть использованы не только электрические, но и другие факторы, возбуждающие потоки частиц, движущихся в магнитном поле. Источниками спиральных роторных излучений могут быть потоки частиц газов, пара, плазмы, воды, атмосферные фронты и даже обыкновенные сквозняки.

В излучении солитонных роторных волн участвуют только частицы верхнего магнитного энергетического уровня. Эти излучения могут иметь магнитную или электромагнитную природу. Они могут быть как спонтанными, так и стимулированными. Одним из факторов, стимулирующих солитонное излучение, являются спиральные роторные волны. Посредством спиральных роторных волн может осуществляться взаимодействие между частицами, движущихся в потоках, и частицами неподвижных объектов. Это является предпосылкой для осуществления биологической и технической регистрации роторных излучений люстры Чижевского.

Роторные излучения различных частиц имеют место в соответствующих диапазонах гиромангнитных частот. Спектр излучения – линейчатый. Основная частота соответствует ларморовской частоте вращения частицы. Кроме того, имеются гармоники, то есть частоты кратные основной. Длина волны  $\lambda$ , соответствующая основной частоте, определяется следующей формулой

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\gamma H},$$

где  $\gamma$  – гиромангнитная постоянная частицы;

$H$  – напряженность магнитного поля;

$c$  – скорость света.

Для естественных условий геомагнитного поля диапазон роторных излучений протонов расположен в области сверхдлинных волн, а электронов – в области средних волн.

Можно предположить, что посредством роторных излучений люстра Чижевского оказывает полевое воздействие на клетки человеческого организма.

### **1. Биологическая регистрация.**

Для регистрации воздействия роторных излучений на клетки человека был использован метод внутриклеточного микроэлектрофореза электроотрицательных ядер клеток букального эпителия человека [3]. Принцип метода состоит в приготовлении препарата из воды и эпителиальных клеток человека и в подсчете числа ядер, смещающихся в клетках под действием приложенного переменного напряжения. При этом в качестве показателя используется процентное содержание подвижных ядер, определяемое визуально с помощью микроскопа.

Обнаружение воздействия роторных излучений аппарата производилось по изменению процентного содержания подвижных ядер после его включения и воздействия на препарат в течение 30 мин. Для исключения диффузного воздействия на клетки аэроионов воздуха препарат помещался между покровными стеклами.

В ходе исследований производились: 4-е измерения с интервалом 30 мин; усреднение по результатам 4-х измерений; сравнение подвижности ядер контрольного « необлученного » препарата № 1 и «облученных» препаратов № 2 и № 3, размещенных на расстояниях 1,0 и 3,0 м от аппарата. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Проведенные исследования подтвердили предположение о том, что люстра Чижевского оказывает полевое воздействие на клетки человеческого организма. После 30 мин работы люстры происходил переходной процесс изменения подвижности ядер «облученных» клеток.

Сначала происходило сильное отклонение показателя от контроля, а затем снижение и приближение к норме. Через два часа после воздействия на дальности 3 м подвижность приходила в норму, а на дальности 1 м – нет.

Таблица 1

Номер препарата	Процентное содержание подвижных ядер, %					
	1	2	3	4	средняя	нормальная
№ 1	41	29	49	24	36	30
№ 2	48	62	43	47	50	30
№ 3	57	57	28	33	44	30

## 2. Техническая регистрация.

Для уточнения физической природы полевого воздействия люстры на клетки человеческого организма были также проведены опыты по технической регистрации ее излучений методом роторной спектроскопии [2].

Метод роторной спектроскопии исследует излучательные квантовые магнитные переходы микро и макро частиц, находящихся в естественных условиях геомагнитного поля. Для проведения экспериментов были созданы приборы, регистрировавшие электромагнитные роторные излучения электронов и протонов воздуха при воздействии на них высоковольтного электрического поля. В частности, для регистрации роторных излучений протонов были использованы приемные устройства электромагнитных волн с диапазоном рабочих частот 0,5...10,0 кГц и пороговой чувствительностью 10 мкВ. Для регистрации роторных излучений электронов был использован приемник электромагнитных волн с диапазоном рабочих частот 520...1650,0 кГц и пороговой чувствительностью 0,6 мВ. Исключение обнаружения электромагнитных излучений, обусловленных поступательным движением аэроионов при этом достигалось за счет грублением пороговой чувствительности приемных устройств и частотной селекцией гиромангнитных частот протонов и электронов, находящихся в геомагнитном поле.

В ходе исследований производилось определение дальности обнаружения роторных излучений, превышающих уровень пороговой чувствительности приемников электромагнитных волн. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Источники роторных излучений	Тип антенны приемников	Дальность регистрации излучений люстры, м
1	Протоны	Ферритовая	0,15
		Штыревая	1,0
2	Протоны	Специальный	2,0
3	Электроны	Ферритовая	0,5
		Штыревая	1,5

Результаты анализа табл. 2 свидетельствуют о том, что дальности обнаружения роторных излучений люстры с помощью использованных приемников электромагнитных волн примерно одинаковы и составили: для протонов 2,0 м; для электронов – 1,5 м. Поскольку чувствительности использованных приемников отличаются в 60 раз, то интенсивность излучений электронов примерно на три порядка превышает интенсивность излучений протонов.

### 3. Обсуждение результатов

Зарегистрирована реакция клеток человеческого организма, изолированных от диффузного воздействия ионов, на работу люстры Чижевского. Следовательно, это воздействие, проникающее через покровное стекло, имеет иную физическую природу, в частности – полевую. Физически излучения люстры Чижевского в диапазонах гиромангнитных частот электронов и протонов свидетельствуют о том, что под действием высоковольтного напряжения в воздухе появляются частицы, излучающие роторные электромагнитные волны. Такими свойствами обладают свободные протоны и электроны, а также некоторые ионы и радикалы воздуха. Так, излучателями роторных волн протонного диапазона могут быть атомы  $H$  и ионы водорода  $H^+$  и  $H^-$ , а также молекулы и ионы гидроксония  $OH$  и  $OH^-$ . Излучателями роторных волн электронного диапазона могут быть свободные электроны, молекулы и атомы магнитных газов ( $H$ ,  $O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$  и др.) и их ионы.

Причинами появления излучающих частиц и молекул могут быть процессы ионизации или диссоциации. Однако, так как конструкция люстры Чижевского предполагает уменьшение содержания в воздухе положительных ионов, то есть не допускает их появления, то главной причиной возникновения роторных излучений следует считать диссоциацию молекул воды, происходящую под действием ударов электронов. Следует отметить, что при бомбардировке молекул электронами может происходить образование отрицательных ионов во многих газах. Например, в газах  $NH_3$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  образуются ионы  $NH^-$ ,  $O^-$ ,  $SO^-$ ,  $HS^-$ . Однако, при образовании отрицательных ионов очень часто энергия, выделяющаяся при присоединении электрона, превышает порог диссоциации молекулы и процесс ионизации сводится к диссоциации.

Диссоциация – это разрыв химической связи между атомами молекулы. Разрыв ковалентных связей молекул воды в воздухе разной влажности может происходить по разному [4]. В сухом воздухе разрыв ковалентной связи происходит по гомолитическому типу, то есть с разрывом электронной пары и образованием двух радикалов  $H$  и  $OH$ . В каплях влажного воздуха разрыв ковалентной связи происходит по гетеролитическому типу, то есть без разрыва электронной пары и с образованием двух ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Объясняется это тем, что гетеролитический распад в сухом воздухе требует затраты большей работы на преодоление электростатического притяжения ионов, в то время как в каплях влажного воздуха диэлектрическая проницаемость воды ее понижает. Благодаря этому энергия гетеролитического разрыва ковалентной связи для молекул воды воздуха становится ниже энергии гомолитического разрыва [4]. Кроме того, гетеролитическому распаду способствует электрическая поляризация диссоциирующей связи под действием внешнего электрического поля.

Гетеролитическая диссоциация молекул воды приводит к освобождению протонов  $H^+$ , их вращению в геомагнитном поле и квантовым переходам между геомагнитными энергетическими уровнями. Они сопровождаются роторными излучениями в диапазоне гиромангнитных частот протонов. Молекулы иона гидроксония  $OH^-$  также имеют только нескомпенсированный магнитный момент протона и также излучают на гиромангнитной частоте протонов. Таким образом, излучения, сопровождающие гетеролитическую диссоциацию, имеют только одну спектральную линию – протонную.

Гомолитическая диссоциация молекул воды приводит к образованию радикалов  $H$  и  $OH$ , являющихся источниками роторных излучений на гиромангнитных частотах как протонов, так и электронов. Таким образом, излучения, сопровождающие гомолитическую диссоциацию имеют две спектральные линии – протонную и электронную.

Из изложенного видно, что в зависимости от вида преимущественной диссоциации молекул воды воздуха воздействие люстры Чижевского может быть одночастотным или двухчастотным. По соотношению спектральных плотностей мощности протонной и электронной линий с помощью метода роторной спектроскопии эти воздействия могут быть

дифференцированы. Эти возможности метода могут быть использованы также для дистанционного контроля влажности и водородного показателя рабочей среды различных энергетических и промышленных установок и их влияния на человека. Кроме того, метод позволяет регистрировать присутствие в воздухе магнитных газов, большинство из которых являются парниковыми, то есть производить мониторинг экологии окружающей среды. При конструировании соответствующей аппаратуры необходимо учитывать зарегистрированную в экспериментах разницу интенсивностей излучений электронов и протонов. По-видимому, этот результат не противоречит представлениям современной физики и обусловлен различием их гирромагнитных постоянных в 1840 раз.

### Выводы

Проведенные исследования подтвердили предположение о том, что люстра Чижевского излучает роторные электромагнитные волны в диапазонах гирромагнитных частот протонов и электронов. При этом интенсивность роторных излучений электронов примерно на три порядка превышает интенсивность излучений протонов.

Зарегистрировано, что с помощью роторных излучений люстра Чижевского типа «Элион-132Ш» помимо ионизирующего влияния на эпителиальные клетки человека оказывает также полевое воздействие. Можно предположить, что аналогичное воздействие на человека оказывают и другие ионизаторы воздуха. Для определения какое из воздействий на человека (диффузное или полевое) оказывает оздоровительный эффект целесообразно проведение дополнительных биологических и медицинских исследований.

**Список литературы:** 1. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат. 1966 2. Зима И.И. Роторный геомагнетизм. Некоторые аспекты. Харьков. Курсор. 2002. 3. Шахбазов В.Г., Колупаева Т.В., Набоков А.Л. Способ определения утомления человека: А.С. № 1235493. СССР // Б.И. 1986. №21. 4. Панчевков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ. М.: Химия. 1985

*Поступила в редколлегию 20.09.2003.*

УДК 615.47:617-089

Т.В. НОСОВА, М.С. БЕЗНОС, В.В. СЕМЕНЕЦ, В. А. ПИСЬМЕНЕЦКИЙ

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

## Введение.

В настоящее время в клиническую практику все шире внедряются аппаратно-программные комплексы для диагностики и коррекции параметров походки, позволяющие более эффективно проводить процесс диагностики и обучение пациентов, а следовательно, существенно сократить время реабилитации и одновременно повысить ее эффективность. Основой всех существующих методов диагностики является обработка сигналов, снимаемых с пациента, в частности, биомеханических сигналов от гониометрических датчиков. Эффективность работы аппаратно-программных комплексов во многом определяется применяемыми алгоритмами обработки сигналов, при этом отправной точкой является базовая математическая модель этих сигналов, поиску оптимального варианта которой посвящена статья.

Целью данной работы является повышение достоверности модели диагностики походки человека за счет корректного определения информативных параметров: угла сгибания в тазобедренном суставе  $\alpha_1$ , угла попятных движений  $\alpha_2$ , угла сгибания в коленном суставе  $\beta_1$ , угла подгибания  $\beta_2$ , угла первично подошвенного сгибания  $\gamma_1$ , угла первичного тыльного сгибания  $\gamma_2$  (рис. 1), и соответственно поиска оптимальной модели функционирования нижних конечностей человека.

Перед нами стояла задача аналитического описания опытных данных, полученных при исследованиях кинематической системы нижних конечностей человека на основе различных аппроксимирующих функций с минимальной среднеквадратичной погрешностью при минимальном количестве членов разложения.

Результаты моделирования сигналов, снятых с тазобедренного (ТБС) (рис. 2), коленного (КС) (рис. 3) и голеностопного (ГСС) (рис. 4) суставов, на основе ряда Фурье [1] побудили нас провести поиск других базисных функций с целью сокращения числа членов ряда. Это связано с тем, что в предыдущей работе количество слагаемых ряда составляло 18-20, исключая математическую модель для сигнала ГСС при составлении, которой базовой являлась экспоненциальная функция.

Для решения этой задачи проанализируем особенности представления биомедицинских сигналов аналитическими моделями. Для некоторого временного интервала  $[0, \tau]$  возможно описание сигнала  $f(t)$ , по некоторой системе функций  $\{\varphi_i(t)\}$ .

$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(t), \quad t \in [0, \tau]$$

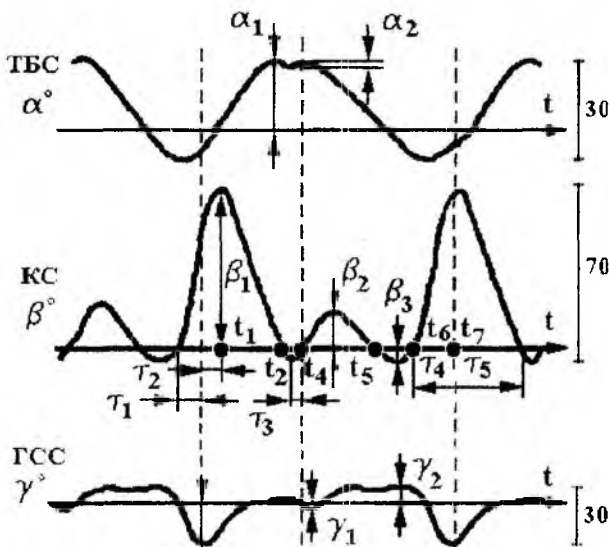


Рис. 1. Гониометрические характеристики экспериментальных данных шага человека.

$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(t)$$

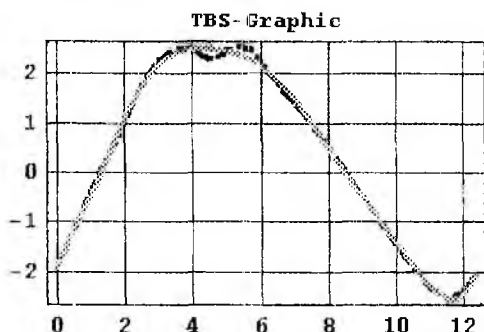


Рис. 2. Экспериментальные данные угла ТБС и их аппроксимационные модели вида (1).

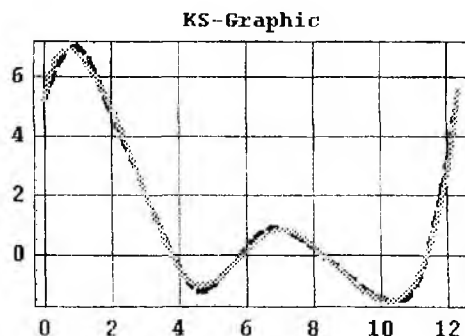


Рис. 3. Экспериментальные данные угла КС и их аппроксимационные модели вида (2).

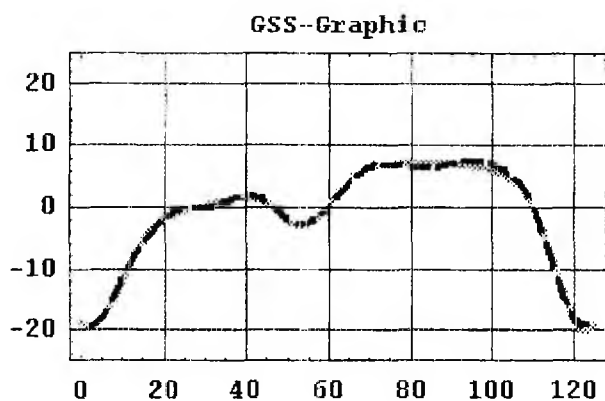


Рис. 4 Экспериментальные данные угла ГСС и их аппроксимационные модели вида (3).

Рассмотрим аналитические функции, описывающие сигнал на временном сегменте. Для выделения из исследуемого сегмента биомедицинского сигнала  $f(t)$  его информативных параметров  $\{a_i\}$  необходимо определить критерий близости исследуемого сигнала к его аналитическому описанию и, исходя из этого критерия, получить алгоритм нахождения унифицированного ряда значений, пропорциональных числовым коэффициентам  $\{a_i\}$ .

$$\sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x) \quad \text{на сегменте } [a, b]$$

В такой постановке задачи ее решение следует искать в теории аппроксимации функции действительной переменной  $f(x)$  функциональным рядом. Критерий близости определяется видом сходимости. Известно пять видов сходимости: равномерная сходимость, сходимость в среднеквадратическом, сходимость в среднем, сходимость почти всюду и сходимость по мере. Структурно эти виды сходимости связаны между собой.

Сходимость по мере и сходимость почти всюду распространяются на функции  $f(x)$ , для которых не совпадают области определения и области сходимости. Функции, у которых совпадают области определения и сходимости, допускают равномерное приближение функциональным рядом, приближение в среднеквадратическом и приближение в среднем [2]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{x \in [a, b]} \left| f(x) - \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x) \right| = 0,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b [f(x) - \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x)]^2 dx = 0,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b \left| f(x) - \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x) \right| dx = 0.$$

Для нашего случая будем применять сходимость в среднеквадратичном.

Авторы ставили перед собой задачу нахождения наилучшего приближения к экспериментальным данным. Для этого были использованы следующие системы ортогональных функций.

Полиномы Лежандра

$$P_n(t) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \frac{d^n (t^2 - 1)^n}{dt^n}, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

Полиномы Лагерра

$$L_n^{(\alpha)}(t) = \frac{e^t t^{-\alpha}}{n!} \frac{d^n}{dt^n} (e^{-t} t^{n+\alpha}),$$

где  $\alpha$  - произвольное комплексное число.

Полиномы Чебышева 1-го и 2-го рода

$$T_n(t) = \cos(n \arccos t) = \frac{1}{2} [(t + \sqrt{t^2 - 1})^n + (t - \sqrt{t^2 - 1})^n],$$

$$U_n(t) = \frac{\sin[(n+1) \arccos t]}{\sin t} = \frac{1}{n+1} T_{n+1}(t) = \frac{1}{2\sqrt{t^2 - 1}} [(t + \sqrt{t^2 - 1})^{n+1} - (t - \sqrt{t^2 - 1})^{n+1}]$$

Функция Бесселя

$$\sin(m \sin \Omega t) = 2J_1(m) \sin \Omega t + 2J_3(m) \sin 3\Omega t + 2J_5(m) \sin 5\Omega t - \dots$$

$$\cos(m \sin \Omega t) = J_0(m) + 2J_2(m) \cos 2\Omega t + 2J_4(m) \cos 4\Omega t + \dots$$

$$\sin(m \cos \Omega t) = 2J_1(m) \cos \Omega t - 2J_3(m) \cos 3\Omega t + 2J_5(m) \cos 5\Omega t - \dots$$

$$\cos(m \cos \Omega t) = J_0(m) - 2J_2(m) \cos 2\Omega t + 2J_4(m) \cos 4\Omega t - \dots$$

Располагая массивом точек, полученных экспериментально, был произведен поиск оптимальной системы функций по критерию минимальной среднеквадратичной погрешности.

В данной работе для математического моделирования и определения ошибок приближения использовался пакет МАТНЕМАТИСА версии 4.1. Входными данными являлись массивы дискретных отсчетов сигналов, полученных экспериментально с помощью датчиков расположенных на тазобедренном, коленном и голеностопном суставах. Поиск оптимальных моделей заключался в определении коэффициентов  $a_i$  для ортогональных функций Лагерра, Лежандра, Бесселя, Чебышева, Фурье, и последующем выборе одной из них по критерию минимальной среднеквадратичной погрешности.

Результаты поиска оптимальных базисных функций для аппроксимации сигналов, снятых с датчиков расположенных на ТБС, представлены на рис. 5. Из приведенных зависимостей видно, что наилучшее приближение обеспечивает функция Лагерра (при 7 членах ряда  $\sigma = \sigma_{\min} = 0.10035$ ). Однако, с точки зрения точности измерения информативных параметров эта модель является не состоятельной. Поэтому было принято решение применять для данной зависимости ряд Фурье.

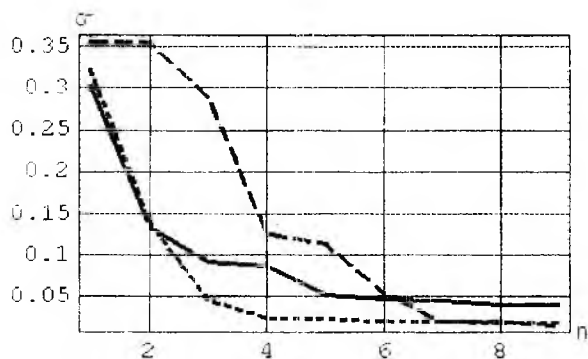


Рис. 5 Сравнение ошибки аппроксимации в зависимости от базисной функции (сплошной - линией разложение по Фурье, пунктирной - по функциям Лагерра, штриховой - по функциям Бесселя) при моделировании сигнала ТБС.

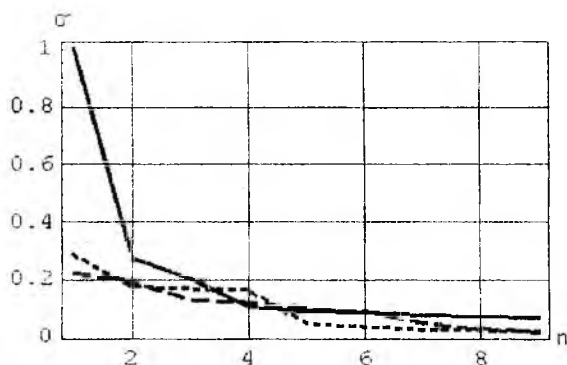


Рис. 6 Сравнение ошибки аппроксимации в зависимости от базисной функции (сплошной - линией разложение по Фурье, пунктирной - по функциям Лагерра, штриховой - по функциям Бесселя) при моделировании сигнала КС.

Моделирование сигналов, снятых с датчиков расположенных на КС, представлено аналитическими зависимостями на рисунке 6. Как следует из приведенных графиков, функция Бесселя наиболее близка к оптимальной.

$$\begin{aligned} \alpha(t) = & 1,875 \cdot \cos[0,50876 \cdot (t - 6,175)] - 0,325 \cdot \cos[1,017 \cdot (t - 6,175)] + \\ & + 0,126 \cdot \cos[1,525 \cdot (t - 6,175)] + 0,037 \cdot \cos[2,035 \cdot (t - 6,175)] + \\ & + 0,0269 \cdot \cos[2,543 \cdot (t - 6,175)] - 0,022 \cdot \cos[3,053 \cdot (t - 6,175)] + \\ & + 0,00164 \cdot \cos[3,56 \cdot (t - 6,175)] - 0,0152 \cdot \cos[4,07 \cdot (t - 6,175)] - \\ & - 0,00947 \cdot \cos[4,578 \cdot (t - 6,175)] - 1,49 \cdot \sin[0,50876 \cdot (t - 6,175)] + \\ & + 0,225 \cdot \sin[1,017 \cdot (t - 6,175)] - 0,0496 \cdot \sin[1,525 \cdot (t - 6,175)] + \\ & + 0,029 \cdot \sin[2,035 \cdot (t - 6,175)] - 0,0911 \cdot \sin[2,543 \cdot (t - 6,175)] - \\ & - 0,00467 \cdot \sin[3,053 \cdot (t - 6,175)] - 0,0172 \cdot \sin[3,56 \cdot (t - 6,175)] - \\ & - 0,00288 \cdot \sin[4,07 \cdot (t - 6,175)] - 0,00493 \cdot \sin[4,578 \cdot (t - 6,175)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta(t) = & 5,18 \cdot J_0(t) + 12,22 \cdot J_1(t) - 49,68 \cdot J_2(t) + 240,27 \cdot J_3(t) - 782,97 \cdot J_4(t) + \\ & + 1878,81 \cdot J_5(t) - 3228,6 \cdot J_6(t) + 3818,86 \cdot J_7(t) - 2813,18 \cdot J_8(t) + 978,535 \cdot J_9(t) \end{aligned} \quad (2)$$

При этом отсутствуют потери информативных параметров.

Сигналы, поступающие с датчиков расположенных на ГСС, аппроксимируемые с помощью перечисленных ортогональных базисов, к сожалению, были синтезированы с большей погрешностью, чем с помощью пяти экспоненциальных функций вида

$a e^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}}$ . Таким образом, для зависимости  $\gamma(t)$  наилучшее приближение обеспечивается рядом

$$\begin{aligned} \gamma(t) = & 11,5546 \cdot e^{-\frac{(t-85)^2}{3200}} - 23,4085 \cdot e^{-\frac{1}{98}(t-122)^2} - 6,90882 \cdot e^{-\frac{1}{98}(t-55)^2} - \\ & - 16,7265 \cdot e^{-\frac{1}{98}(t-2,5)^2} - 4,13. \end{aligned} \quad (3)$$

**Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.**

1. Для сигналов всех трех датчиков расположенных на тазобедренном, коленном и голеностопном суставах, существуют оптимальные модели, обеспечивающие минимальную среднеквадратичную погрешность  $\sigma$ .

2. При выборе оптимальной базисной системы ортогональных функций необходимо учитывать не только параметр  $\sigma$ , но и точность воспроизведения основных информативных параметров.

**Список литературы:** 1. *Носова Т. В., Письменецкий В. А., Семенец В. В.* Моделирование биомеханических сигналов нижних конечностей // *Радиоэлектроника и информатика. Информационные технологии.* 2003. №1. С. 122-123. 2. *Рыжевский А. Г., Шабалов Д. В.* Автоматизация контроля формы моноимпульсных сигналов. Москва: Энергоатомиздат, 1967. 97с. 3. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. 672с.

*Поступила в редколлегию 6.08.2003*

УДК 519.7:007.52

В.Б. РЕПКА, В.Ю. БОРДЮГ

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ СТРУКТУРЫ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ В ДИСТАНЦИОННОМ ОБУЧЕНИИ

### Введение.

На современном этапе развития образования все более весомое место среди различных способов получения знаний и закрепления изученного материала занимает дистанционное обучение – логичная и естественная форма обучения. Поэтому, вслед за возрастанием тенденций к переходу на электронные средства контроля знаний, возникла потребность в упрощении и автоматизации формирования материала для подачи и проверки знаний. Одним из наиболее распространенных способов проверки знаний является тестирование. Тесты применимы практически в любой отрасли науки от лингвистики до программирования. Удобнее всего формулировать вопрос по определению, поскольку в определении обычно не встречается неоднозначности и расплывчатости – оно формулируется четко и ясно. Кроме того, большинство тестов имеют ограничения во времени для ответов. Следовательно, они содержат общие вопросы, которые требуют мгновенного ответа и базируются исключительно на знании определений. Формулировка вопросов по определениям вручную не упрощает процесса подготовки материала, частично обесценивая электронный способ проверки знаний.

### Постановка задачи.

Часто в русском языке можно проследить закономерность построения общих вопросов на основе определения, но встречаются случаи, когда существует несколько вариантов построения общих вопросов по одному и тому же определению. Здесь вступает в роль не только логический и лингвистический подходы к формированию вопроса, но и так называемый человеческий фактор [1]. Согласно мнению ученых, данный фактор во многом основывается на процессах, происходящих в нейронах человеческого мозга. С точки зрения классификации знаний, эти процессы и результаты их протекания следует отнести к нечетким знаниям. Одним из наиболее мощных и интересных аппаратов, работающих с нечеткими знаниями, являются нейронные сети. Возникает закономерный вопрос: а можно ли – и насколько успешно – обработать нечеткие знания данного примера с помощью искусственных нейронных сетей [2].

Если проанализировать многообразие форм определения, существующих в русском языке, то можно выделить некоторые шаблоны, под которые любое определение можно скорректировать. Одно из основных правил такой корректировки – построение определений, в которых присутствует словосочетание «– это», нет сложных оборотов, более двух подчиненных предложений и т.п. Согласно правилам русского языка, для построения общего вопроса нужно изменить порядок слов в предложении. Таким образом, имея определение, построенное по всем правилам языка, можно автоматизировать генерацию специального вопроса. Процесс генерации будет заключаться в определении порядка слов в предложении общего вопроса.

Задача, которая ставится перед нейронной сетью, может быть сведена к задачам классификации определенных конструкций определения по соответствующим позициям в вопросе. На входы нейронной сети подаются три или две конструкции, которые необходимо рассортировать правильным образом, не нарушив логическую структуру предложения. Такая постановка вопроса несколько отличается от обычной постановки задач классификации [3,4], когда на входы нейронной сети поступает один цельный объект с сово-

купностью признаков, по которым его необходимо отнести к определенному классу [3]. В рассматриваемой задаче существенен единственный признак – позиция конструкции в определении. Существует еще признак, отвечающий за смысловую нагрузку определения, но он не поддается описанию, поскольку и представляет собой результат сложнейшей организации нервной системы человека.

Не удивительно, что вслед за всем вышеизложенным встает вопрос: как сможет нейронная сеть уловить смысловую нагрузку предложения, представляющую собой нечеткие знания? Очевидно, что для решения описываемой задачи лучше подойдет сеть, которая будет обучаться с учителем [3]. При таком способе обучения, она получит входные данные и точные правильные ответы, не содержащие нечеткости, что позволит ей правильно настроить и скорректировать результаты своей работы, максимально приблизив их к верным. Среди многообразия архитектур нейронных сетей, решающих задачи классификации, для рассматриваемой задачи была выбрана сеть многослойный перцептрон как одна из гибко и наиболее результативно обучаемых с учителем сетей [3].

### Анализ входных данных.

Входные данные для данной задачи представляют собой определение некоторого понятия или понятий на русском языке. Как синтаксическая конструкция, правильно сформулированное определение имеет следующие элементы:

- определяемую конструкцию;
- конструкцию «– это»;
- определяющую конструкцию;
- союзную конструкцию;
- дополнение определяющей конструкции.

Определяемая конструкция, с точки зрения языка, представляет собой слово или словосочетание, смысл или значение которого поясняется в определяющей конструкции. Наличие этого элемента обязательно для предложения, идентифицирующегося как определение. Конструкция «– это» является основным признаком определения.

Определяющая конструкция – это слово, чаще словосочетание, которое поясняет смысл определяемой конструкции и также необходимо в определении. Союзная конструкция представляет собой союз с дополняющими словами. Она связывает определяющую конструкцию с дополнением определяющей конструкции. Дополнение определяющей конструкции расширяет и уточняет поясняющие понятия. Дополнения может не быть в определении.

В соответствии с вышеописанным составом определения на рис. 1, 2 показан порядок расположения составляющих частей определения.

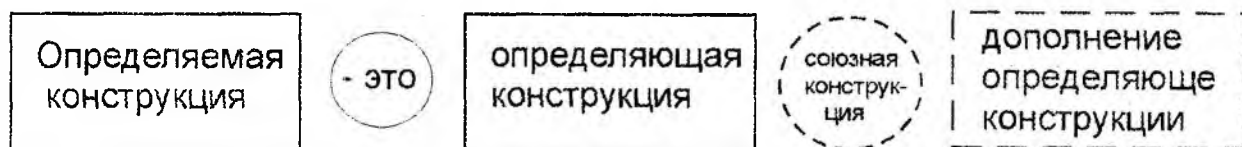


Рис. 1. Сложная структура определения.

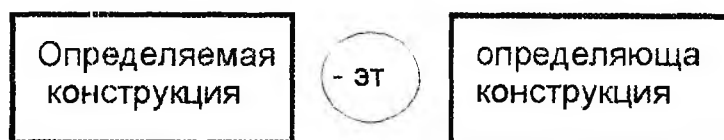


Рис. 2. Простая структура определения.

Таким образом, определяемая конструкция занимает первую позицию в определении. Определяющая конструкция – вторую, а дополнение определяющей конструкции (если оно присутствует) – последнее.

В зависимости от наличия дополнения определяющей конструкции, возможны два типа исходных данных-определений: сложное определение (дополнение определяющей конструкции присутствует, рис. 1) или простое определение (дополнение определяющей конструкции отсутствует, рис. 2).

По правилам языка общий вопрос формируется изменением порядка слов в определении и опусканием некоторых слов. Основное свойство определения – конструкция «– это» - не выполняет больше никаких функций и опускается из рассмотрения, как и союзная конструкция.

Определяемая конструкция всегда находится на последнем месте. Если в определении нет дополнения определяющей конструкции, то на первом месте всегда стоит определяющая конструкция. Такой вопрос будет иметь простую структуру (рис. 3а).

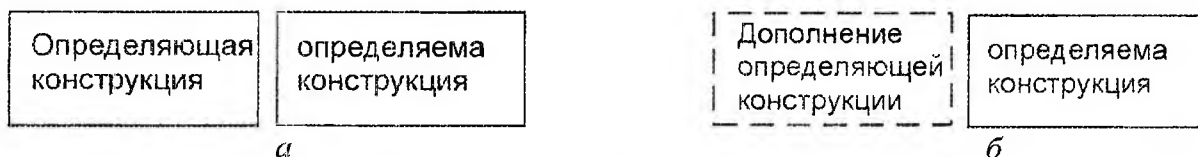


Рис. 3. Простые структуры вопроса.

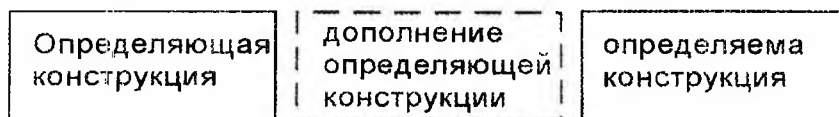


Рис. 4. Сложная структура вопроса.

Если определение сложное, то возможен как сложный, так и простой ответ. В данном случае результат зависит от содержания определения. Иногда определяющую конструкцию можно опустить. Тогда первое место в вопросе занимает дополнение и на выходной вопрос является простым (рис. 3б). Когда определяющую конструкцию опустить нельзя, то первое место занимает определяющая конструкция, второе – ее дополнение, а третье – определяемая конструкция. Такой вопрос имеет сложную конструкцию (рис. 4). Оба варианта допустимы и верны. Возможна также схема вопроса, приведенная на рис. 3а, при сложном определении. Очевидно, что простое определение не вызывает особых трудностей и вопросов, т. к. оно всегда порождает только простые общие вопросы. Трудности возникают при наличии сложного определения, т.к. результат зависит от смысловой нагрузки. Конечно, в этом случае можно обойтись сложным вопросом, но гораздо интереснее получить простой, повышая, таким образом, разнообразие вопросов.

Поскольку нейронные сети работают только с числовыми данными [4, 5], обозначим наличие соответствующей определенному месту в определении конструкции единицей, а отсутствие – нулем. Тогда общий вид определения в числовой форме представляется вектором (1, 1, 1) или (1, 1, 0). Определяемая конструкция вычленяется как часть определения сначала и до конструкции «– это», определяющая конструкция - от конструкции «– это» до союзной конструкции, дополнение определяющей конструкции – от союзной конструкции до конца предложения. Если дополнение определяющей конструкции отсутствует, то определяющая конструкция заканчивается концом определения. Для ускорения процесса обучения и корректной работы сети начальные значения должны быть нормированы. Причем важно не допустить перенасыщения нейронов входного слоя. Такая ситуация возможна, когда нейроны имеют большие значения [5]. В рассматриваемой постановке

задачи значения нейронов входного слоя заранее получились нормированными и не требуют дополнительной обработки.

В числовом виде выходной вопрос можно представить как вектор, значения которого выражают позицию соответствующих конструкций в вопросе. Индекс соответствует позиции конструкции в определении. Если данная конструкция отсутствует, координата имеет значение нуль. Поскольку значения функции активации для многослойного перцептрона лежат в интервале  $[-1; 1]$  [5], то обозначим первую позицию в вопросе числом 1.0, вторую – 0.5, а третью – 0.1. Таким образом, задача сети заключается в определении позиции каждой конструкции в вопросе. В данном случае сеть должна определить число, выражающее позицию, из трех возможных или нуль, т.е. отнести определенную конструкцию определения к определенной позиции в вопросе. Получив на выходе для каждой из конструкций определенное число, обозначающее ее место в вопросе, необходимо вернуться от числовых данных к строковым и поставить строковые конструкции на вычисленные сетью места или опустить, если получено соответственное такому исходу значение.

Согласно проведенному выше анализу входных и выходных данных на входе и выходе сети имеется по три значения. Следовательно, количество входных и выходных нейронов многослойного перцептрона равняется трем. Поскольку количество входных и выходных нейронов совпадает, то для определения числа нейронов во внутренних слоях воспользуемся формулой:

$$n_{hidden} = \log_2 n_{in} = \log_2 3 \approx 2, \quad (1)$$

где  $n_{hidden}$  – количество нейронов в скрытом слое;

$n_{in}=3$  – количество нейронов во входном слое [3].

#### Разработка нейросетевой модели.

Поскольку задача сети заключается в перенастройке порядка следования входных данных, воспользуемся одним скрытым слоем. Топология многослойного перцептрона, решающего задачу генерации общих вопросов по известным определениям, представлена на рис. 5

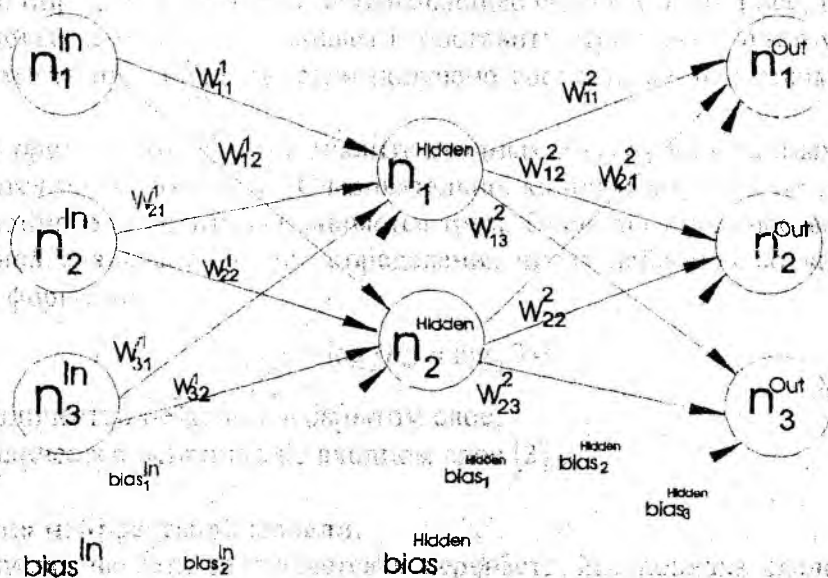


Рис. 5. Многослойные перцептрон для решения задачи генерации вопросов по известным определениям.

Одной из важных частей проектирования многослойного перцептрона является начальная разметка весов [6] – определение значений двух матриц:

$w_{ij}^1$  – матрица весов между входным и внутренним слоем, где  $i = 1..n_{in}$ , а  $j = 1..n_{hidden}$ ,

$w_{ij}^2$  – матрица весов между входным и внутренним слоем, где  $j = 1..n_{out}$ , а  $i = 1..n_{hidden}$ .

Значения весов многослойного перцептрона должны задаваться случайным образом, но подчиняться нормальному закону распределения  $N(0, 1)$  и лежать в диапазоне  $[-1, 1]$  [6, 7]. Поскольку стандартный генератор случайных чисел генерирует значения по равномерному закону распределения, то необходимо провести преобразования по формулам (2)-(3).

$$r = (2 * random1 - 1)^2 + (2 * random2 - 1)^2, \quad (2)$$

$$sq = \sqrt{(2 * \ln r) / r}, \quad (3)$$

$$w_{ij}^k = 0.0 + 1.0 * (2 * random1 - 1) * sq, \quad (4)$$

где  $random1$  и  $random2$  – последовательно сгенерированные случайные числа.

Согласно (2)-(4) соответствующим синапсам (рис. 5) были назначены веса следующим образом:

$$w_{ij}^1 = \begin{pmatrix} -0.2903 & 0.1513 \\ 0.2086 & 0.5104 \\ 0.8098 & -0.1286 \end{pmatrix}, \quad w_{ij}^2 = \begin{pmatrix} -0.6984 & -0.6300 & 0.5250 \\ -0.2368 & 0.1852 & 0.1109 \end{pmatrix}$$

При проектировании многослойного перцептрона важно правильно задать смещения  $bias^k$  и их веса, что значительно упростит и ускорит процесс обучения сети [7]. Поскольку, согласно проведенному анализу входных и выходных данных, значение первого выходного нейрона определяется всегда однозначно,  $n_i^{out} = 0.1$ , а второго и третьего может быть равным 1.0; 0.5 или 0.0, то вектор для смещения  $bias^{hidden}$  зададим следующий:  $(-0.5, 1.0, 1.0)$ . Для смещения  $bias^{out}$  выберем такой же вектор. Назначим смещение  $bias^{hidden} = bias^{out} = 1.5$ .

Линейная составляющая  $S_i^{hidden}$  для нейронов ассоциативного слоя вычисляется по формуле (5):

$$S_i^{hidden} = bias^{hidden} * bias_i^{hidden} + \sum_{j=1}^{n_{in}} w_{ji}^{hidden} * n_j^{in}, \quad (5)$$

где  $bias_i^{hidden}$  –  $i$ -й синапс для смещения  $bias^{hidden}$ ,

$n_j^{in}$  – значение  $j$ -го нейрона входного слоя.

Линейная составляющая  $S_i^{out}$  для нейронов ассоциативного слоя вычисляется по формуле:

$$S_i^{out} = bias^{out} * bias_i^{out} + \sum_{j=1}^{n_{hidden}} w_{ij}^{out} * n_j^{hidden}, \quad (6)$$

где  $n_j^{hidden}$  – значение  $j$ -го нейрона ассоциативного слоя.

В роли функции активации для многослойного перцептрона выступает сигмоида [3, 7]

$$n_i^k = 1 / (1 + e^{-\alpha * S_i^k}), \quad (7)$$

где  $n_i^k$  – значение  $i$ -го нейрона в слое  $k$ ;

$\alpha$  – коэффициент, определяющий степень приближения графика сигмоиды к единице;

$S_i^k$  – значение линейной составляющей  $i$ -го нейрона в слое  $k$ .

Для описываемого многослойного перцептрона было принято значение  $\alpha = -0.5$ .

Полученные выходные значения  $n_i^{out}$  нуждаются в проверке на совпадение с ожидаемыми  $d_i^{out}$ . При этом возможен вариант, когда

$$n_i^{out} = d_i^{out} . \quad (8)$$

Это означает, что сеть обучена правильно и готова к тестированию [7]. Если условие (8) не выполнено, тогда вычисляется ошибка сети:

$$errorNet_{step} = \sum_{i=1}^{n_{out}} (d_i^{out} - n_i^{out}), \quad (9)$$

где  $errorNet_{step}$  – это ошибка сети на шаге обучения  $step$ .

Если  $errorNet_{step} = errorNet_{step-1}$ , то сеть считается обученной [4, 7]. Но фактически, из-за использования чисел с двойной точностью, такое равенство никогда не будет достигнуто, поэтому ограничимся точностью вычислений до четырех знаков после запятой. Тогда условие окончания обучения сети выражается формулой (10):

$$errorNet_{step} - errorNet_{step-1} \leq 0.00006 \quad (10)$$

Таким образом, неточность составляет 0.006%.

Если ни одно из условий окончания обучения сети не выполнено, то сеть итеративно перенастраивает веса по алгоритму «back propagation». Веса перенастраиваются с последнего слоя out по формуле

$$w_{ij}^k(step + 1) = w_{ij}^k(step) + \eta * \delta_i^k * n_i^{k-1}, \quad (11)$$

где  $w_{ij}^k(step + 1)$  – значения соответствующих весов между  $i$ -м нейроном слоя  $k$  и  $j$ -м нейроном слоя  $k-1$  для следующего шага обучения;

$w_{ij}^k(step)$  – текущее значение весов между  $i$ -м нейроном слоя  $k$  и  $j$ -м нейроном слоя  $k-1$ ;

$\eta$  – параметр скорости обучения, который определяется итеративно по формуле (14),

$\delta_i^k$  – ошибка слоя  $k$ , которая вычисляется по формуле (12) для последнего слоя out, и по формуле (13) для скрытого слоя hidden;

$n_i^{k-1}$  – значение нейрона предыдущего слоя: hidden или in.

$$\delta_i^{out} = (d_i^{out} - n_i^{out}) * n_i^{out} * (1 - n_i^{out}), \quad (12)$$

$$\delta_i^{hidden} = n_i^{hidden} * (1 - n_i^{hidden}) * \sum_{j=1}^{n_{out}} \delta_j^{out} * n_j^{out}, \quad (13)$$

$$\eta = 0.9 - (1/10^{step}) * step . \quad (14)$$

В формуле (12) организовано постепенное уменьшение значения параметра скорости обучения в зависимости от шага обучения.

Когда обучение заканчивается, необходимо проверить качество обучения. Для этого при каждой итерации обучения производится определение вычисления средней относительной ошибки по формуле:

$$\sigma = 1/(step * n_{out}) * \sum_{step=1}^{\infty} \sum_j^{n_{out}} ( (|d_j^{step} - n_j^{out;step}| + 1) / (|d_j^{step}| + 1) - 1) * 100\%. \quad (15)$$

Качество обучения составляет  $100\% - \sigma$  [8].

Разработанная модель нейронной сети стала основой программной системы, написанной на языке Java, которая осуществляет автоматизацию генерации общих вопросов по известным определениям.

На начальном этапе работы сеть принимает веса, полученные единожды и распределенные по нормальному закону распределения с параметрами 0 и 1. Далее происходит обучение сети и настройка весов на обучающей выборке из файла обучающей выборки и выходных данных из выходного файла. Содержания файла можно изменить, предложив сети новую обучающую выборку. Важно правильно разметить определения в файле: каждое определение начинать с новой строки, в конце ставить точку, перевести каретку и вставить разделитель «\n-----\n». Эталонные значения выхода следует просто задать подряд в столбец.

Для корректной настройки весов нейронов и смещений в описываемом случае использовалась выборка из 50 определений, взятых из предметной области «Прикладной анализ случайных данных». В ходе нескольких запусков сети многослойного перцептрона, описанные выше значения смещений  $bias^k$  и  $bias_j^k$  были определены экспериментально. На сороковом примере из обучающей выборки сеть обучилась. Средняя относительная ошибка составила 3,4%, а качество обучения многослойного перцептрона – 96,6%. Таким образом, делаем вывод, что данная выборка оптимальна для обучения и сеть наиболее обучена в таком состоянии [8].

Для тестового примера определения могут набираться вручную, или загружаться из тестового файла. На этапе первого тестирования в виде тестовой выборки использовались оставшиеся незадействованные в обучении определения из обучающей выборки.

#### Выводы.

В результате проведенного эксперимента по использованию нейронной сети для генерации общих вопросов по известным определениям и анализа результатов обучения рассматриваемой сети многослойного перцептрона был получен высокий процент качества обучения. Следовательно, аппарат нейронных сетей подходит для использования в работе с нечеткими знаниями, связанными с естественным языком, в области дистанционного обучения. Кроме того, поскольку в нашей стране система дистанционного обучения находится на стадии эксперимента [9], предполагается продолжить разработки и исследования в данной области применения нейронных сетей, расширить спектр генерируемых вопросов вопросами с возможностью ввода ответов, специальных вопросов.

**Список литературы:** 1. Попов Э.В. Общение с ЭВМ на естественном языке. М.: Наука, 1982. 360 с. 2. Смирнов Ю.М., Андреев А.М., Березкин Д.В., Брик А.В. Об одном способе построения синтаксического анализатора текстов на естественном языке // Изв. вузов. Приборостроение, 1997. Т. 40, № 5. С. 34—42. 3. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника. М. Мир, 1992. 240 с. 4. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей. Харьков: ТЕЛТЕХ, 2002. 317 с. 5. Лесная Н. С., Репка В. Б., Шатовская Т. Б. Интеллектуальный анализ данных: Научное пособие. Харьков: ХНУРЭ, 2003. 112 с. 6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: ФиС, 2002. 344 с. 7. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 382 с. 8. Горбань А. Н., Россиев Д. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996. 276 с. 9. Черников А. Очевидные успехи дистанционного образования // Компьютерное обозрение. Тема недели. 2003. № 31-32. С. 40-41.

Поступила в редакцию 10.09.2003

УДК 004.942:685.382

А.І. БИХ, М.В. ДЕМИДЮК, В.С. КАЧЕР

## МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМІ «КУКСА - ГІЛЬЗА» ПРОТЕЗІВ ГОМІЛКИ ТА СТЕГНА

### Вступ.

Досягнення високого рівня протезування та реабілітації інвалідів з ампутаційними дефектами нижніх кінцівок залежить від ряду факторів, одним з яких є якість виготовлення протезів. Найбільш важливий елемент протеза, це – куксоприймальна гільза. Саме кукса страждає від навантажень з боку гільзи, тому важливо вміти оцінити силову взаємодію кукси і гільзи протеза.

Цьому питанню присвячено багато робіт [1], але техніка вимірів тиску в гільзі дуже трудомістка для широкого впровадження в клінічну практику, а застосування при моделюванні тиску методу скінчених елементів [2] потребує великих обчислювальних потужностей і застосування спеціалізованих математичних пакетів. Тому було запропоновано удосконалити вітчизняну вимірну базу [3, 4, 5] і розробити спрощену математичну модель силової взаємодії в системі «кукса-гільза» для використання в клінічній практиці.

### Механіко-математичні моделі силової взаємодії в системі «кукса-гільза» протезів гомілки та стегна.

**Протез гомілки.** Механічна модель протеза гомілки складається зі стопи, стержня і куксоприймальної гільзи. Куксоприймальна гільза показана на рис. 1.

Наведемо співвідношення, які будемо використовувати при апроксимації поверхні приймальної гільзи. Вважаємо, що поверхня гільзи утворена обертанням «твірної» лінії навколо певної прямої, яку будемо називати поздовжньою віссю симетрії. Зв'яжемо з гільзою прямокутну систему координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , вісь  $O_2Z_2$  якої направимо вздовж даної осі симетрії (рис. 1).

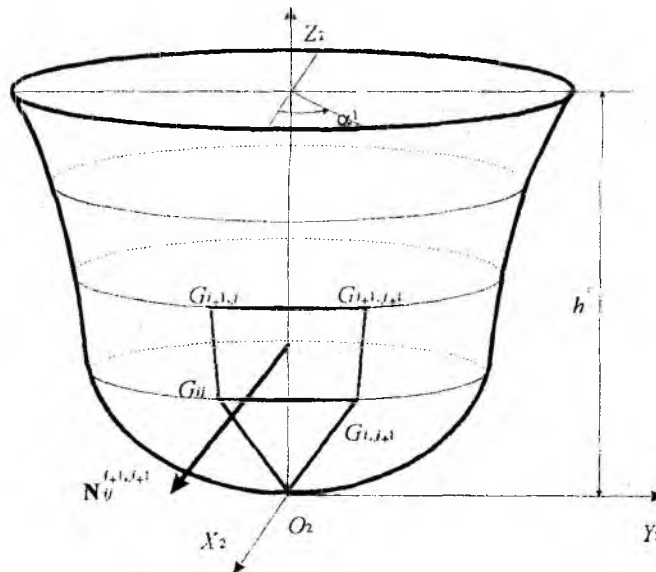


Рис. 1. Схема дискретизації поверхні гільзи в горизонтальній площині

Поверхню гільзи апроксимуємо площинами, що мають форму рівнобедрених трапецій. Координати вершин трапецій обчислюємо наступним чином. Площинами, паралельними координатній площині  $O_2X_2Y_2$ , уявно розрізаємо поверхню гільзи на  $n$  частин (по-

ясів). В результаті отримуємо  $n$  концентричних кіл з радіусами  $l_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , розташованих у площинах перетину (рис. 1).

Радіус кола  $l_i$  є функцією висоти  $h_i = |O_2 B_i|$ , на якій проходить введена вище площина перетину; дана функція  $l = l(h)$  залежить від твірної лінії поверхні гільзи і задається таблицею (на підставі експериментальних досліджень). Вважаємо, що функція  $l = l(h)$  є зростаючою на інтервалі  $h \in [0, h^\circ]$ , де  $h^\circ$  – висота гільзи. Запишемо рівняння кола з радіусом  $l_i$  у полярній системі координат:

$$x = l_i \cos \alpha, \quad y = l_i \sin \alpha, \quad \alpha \in [0, 360^\circ]. \quad (1)$$

Дискретизуємо проміжок зміни кута  $\alpha \in [0, 360^\circ]$  на  $m$  частин  $\alpha_0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_m < \alpha_{m+1}$ , ( $\alpha_0 = 0$ ,  $\alpha_{m+1} = 360^\circ$ ). Тоді координати вершини  $G_{ij}$  апроксимуючої трапеції обчислюються за такими формулами:

$$x_{ij} = l_i \cos \alpha_j, \quad y_{ij} = l_i \sin \alpha_j, \quad z_{ij} = h_i, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 0, \dots, m. \quad (2)$$

Зауважимо, що для нижнього поясу поверхні гільзи апроксимуючі трапеції вироджуються у рівнобедрені трикутники з спільною вершиною  $O_2$ . Точки  $G_{ij}$ ,  $G_{i+1,j}$ ,  $G_{i+1,j+1}$  і  $G_{i,j+1}$  належать одній площині.

Рівняння площини, що проходить через три точки  $G_{ij}$ ,  $G_{i+1,j}$  і  $G_{i+1,j+1}$  запишемо в такому вигляді

$$A_{ij}^{i+1,j+1} x + B_{ij}^{i+1,j+1} y + C_{ij}^{i+1,j+1} z + D_{ij}^{i+1,j+1} = 0, \quad (3)$$

де позначено:

$$\begin{aligned} A_{ij}^{i+1,j+1} &= z_{ij}(y_{i+1,j+1} - y_{i+1,j}) + z_{i+1,j}(y_{ij} - y_{i+1,j+1}) + z_{i+1,j+1}(y_{i+1,j} - y_{ij}), \\ B_{ij}^{i+1,j+1} &= x_{ij}(z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j}) + x_{i+1,j}(z_{ij} - z_{i+1,j+1}) + x_{i+1,j+1}(z_{i+1,j} - z_{ij}), \\ C_{ij}^{i+1,j+1} &= y_{ij}(x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j}) + y_{i+1,j}(x_{ij} - x_{i+1,j+1}) + y_{i+1,j+1}(x_{i+1,j} - x_{ij}), \\ D_{ij}^{i+1,j+1} &= x_{ij}(y_{i+1,j+1}z_{i+1,j} - y_{i+1,j}z_{i+1,j+1}) + y_{ij}(x_{i+1,j}z_{i+1,j+1} - x_{i+1,j+1}z_{i+1,j}) + \\ &+ z_{ij}(x_{i+1,j+1}y_{i+1,j} - x_{i+1,j}y_{i+1,j+1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Тут і далі нижні і верхні індекси (« $ij$ », « $i+1, j+1$ ») вказують, що відповідна величина відноситься до трапеції з діагоналлю  $G_{ij}G_{i+1,j+1}$ .

Вектор  $\mathbf{N}_{ij}^{i+1,j+1}$ , перпендикулярний до площини трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  і направлений ззовні поверхні гільзи, має таке координатне представлення в системі відліку  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ :

$$\mathbf{N}_{ij}^{i+1,j+1} = -(A_{ij}^{i+1,j+1}, B_{ij}^{i+1,j+1}, C_{ij}^{i+1,j+1}). \quad (5)$$

Знак « $\leftarrow$ » пояснюється геометрією поверхні гільзи, а саме умовою  $0 < r_1 < r_2 < \dots < r_n$ .

Вважаємо, що вектор  $\mathbf{N}_{ij}^{i+1,j+1}$  прикладений в точці  $C_{ij}^{i+1,j+1}$ , яка є центром ваги площі

трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$ . Координати точки  $C_{ij}^{i+1,j+1}$  (в системі відліку  $O_2X_2Y_2Z_2$ ) даються такими співвідношеннями.

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda}, \quad y = \frac{y_1 + \lambda y_2}{1 + \lambda}, \quad z = \frac{z_1 + \lambda z_2}{1 + \lambda}, \quad (6)$$

де позначено:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{x_{i+1,j} + x_{i+1,j+1}}{2}, \quad y_1 = \frac{y_{i+1,j} + y_{i+1,j+1}}{2}, \quad z_1 = \frac{z_{i+1,j} + z_{i+1,j+1}}{2}, \\ x_2 &= \frac{x_{ij} + x_{i,j+1}}{2}, \quad y_2 = \frac{y_{ij} + y_{i,j+1}}{2}, \quad z_2 = \frac{z_{ij} + z_{i,j+1}}{2}, \quad \lambda = \frac{d_c}{d - d_c}, \\ d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad d_c = \frac{d(a + 2b)}{3(a + b)}, \\ a &= \sqrt{(x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j})^2 + (y_{i+1,j+1} - y_{i+1,j})^2 + (z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j})^2}, \\ b &= \sqrt{(x_{i,j+1} - x_{ij})^2 + (y_{i,j+1} - y_{ij})^2 + (z_{i,j+1} - z_{ij})^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Зауважимо, що в (7) параметри  $a$  і  $b$  визначають відповідно верхню і нижню основи рівнобедреної трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$ ,  $d$  – висоту даної трапеції. Формули (1)-(7) потрібні для апроксимації поверхні гільзи і обчислення координат сил взаємодії кукси і гільзи.

Площа трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  обчислюється за формулою:

$$S_{ij}^{i+1,j+1} = \frac{a + b}{2} d. \quad (8)$$

Розглянемо опорно-руховий апарат людини в фазі опори на протезовану ногу. Для побудови математичної моделі скористаємось апаратом механіки абсолютно твердого тіла [5]. Зі сторони кукси на поверхню приймальної гільзи протеза діють сили  $F$  контактної взаємодії. За третім законом Ньютона, аналогічні по величині сили, направлені в протилежний бік, будуть діяти на куксу збоку гільзи  $K$ , рис.2. Розрахунок сил взаємодії кукси і поверхні гільзи будемо проводити при певних допущеннях. По-перше, вважаємо, що опорно-руховий апарат людини перебуває в стані статичної рівноваги в заданому тестовому положенні, яке характеризується поворотом ступні відносно нерухомої опорної поверхні (відносно інерційної системи координат  $OXYZ$ ) і орієнтацією протеза гомілки відносно ступні. По-друге, припустимо, що сили, які діють зі сторони кукси на гільзу, перпендикулярні до поверхні гільзи і направлені зовні. По-третє, сили, які діють в рамках однієї апроксимуючої площини трапеції, є рівними між собою. Такі допущення дозволяють суттєво спростити процедуру розрахунку силової взаємодії у системі «кукса-гільза» і, разом з тим, як показав аналіз числових результатів, дають можливість отримати якісну і кількісну картину розподілу сил, яка добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень.

Користуючись принципом звільнення від зв'язків, відкинемо опорно-руховий апарат, замінивши дію кукси людини на гільзу протеза полем сил  $F_{ij}^{i+1,j+1}$ :

$$F_{ij}^{i+1,j+1} = f_{ij}^{i+1,j+1} \frac{N_{ij}^{i+1,j+1}}{\|N_{ij}^{i+1,j+1}\|}, \quad (9)$$

де вектор зовнішньої нормалі до поверхні гільзи  $\mathbf{N}_{ij}^{i+1,j+1}$  визначається співвідношенням (5), символом  $\| \|$  позначено довжину відповідного вектора,  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  – невідомі параметри (довжина вектора  $\mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1}$ ). Вважаємо, що вектор  $\mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1}$  є прикладеним в точці з координатами (6), яка є центром ваги площі трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$ .

Розглянемо протез гомілки, схематично зображений на рис. 2. Вважаємо, що шарнір  $O_1$  є сферичним і має три кутові ступені вільності, які будемо описувати кутами Ейлера  $\varphi_1, \psi_1, \theta_1$ . На практиці для більшості протезів ніг людини ці ступені вільності обумовлені пружною податливістю гомілково–ступневого шарніра.

Зв'яжемо з ступнею прямокутну систему координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  з початком у гомілково–ступневого шарнірі  $O_1$ . Вісь  $O_1Z_1$  направимо вгору перпендикулярно до основи ступні, вісь  $O_1Y_1$  – паралельно поздовжній осі основи ступні. З гільзою протеза зв'яжемо прямокутну систему координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , вісь  $O_2Z_2$  направимо вгору вздовж осі гільзи (вздовж прямої  $O_1O_2$ ). Поворот системи  $O_2X_2Y_2Z_2$  відносно системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  будемо описувати за допомогою кутів Ейлера  $\varphi_2, \psi_2, \theta_2$ . При відсутності кутових поворотів стоп відносно нерухомої системи відліку  $OXYZ$  (що відповідає фазі опори на всю стопу) і ланки протеза  $O_1O_2$  відносно стопи (вертикальне розташування протеза) осі систем  $O_1X_1Y_1Z_1$  і  $O_2X_2Y_2Z_2$  паралельні відповідним осям системи  $OXYZ$ .

Запишемо умови рівноваги протеза гомілки:

$$\sum_{i,j} \mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1} + M\mathbf{g} - \mathbf{F} = 0, \quad \sum_{i,j} \mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1} + \mathbf{r}_C \times M\mathbf{g} - \mathbf{r}_F \times \mathbf{F} - \mathbf{P} = 0, \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = -\mathbf{R} - M_f \mathbf{g}, \quad \mathbf{P} = -\mathbf{r}_{cf} \times M_f \mathbf{g} - \mathbf{r}_R \times \mathbf{R}, \quad (11)$$

де  $\mathbf{F}, \mathbf{P}$  – головний вектор і момент сил, що діють в шарнірі  $O_1$  на ступню зі сторони стержня  $O_1O_2$ ;  $\mathbf{R}, \mathbf{r}_R$  – головний вектор сил реакції опорної поверхні  $OXY$  і радіус-вектор точки його прикладання;  $M_f, \mathbf{r}_{cf}$  – маса та радіус-вектор центру маси ступні;  $\mathbf{g} = (0,0,g)$  – вектор прискорення сил ваги. Зауважимо, що радіус-вектори  $\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{cf}$  задаються відносно гомілково–ступневого шарніра  $O_1$ .  $M$  – сумарна маса гільзи та ланки  $O_1O_2$  протеза;  $\mathbf{r}_C, \mathbf{r}_F$  – радіус-вектори центра маси  $C$  і шарніра  $O_1$  (точки прикладення сили  $\mathbf{F}$ ) відносно полюса  $O_2$ ;  $\mathbf{r}_{ij}$  – радіус-вектор точки  $C_{ij}^{i+1,j+1}$  трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  відносно  $O_2$ . Сумування у співвідношеннях (10) проводиться по всіх  $N = nm$  трапеціях, які апроксимують поверхню гільзи. Обчислення в (10) зручно проводити в системі координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , яка жорстко зв'язана з гільзою протеза. Для цього вектори  $\mathbf{F}$  і  $\mathbf{P}$ , обчислені згідно (11) в системі координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , за допомогою відповідної матриці переходу представляють в системі відліку  $O_2X_2Y_2Z_2$ . Вектори  $\mathbf{R}, \mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{cf}$  визначаються шляхом експериментальних досліджень, при цьому вектор  $\mathbf{r}_{cf}$  є постійним у системі координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ . Знаючи (для заданого тестового положення) кути повороту ступні  $\varphi_1, \psi_1, \theta_1$  відносно нерухомої системи  $OXYZ$  можна обчислити координати  $\mathbf{r}_{cf}$  в системі  $OXYZ$ . Тоді, для заданих  $\mathbf{R}, \mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{cf}$  і  $M_f$ , використовуючи співвідношення (11), обчислюємо в системі  $OXYZ$  головний вектор  $\mathbf{F}$  і момент сил  $\mathbf{P}$ , що діють в шарнірі  $O_1$  на ступню протеза.

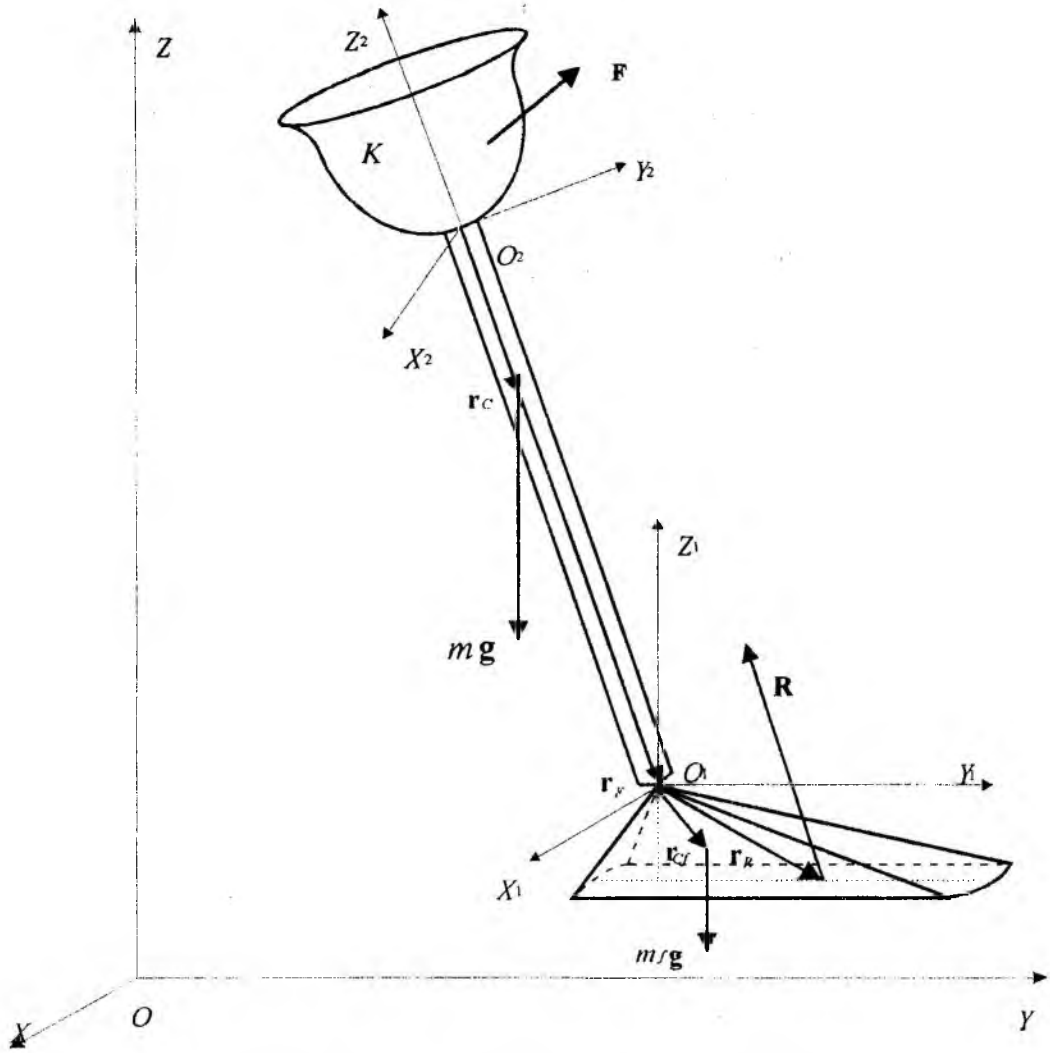


Рис. 2. Сили, які діють на протез гомілки

Друге допущення, що говорить про напрямок дії сил  $f_{ij}^{i+1,j+1}$ , має вигляд:

$$f_{ij}^{i+1,j+1} \geq 0. \tag{12}$$

Векторні рівняння (10), (11), (12) складають математичну модель для квазістатичного аналізу поля сил в системі “кукса–гільза” в одноопорній фазі на протезовану ногу.

**Протез стегна.** Розглянемо протез стегна, схематично зображений на рис. 3. Шарнір  $O_1$  є сферичним і має три кутові ступені вільності, які опишемо кутами Ейлера  $\varphi_1, \psi_1, \theta_1$ . Шарнір  $O_2$  будемо вважати циліндричним з віссю обертання  $O_2X_2$ . Один кутовий ступінь вільності колінного шарніра обумовлений конструктивними особливостями штучних колінних вузлів.

Зв’яжемо з ступнею прямокутну систему координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  з початком у гомілково–ступневою шарнірі  $O_1$ . Вісь  $O_1Z_1$  направимо вверх перпендикулярно до основи ступні, вісь  $O_1Y_1$  – паралельно поздовжній осі основи ступні. Прямокутну систему координат  $O_2X_2Y_2Z_2$  зв’яжемо з центром осі обертання колінного шарніру. Вісь  $O_2Z_2$  лежить на осі ланки  $O_1O_2$  і направлена вверх, вісь  $O_2Y_2$  лежить в площині перпендикулярній до осі  $O_2X_2$  циліндричного шарніру і направлена вперед.

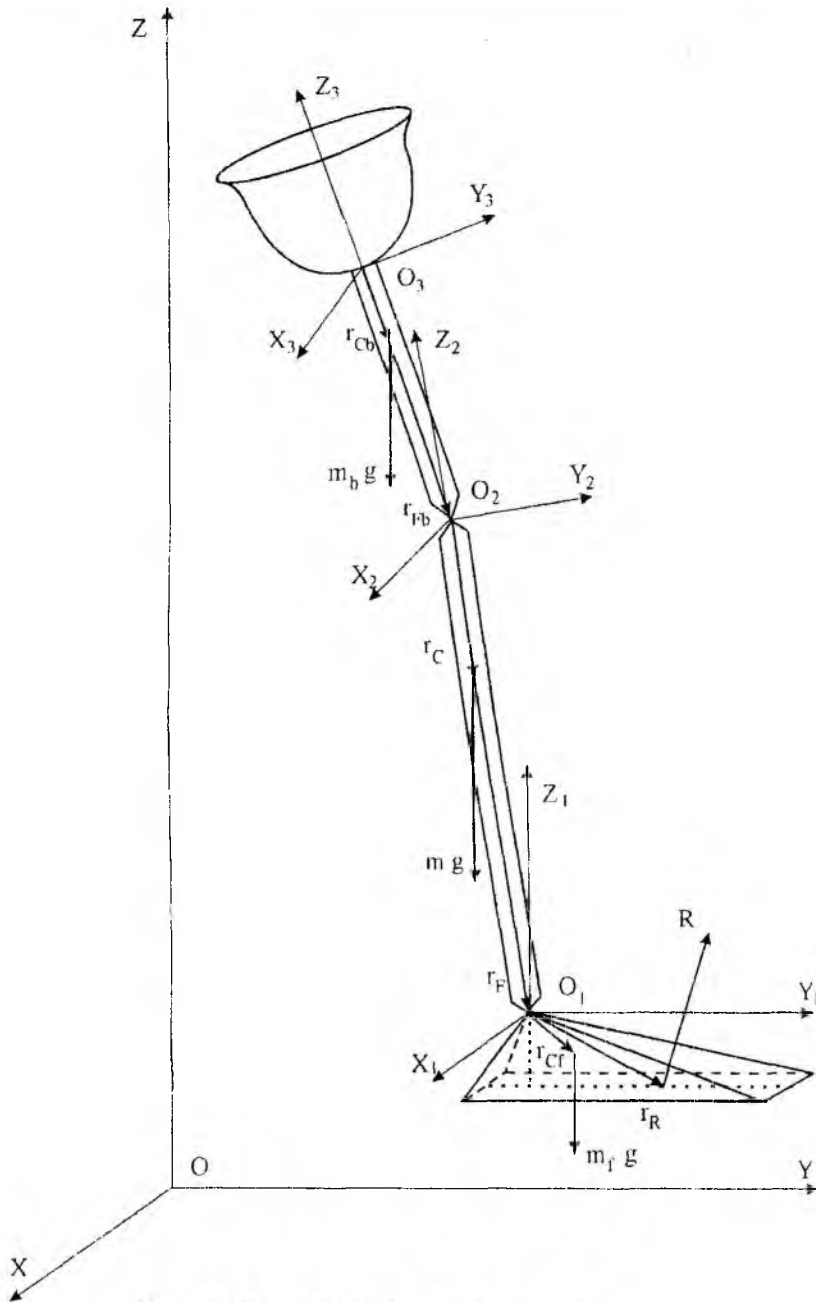


Рис. 3. Сили, які діють на протез стегна.

Поворот системи  $O_2X_2Y_2Z_2$  відносно системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  будемо описувати за допомогою кутів Ейлера  $\varphi_2, \psi_2, \theta_2$ . Прямокутна система координат  $O_3X_3Y_3Z_3$  буде пов'язана з гільзою протеза, вісь  $O_3Z_3$  направляємо вгору вздовж осі гільзи яка лежить на прямій  $O_2O_3$ .

Вісь  $O_3Y_3$  лежить в площині  $O_2Y_2Z_2$  і направлена вперед. Поворот системи  $O_3X_3Y_3Z_3$  відносно  $O_2X_2Y_2Z_2$  так само опишемо кутами Ейлера  $\varphi_3, \psi_3, \theta_3$ . Якщо повороти систем  $O_1X_1Y_1Z_1, O_2X_2Y_2Z_2$  і  $O_3X_3Y_3Z_3$  відсутні, то осі цих систем паралельні відповідним осям системи  $OXYZ$ .

Системи сил, які діють на ступню протеза стегна і гомілки однакові, тому умови рівноваги ступні протеза стегна відповідають векторному рівнянню (11).

Розглянемо рівновагу окремо виділеної частини протеза стегна, без ступні і без гільзи зі стержнем, яка відтворює гомілку (ланка  $O_1O_2$ ).

$$\mathbf{F}_1 + m\mathbf{g} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{P}_1 + \mathbf{r}_c \times m\mathbf{g} - \mathbf{r}_F \times \mathbf{F} = \mathbf{P}. \quad (13)$$

Тут  $m$  – маса ланки  $O_1O_2$ ;  $\mathbf{r}_c$ ,  $\mathbf{r}_F$  – радіус-вектори центра маси  $C$  і шарніра  $O_1$  відносно  $O_2$ ;  $\mathbf{F}$  і  $\mathbf{P}$  – сила і момент сил, які діють на ланку  $O_1O_2$  в точці  $O_1$  з боку ступні. Вектори  $\mathbf{F}$  і  $\mathbf{P}$  знайдені за формулою (11). Обчислення (13) виконуємо в системі  $O_2X_2Y_2Z_2$ .

Рівновагу частин протеза, яка містить гільзу і стержень запишемо наступним чином:

$$\sum_{i,j} \mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1} + m_b\mathbf{g} = \mathbf{F}1, \quad \sum_{i,j} \mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{F}_{ij}^{i+1,j+1} + \mathbf{r}_{Cb} \times m_b\mathbf{g} - \mathbf{r}_{Fb} \times \mathbf{F}1 = \mathbf{P}1 \quad (14)$$

Тут  $m_b$  – маса ланки  $O_1O_2$  протеза;  $\mathbf{r}_{Cb}$ ,  $\mathbf{r}_{Fb}$  – радіус-вектори центра маси  $Cb$  і шарніра  $O_2$  (точки прикладення сили  $\mathbf{F}1$ ) відносно полюса  $O_3$ ;  $\mathbf{r}_{ij}$  – радіус-вектор точки  $C_{ij}^{i+1,j+1}$  трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  відносно  $O_3$ . Сумування у співвідношеннях (14) проводиться по всіх  $N = nm$  трапеціях, які апроксимують поверхню гільзи. Обчислення в (14) проводимо в системі координат  $O_3X_3Y_3Z_3$ , яка жорстко зв'язана з гільзою протеза. Вектори  $\mathbf{F}1$  і  $\mathbf{P}1$ , обчислені згідно (13) в системі координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , за допомогою відповідної матриці переходу представляють в системі відліку  $O_3X_3Y_3Z_3$ .

Сили  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  направлені назовні відносно гільзи:

$$f_{ij}^{i+1,j+1} \geq 0. \quad (15)$$

Векторні рівняння (11), (13), (14) і (15) складають математичну модель для квазістатичного аналізу поля сил в системі “кукса–гільза” протеза стегна в одноопорній фазі на протезовану ногу.

**Постановка та алгоритм розв'язання задачі обчислення силового навантаження в системі “кукса – гільза”.**

**Протез гомілки.** Сформулюємо таку задачу. В рамках побудованої апроксимації поверхні гільзи (1)-(7) обчислити силове навантаження на куксу  $f_{ij}^{i+1,j+1}$ , яке при обмеженнях (10), (12) мінімізує цільову функцію:

$$\Phi = \frac{1}{S^2} \sum_{i,j} \left( f_{ij}^{i+1,j+1} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

де  $S$  – площа бічної поверхні гільзи.

Розв'язок цієї задачі дає можливість отримати сили  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  і обчислити тиск  $p_{ij}^{i+1,j+1}$  на поверхню кукси в будь-який момент опорної фази кроку. При заданому тестовому положенні опорно-рухового апарату людини та заданій силі взаємодії ступні з опорною поверхнею співвідношення (10), (11), (12) дають 6 алгебраїчних рівнянь і  $N$  – нерівностей для визначення  $N$  невідомих величин  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  ( $i = 1, \dots, n, j = 0, \dots, m$ ). Отримана задача є статично невизначеною (число невідомих величин перевищує число рівнянь для

їх обчислення). Для однозначного знаходження невідомих параметрів  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  використовуємо регуляризову процедуру, яка полягає в накладенні додаткових (фізично значимих) умов на шукані величини. Будемо шукати такі  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  ( $i = 1, \dots, n, j = 0, \dots, m$ ), які при співвідношеннях (10), (11), (12) мінімізують квадратичну функцію (16).

Для мінімізації цільової функції  $\Phi$  використовуємо метод штрафних функцій [6].

Фізичний сенс мінімізації функції  $\Phi$  пояснюється тим, що людина намагається розподілити тиск приймальної гільзи протеза на куксу, змінюючи їх відносне розміщення таким чином, щоб він був мінімальним.

Використовуючи наведені вище співвідношення, опишемо поетапно алгоритм обчислення сил, що діють у системі "кукса – гільза":

1. Задаємо значення параметрів  $M$  і  $M_f$ , а також лінійних розміри ступні, стержня  $O_1O_2$  і гільзи протеза.

2. Задаємо значення параметрів тестового положення протеза гомілки ( $\varphi_1, \psi_1, \theta_1$  для ступні;  $\varphi_2, \psi_2, \theta_2$  - для гільзи) і формулюємо відповідні матриці переходу від системи координат  $OXYZ$  до системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  і від системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  до системи  $O_2X_2Y_2Z_2$ .

3. Обчислимо координати векторів  $\mathbf{R}, \mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{cf}, \mathbf{g}$  в системі  $O_1X_1Y_1Z_1$ .

4. Обчислимо координати векторів  $\mathbf{F}, \mathbf{P}, \mathbf{r}_C, \mathbf{r}_F$  і  $\mathbf{g}$  в системі відліку  $O_2X_2Y_2Z_2$ .

5. Проводимо мінімізацію цільової функції, в результаті чого знаходимо шукані параметри  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  ( $i = 1, \dots, n, j = 0, \dots, m$ ), формули: (9), (10), (11), (12), (16).

7. Обчислюємо тиск  $p_{ij}^{i+1,j+1} = f_{ij}^{i+1,j+1} / S_{ij}^{i+1,j+1}$  на поверхню гільзи в рамках трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  (площу трапеції  $S_{ij}^{i+1,j+1}$  знаходимо за формулою (8)).

**Протез стегна.** Використовуючи наведені вище співвідношення, алгоритм обчислення сил, що діють у системі "кукса-гільза протеза", можна описати так:

1. Ввід значень параметрів  $m, m_f$  і  $m_b$  а також лінійних розмірів ступні, ланок  $O_1O_2, O_2O_3$  і гільзи протеза.

2. Ввід значень параметрів тестового положення протеза гомілки ( $\varphi_1, \psi_1, \theta_1$  для ступні,  $\varphi_2, \psi_2, \theta_2$  для гомілки і  $\varphi_3, \psi_3, \theta_3$  гільзи) і формування відповідних матриць переходу від системи координат  $OXYZ$  до системи  $O_1X_1Y_1Z_1$ , від системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  до системи  $O_2X_2Y_2Z_2$  і від системи  $O_2X_2Y_2Z_2$  до системи  $O_3X_3Y_3Z_3$ .

3. Обчислення координат векторів  $\mathbf{R}, \mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{cf}, \mathbf{g}$  в системі  $O_1X_1Y_1Z_1$ .

4. Обчислення на підставі співвідношень (13) векторів  $\mathbf{F}$  і  $\mathbf{P}$ .

5. Обчислення координат векторів  $\mathbf{F}, \mathbf{P}, \mathbf{r}_C, \mathbf{r}_F$  і  $\mathbf{g}$  в системі відліку  $O_2X_2Y_2Z_2$ .

6. Обчислення на підставі співвідношень (20) векторів  $\mathbf{F1}$  і  $\mathbf{P1}$ .

7. Обчислення координат векторів  $\mathbf{F1}, \mathbf{P1}, \mathbf{r}_{Cb}, \mathbf{r}_{Fb}$  і  $\mathbf{g}$  в системі відліку  $O_3X_3Y_3Z_3$ .

8. Використання алгоритму за методом штрафних функцій для пошуку параметрів  $f_{ij}^{i+1,j+1}$  ( $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ ) в задачі квадратичного програмування (9), (11), (13), (14), (15), (16).

7. Обчислення тиску  $p_{ij}^{i+1,j+1} = f_{ij}^{i+1,j+1} / S_{ij}^{i+1,j+1}$  на поверхню гільзи в рамках трапеції  $G_{ij}G_{i+1,j}G_{i+1,j+1}G_{i,j+1}$  (площу трапеції  $S_{ij}^{i+1,j+1}$  знаходимо за формулою (8)).

Розроблені алгоритми для обчислень силовій взаємодії кукси і гільзи в протезах гомілки та стегна реалізовано в середовищі пакету Math CAD, а також у вигляді програмного модуля включено до складу комп'ютерної системи оцінки якості протезування [3].

### Чисельні розрахунки та тестування спрощених моделей силовій взаємодії кукси і гільзи.

По результатам експериментальних вимірювань характеристик системи "кукса-гільза" проведено розрахунок сил, що діють на куксу.

Розглядався протез гомілки з такими конструктивними параметрами:  $h^{\circ} = 0.1$  м;

$$|O_1O_2| = 0,3 \text{ м}; \mathbf{r}_c = (0, 0, 0.05); \mathbf{r}_{cf} = (0, 0.03, -0.03); M = 0.5 \text{ кг}, M_f = 0.5 \text{ кг}.$$

Параметри гільзи після дискретизації за формулами (1)-(7) при  $n = 6$  та  $m = 9$  становили:  $h_1 = 0.018$  м,  $h_2 = 0.036$  м,  $h_3 = 0.054$  м,  $h_4 = 0.072$  м,  $h_5 = 0.09$  м,  $l_1 = 0.03$  м,

$$l_2 = 0,032 \text{ м}, l_3 = 0.034 \text{ м}, l_4 = 0.036 \text{ м}, l_5 = 0,036 \text{ м}, l_6 = 0,04 \text{ м}, l_7 = 0,05 \text{ м}; \alpha_j = \frac{360^{\circ}}{m+1} j,$$

де  $j = 0, \dots, m+1$ .

Тестове положення протеза, яке відповідає фазі заднього поштовху (фаза поштовху носком стопи), є найбільш критичним з точки зору навантажень на куксу, задавалось рівним:  $\mathbf{r}_R = (0, 0.08, -0.05)$ ,  $\mathbf{R} = (0, 35, 358)$ ,  $\varphi_2 = 0^{\circ}$ ,  $\theta_2 = 0^{\circ}$ ,  $\psi_2 = 10^{\circ}$ . Тут компоненти реакції опори  $\mathbf{R}$  визначені в системі  $CI$  (Н). Кути повороту системи  $O_1X_1Y_1Z_1$  відносно системи  $OXYZ$  задавались рівними 0. Величини шуканих сил, що діють в системі "кукса - гільза", обчислюємо згідно описаного вище алгоритму. Аналіз результатів моделювання показав, що розподіл тиску має найкраще наближення до експериментальних даних у випадку, коли поверхня гільзи апроксимується трапеціями однакової площі та геометрії.

Дослідження різниці розподілу тиску, при зміні кількості площадок в два і чотири рази показало, що збільшення кількості площадок для проведення чисельних експериментів суттєво не впливає на результат, але приводить до збільшення в 2-5 разів часу обчислень, тому є недоцільним.

Перевірка стійкості моделі показала, як впливає на результат мала зміна початкових даних, а саме: положення протеза – кут  $\psi_1$ ; величина сили реакції опори –  $\mathbf{R}$ ; геометрія гільзи – радіус  $l_1$ . Зміни початкових даних на 1% призвели до змін результатів на 0.9%, 0.3%, 0.3%, що говорить про стійкість розробленої моделі.

Для тестування математичної моделі, методом прямих вимірювань тиску між куксою і гільзою, датчик тиску розмістили в зоні зв'язки надколінника (передня частина посадочного кільця гільзи). Результати тестування математичної моделі представлено на рис. 4.

Безперервною лінією позначено графік змін тиску в фазі опори, який отримано методом вимірювань. Результат чисельного моделювання, показаний на графіку в окремих точках, відповідає моментам часу переднього поштовху 178 кПа, середини фази опори 150 кПа та заднього поштовху 231 кПа. За результатами моделювання можна сказати, що найбільше навантаження на протезовану кінцівку виникає в період заднього поштовху.

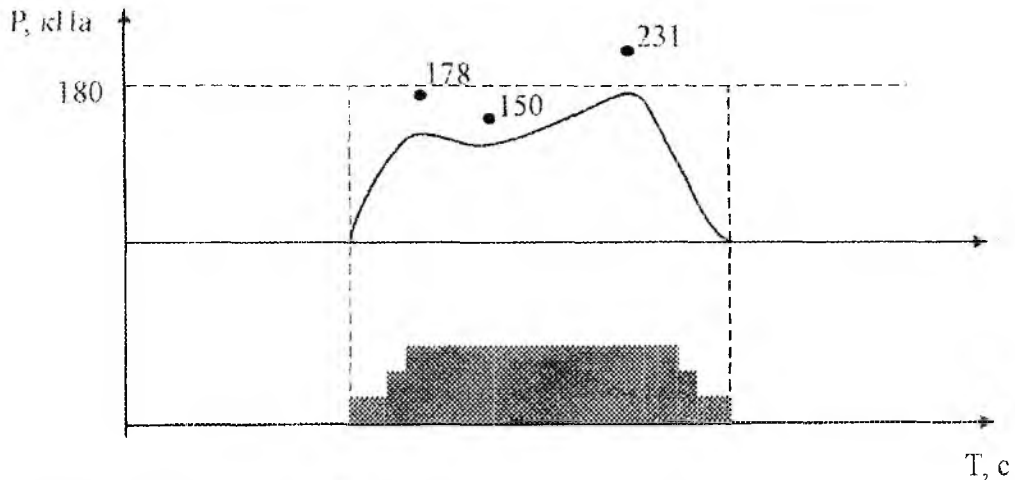


Рис. 4. Результати тестування математичної моделі методом прямих вимірювань тиску між куксою і гільзою.

Причиною є найбільше віддалення результуючої сили  $R$  від осі гомілквоступневого шарніра. Характер розподілу навантажень і порядок величин тиску, отримані обома методами, співпадають.

#### Висновки.

В рамках апарату механіки абсолютно твердого тіла розроблено механіко-математичні моделі силової взаємодії в системі "кукса-гільза" протеза з врахуванням біомеханічних вимог до протезів гомілки і стегна. Побудовано алгоритм обчислення силового навантаження в системі "кукса - гільза" з використанням методу штрафних функцій, який реалізовано в середовищі інтегрованого математичного пакету MathCAD.

Досліджено стійкість моделі, метод дискретизації поверхні гільзи і рівень наближення даних моделювання до експериментальних даних, отриманих шляхом прямих вимірювань. Шляхом експериментальних досліджень показано, що результати моделювання мають один порядок величин і характер розподілу тиску з експериментальними даними, що дозволяє застосовувати розроблені механіко-математичні моделі в практиці протезування для оцінки силового навантаження і ранньої діагностики кукси.

**Список літератури:** 1. Arthur F.T. Mak, Ming Zhang, David A. Boon. State-of-the-art research in lower-limb prosthetic biomechanics-socket interface // J. Rehabil. Res. Dev. 2001. № 2. 2. Silver-Torn M.B., Childress D.S. Parametric analysis using the finite element method to investigate prosthetic interface stresses for persons with trans-tibial amputation // J. Rehabil. Res. Dev. 1996. № 3. P. 227-237. 3. Бербюк В.Е., Демьдюк М.В., Красюк Г.В., Ковалько Н.Т., Качер В.С. Автоматизированный сбор, обработка и анализ биомеханических данных ходьбы человека // Вестник ХГПУ. Харьков: ХГПУ. 1999. Выпуск 73. С. 7-13. 4. Пат. № 54139 А, Україна, МПК А61В5/103. Пристій для оцінки стійкості і опороздатності людини / Салеева А.Д., Качер В.С., Гадяцький О.В., Ковалько М.Т., Роман Л.К., Василенко І.М., Малиняк М.І., Рибка Є.В. 5. Пат. № 42127 А, Україна, МПК А61F2/60. Поліцентричний гоніометр / Качер В.С., Ковалько М.Т., Роман Л.К., Василенко І.М.; Науково-дослідний інститут з проблем соціального захисту населення - № 9904232; Заявл. 24.04.99; Опубл.; Промислова власність. Офіційний бюлетень. 2001. № 9. 6. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Часть первая. М.: Наука, 1965. 468 с. 7. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование: теория и алгоритмы. М.: Мир, 1982.

Поступила в редколлегию 17.09.2003.

УДК 519.7

Т.М. НЕОФИТНАЯ

## РАЗРАБОТКА КАТЕГОРНОЙ МОДЕЛИ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В статье описана математическая модель базы знаний интеллектуальной системы принятия решений, для разработки которой использовался аппарат теории категорий. Применение данной модели позволяет обеспечить многоаспектное представление системы знаний о сложной предметной области, одновременно и согласованно учитывать онтологические и проблемные знания, рассматривать структуру отношений между различными концептуальными моделями предметной области.

Включение в контур управления интеллектуальных систем принятия решений, которые основываются на эффективном взаимодействии методов принятия решений и искусственного интеллекта, обеспечивает сокращение времени на формирование и оценку альтернатив управления, увеличивает обоснованность принимаемых решений. Ядром интеллектуальной системы принятия решений (ИСПР) является база знаний о предметной области (ПрО), которая содержит специальным образом организованные сведения о состояниях объекта управления, внешней среды и возможных конфликтных ситуациях. Успешность разработки базы знаний (БЗ) определяет способность ИСПР к решению функциональных задач пользователя.

Разработка баз знаний ИСПР – это длительный, трудоемкий и слабоформализованный процесс, который требует тщательного изучения системы знаний о сложной ПрО. В ходе этого процесса осуществляется структурирование и упорядочивание знаний о ПрО, что обеспечивает адекватное концептуальное представление сложной ПрО в базе знаний ИСПР. Частые изменения объекта управления и внешней среды, задач пользователей, а также самих пользователей требуют высокого уровня адаптивности БЗ ИСПР. В этой связи очень важным является рациональный выбор метода разработки и структуры БЗ ИСПР. Поэтому актуальной является разработка новых моделей и методов разработки БЗ ИСПР. Целью данной работы является разработка математической модели БЗ ИСПР, описывающей на формальном уровне взаимосвязи ее элементов.

### 1. Постановка задачи разработки математической модели БЗ ИСПР.

Рассмотрим базовые принципы разработки БЗ современных ИСПР. Понятно, что полное описание системы знаний о сложной предметной области в БЗ ИСПР является практически неосуществимым. Прежде всего, база знаний должна содержать существенные, с точки зрения поставленных перед ИСПР целей, знания о ПрО. При этом для решения отдельной функциональной задачи ИСПР будет использоваться только некоторая часть этих знаний, составляющая прикладную модель ПрО.

Существует два основных подхода к созданию прикладных моделей ПрО [1]. Первый подход предполагает построение прикладной модели ПрО на основе анализа и интеграции информационных потребностей пользователей. Вторым подходом, прежде всего, предполагает изучение самой ПрО (онтологический анализ ПрО) и, затем, построение прикладной КМ ПрО с учетом информационных потребностей пользователей. Первый подход часто применяется для разработки баз данных. Но информационная система с такой базой данных, не сможет проявить достаточную гибкость при обработке информации для непредвиденных приложений [1]. Вторым подходом в значительной мере свободен от этих недостатков и поэтому более пригоден для разработки БЗ ИСПР.

Таким образом, разработку прикладной КМ ПрО будем проводить с учетом как онтологических, так и проблемных знаний о ПрО, что позволяет одновременно обеспечить адаптивность и эффективность БЗ. При этом в результате онтологического анализа разрабатывается первоначальная (базовая) КМ ПрО, которую далее будем называть онтологической моделью ПрО. Проблемные знания о ПрО используются для усовершенствования онтологической модели ПрО до прикладной КМ ПрО. Содержание каждой прикладной КМ ПрО определяется ПрО и классом функциональных задач, для решения которых предназначена данная модель. Естественно, что онтологическая модель ПрО не связана с конкретными функциональными задачами (проблемами) решаемыми ИСПР. Это позволяет использовать одну и ту же онтологическую модель ПрО для разработки различных прикладных КМ ПрО. Кроме того, однажды полученная онтологическая модель ПрО может быть применена в разных базах знаний, что позволяет значительно упростить процесс разработки БЗ для новой ИСПР.

Многие современные ИСПР предназначены для решения множества взаимосвязанных функциональных задач (проблем). Поэтому в БЗ ИСПР необходимо поддерживать множество прикладных КМ ПрО, используемых для решения различных задач. Поскольку функциональные задачи ИСПР являются взаимосвязанными между собой, то между различными прикладными КМ ПрО также будут выполняться определенные отношения.

Учитывая рассмотренные принципы разработки БЗ ИСПР, сформулируем требования к математической модели БЗ ИСПР. Разрабатываемая математическая модель БЗ ИСПР должна позволять:

- 1) обеспечить концептуальное представление системы знаний о сложной ПрО;
- 2) одновременно и согласованно учитывать онтологические и проблемные знания о ПрО;
- 3) описывать структуру отношений между КМ ПрО, которые предназначены для решения различных функциональных задач пользователя.

Теперь перейдем к построению математической модели БЗ ИСПР, удовлетворяющей сформулированным требованиям. Для этого, прежде всего, дадим общее математическое определение концептуальной модели ПрО.

## **2. Общее математическое определение концептуальной модели предметной области.**

Для концептуального моделирования ПрО будем использовать множество концептов (концептуальных классов) и множество семантических отношений, определяемых между концептуальными классами [2, 3]. Здесь под концептуальным классом понимается концептуальная единица модели, рассматриваемая как целое [4]. Семантические свойства концептов проявляются через их семантические отношения с другими концептами. Каждый концепт имеет имя. Пусть  $U = \{K_1, K_2, \dots, K_k\}$  – множество имен концептов, используемых для моделирования знаний ПрО. Назовем  $n$ -местным семантическим отношением  $r^n$  на множестве  $U$  совокупность упорядоченных наборов (кортежей), составленных из элементов множества  $U$  вида  $\langle K_1, K_2, \dots, K_n \rangle$ .

Семантические отношения также могут быть поименованы. Поэтому введем в рассмотрение множество имен семантических отношений  $\Omega$  вместе с отображением  $\text{Sig}: \Omega \rightarrow N_0$  во множество неотрицательных целых чисел  $N_0$ . Пара  $(\Omega, \text{Sig})$  называется сигнатурой [2]. Для удобства само  $\Omega$  также будем называть сигнатурой, считая каждое слово (имя)  $R$  из сигнатуры  $\Omega$  снабженным индексом  $\text{Sig}(R) = n \in N_0$ , что будем обозначать  $R^{(n)}$ . Пусть  $L(U)$  – множество всевозможных отношений разной местности на множестве  $U$ . Сопоставив число  $n$  каждому  $n$ -местному семантическому отношению, получим

отображение  $\text{Sig}_U: L(U) \rightarrow N_0$ . Концептуальной моделью в сигнатуре  $\Omega$  будем называть пару  $\langle U, \text{Sem} \rangle$ , где  $\text{Sem}$  – такое инъективное отображение  $\text{Sem}: \Omega \rightarrow L(U)$ , что выполняется  $\text{Sem} \cdot \text{Sig}_U = \text{Sig}$ . Функция  $\text{Sem}$  каждому слову  $R^n$  из сигнатуры  $\Omega$  сопоставляет местное семантическое отношение  $r^p$  из  $L(U)$ . Заметим, что двум разным названиям семантических отношений из сигнатуры  $\Omega$  соответствуют разные отношения, поскольку отображение  $\text{Sem}$  инъективно. Кроме того, правила именования отношений должны обеспечивать присвоение различных имен разным отношениям.

Таким образом, получено общее математическое определение концептуальной модели ПрО. Но данное математическое определение является достаточно упрощенным. В частности, что оно не учитывает различие между онтологическими и проблемными знаниями о ПрО.

### **3. Разработка математической модели онтологии предметной области, онтологической модели и прикладной концептуальной модели предметной области.**

В последнее время в области разработки информационных систем, в том числе ИСПР, большое значение приобретает проведение онтологических исследований ПрО. Можно даже говорить о том, что в рамках инфологического (концептуального) моделирования ПрО выделилось отдельное направление – онтологический анализ ПрО, результатом которого является создание онтологий ПрО.

Само понятие «онтология» берет начало из философии и обозначает учение об устройстве мира. Онтологический анализ подразумевает здесь изучение наиболее общих абстрактных категорий, например, таких, как причина, действие, явление, событие и т. д. [3]. Однако, в практике создания прикладных информационных систем такое определение не используется, поскольку для этих систем разрабатываются онтологии ПрО, а не онтологии в общем смысле. Онтологический анализ ПрО подразумевает анализ системы категорий, используемых в данной ПрО.

Известным определением онтологии ПрО является определение, данное Такедой, согласно которому: онтология есть консенсус о предметной области для определенных целей [3]. Существует много других вариантов определений понятия «онтология ПрО». При этом большинство определений скорее дополняют, чем опровергают друг друга, указывая необходимые свойства онтологий ПрО и основные отличия онтологий ПрО от содержимого баз знаний интеллектуальных систем.

Сформулируем свойства онтологий ПрО, обозначенные в различных работах по моделированию предметных областей [1, 3, 5, 6].

1. *Концептуальность*. Онтология представляет собой концептуальный (семантический) объект, описанный формальным или неформальным способом. Концептуализация подразумевает абстрактную точку зрения на ПрО и содержит понятия и отношения, специфичные для данной ПрО. При этом, многие авторы подчеркивают, что онтология описывает только некоторую часть концептуализации.

2. *Универсальность*. Онтология содержит только наиболее важные, существенные знания о ПрО, которые являются достаточно теоретизированными и общезначимыми, не могут быть опровергнуты каким-либо образом.

3. *Согласованность*. Онтология содержит согласованные знания, разделяемые некоторым сообществом экспертов ПрО, в отличие от базы знаний, которая может быть построена на основании знаний одного эксперта; это способствует точной и эффективной передаче смысла понятий ПрО.

Таким образом, будем полагать, что онтология ПрО определяет семантику (концептуализацию) ПрО, однако не полностью, оставляя свободу для расширения онтологии до прикладной КМ ПрО, необходимой для решения конкретных практических задач, и предполагает возможность повторного и распределенного использования в различных информационных системах. Основное назначение онтологии ПрО в задачах разработки БЗ ИСПР состоит в облегчении построения семантически корректной прикладной КМ ПрО.

Поэтому наиболее удобной для моделирования онтологии является математическая конструкция каркаса, описанная в работе [7]. Для математического моделирования онтологии ПрО будем использовать каркас вида:

$$\Theta = \langle \langle U, \text{Sem}_\Theta \rangle, \Omega_M, \mathcal{A} \rangle,$$

где  $\langle U, \text{Sem}_\Theta \rangle$  – КМ в сигнатуре  $\Omega_\Theta$ ,  $\Omega_M$  – сигнатура, которая не имеет общих имен отношений с сигнатурой  $\Omega_\Theta$ ,  $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_l\}$  – множество аксиом, ограничивающих интерпретацию и правильное использование концептов и семантических отношений как из сигнатуры  $\Omega_\Theta$ , так и из  $\Omega_M$ . При этом имена отношений из сигнатуры  $\Omega_M$  обозначают возможные семантические отношения на множестве  $U$ , удовлетворяющие аксиомам из множества  $\mathcal{A}$ . Отметим, что каркас  $\Theta$  будет являться моделью некоторой онтологии ПрО только в том случае, если соблюдены содержательные требования к онтологиям ПрО, рассмотренные выше (требования концептуальности, универсальности, согласованности онтологических знаний о ПрО).

Теперь дадим математическое определение онтологической модели и прикладной КМ ПрО. Концептуальную модель  $\langle U, \text{Sem}_\Theta \rangle$ , лежащую в основе некоторой онтологии  $\Theta = \langle \langle U, \text{Sem}_\Theta \rangle, \Omega_M, \mathcal{A} \rangle$ , будем называть онтологической моделью ПрО. Под прикладной КМ ПрО будем понимать состояние каркаса  $\Theta = \langle \langle U, \text{Sem}_\Theta \rangle, \Omega_M, \mathcal{A} \rangle$ , некоторую концептуальную модель  $\langle U, \text{Sem}_M \rangle$  в сигнатуре  $\Omega = \Omega_\Theta \vee \Omega_M$ . При этом функции  $\text{Sem}_\Theta$  и  $\text{Sem}_M$  совпадают на сигнатуре  $\Omega_\Theta$  и выполняется аксиоматика  $\mathcal{A}$ . Следовательно, прикладную КМ ПрО получаем, выбирая вместо каждого названия отношения  $R_j$  из сигнатуры  $\Omega_M$  одно из возможных отношений на множестве концептов  $U$ .

Таким образом, разработаны математические определения модели онтологии ПрО, онтологической и прикладной КМ ПрО и обеспечена необходимая формализация соотношения между моделью онтологии, онтологической моделью и прикладной КМ ПрО. Модель онтологии ПрО содержит концепты и семантические отношения между ними, характерные для ПрО, и формальные аксиомы, заданные на множестве концептов и отношений. Расширение онтологической модели ПрО до прикладной КМ ПрО проводится под управлением аксиоматики, определенной в онтологии ПрО.

#### **4. Определение морфизмов между концептуальными моделями предметной области.**

Каждая прикладная КМ ПрО предполагает свое прямое использование для решения определенной задачи. Необходимость решения множества функциональных задач требует разработки и поддержки в БЗ ИСПР множества прикладных КМ ПрО. Ясно, что разные КМ ПрО в определенном смысле будут «сходны» между собой, поскольку относятся к одной и той же ПрО. Поэтому рассмотрим возможные преобразования КМ ПрО, сохраняющие структуру этих моделей и, следовательно, позволяющие находить в них «сходные» части. В теории моделей такие преобразования принято называть морфизмами [8]. Известны следующие типы морфизмов: изоморфизм, гомоморфизм, корреспонденция и эпиморфизм [7, 8]. В соответствии с этим определим морфизмы между КМ ПрО.

Рассмотрим отношение «изоморфизма» между концептуальными моделями. Пусть заданы две КМ ПрО  $M^i = \langle U_i, Sem_i \rangle$  и  $M^j = \langle U_j, Sem_j \rangle$  в одной и той же сигнатуре  $\Omega$ . Эти концептуальные модели будут изоморфными, если существует такая биекция (взаимно-однозначное отображение)  $\varphi$  из множества  $U_i$  на множество  $U_j$ , что для каждого отношения  $R^{(n)}$  из сигнатуры  $\Omega$  выполняется условие:

$$R^{(n)}(K_1, K_2, \dots, K_n) \Leftrightarrow R^{(n)}(\varphi(K_1), \varphi(K_2), \dots, \varphi(K_n))$$

для любых  $K_1, K_2, \dots, K_n \in U_i$ . Заметим, что одну и ту же структуру будут иметь только изоморфные модели. Каждая конкретная концептуальная модель есть одна из возможных реализаций соответствующей структуры.

Теперь рассмотрим отношение «гомоморфизма» между концептуальными моделями. Пусть заданы две КМ ПрО  $M^i = \langle U_i, Sem_i \rangle$  и  $M^j = \langle U_j, Sem_j \rangle$  в одной и той же сигнатуре  $\Omega$ . Гомоморфизмом из КМ ПрО  $M^i$  в КМ ПрО  $M^j$  будет такое отображение  $f$  из множества  $U_i$  на множество  $U_j$ , что для каждого отношения  $R^{(n)}$  из сигнатуры  $\Omega$  выполняется условие:

$$R^{(n)}(X_1, X_2, \dots, X_n) \Rightarrow R^{(n)}(f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_n))$$

для любых  $X_1, X_2, \dots, X_n \in U_i$ . Приведенное выше условие означает, что любая связь между элементами исходной КМ ПрО отображается в соответствующую связь в гомоморфной модели. При этом в гомоморфной КМ могут существовать элементы и связи, отсутствующие в исходной модели.

Разновидностью гомоморфизма является сильный гомоморфизм. Сильный гомоморфизм обладает свойством не увеличивать число связей, которые имеются в исходной модели [8]. Формально, гомоморфизм  $f$  является сильным, если дополнительно выполняется условие:

$$R^{(n)}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \Rightarrow \exists X_1 (f(X_1)=Y_1) \& \exists X_2 (f(X_2)=Y_2) \& \dots \& \exists X_n (f(X_n)=Y_n) \quad R^{(n)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

для любых  $X_1, X_2, \dots, X_n \in U_i$  и  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n \in U_j$ . Таким образом, в случае сильного гомоморфизма, любая связь в гомоморфной модели влечет за собой хотя бы одну связь в исходной модели.

Другим распространенным способом сопоставления моделей является корреспонденция. Рассмотрим отношение «корреспонденции» между концептуальными моделями  $M^i = \langle U_i, Sem_i \rangle$  и  $M^j = \langle U_j, Sem_j \rangle$  в одной и той же сигнатуре  $\Omega$ . Корреспонденцией из КМ ПрО  $M^i$  в КМ ПрО  $M^j$  будет такое отображение  $u$  из множества  $U_i$  на множество  $U_j$ , что для каждого отношения  $R^{(n)}$  из сигнатуры  $\Omega$  выполняется условие:

$$R^{(n)}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \Rightarrow \forall X_1 (u(X_1)=Y_1) \& \forall X_2 (u(X_2)=Y_2) \& \dots \& \forall X_n (u(X_n)=Y_n) \quad R^{(n)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

для любых  $X_1, X_2, \dots, X_n \in U_i$  и  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n \in U_j$ . Это условие означает, что любая связь между элементами КМ ПрО  $M^i$  влечет за собой соответствующую связь в КМ ПрО  $M^j$ . При отображении типа корреспонденции в исходной КМ ПрО могут быть утеряны некоторые связи.

Эпиморфизмом является такое отношение между концептуальными моделями, которое одновременно является гомоморфизмом и корреспонденцией. Эпиморфизмом из КМ ПрО  $M^i = \langle U_i, Sem_i \rangle$  в КМ ПрО  $M^j = \langle U_j, Sem_j \rangle$  в одной и той же сигнатуре  $\Omega$  будет такое сюръективное отображение  $g$  из множества  $U_i$  на множество  $U_j$ , что для каждого отношения  $R^{(n)}$  из сигнатуры  $\Omega$  выполняются два условия:

$$R^{(n)}(X_1, X_2, \dots, X_n) \Rightarrow R^{(n)}(f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_n)),$$

$$R^{(n)}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \Rightarrow \forall X_1 (u(X_1)=Y_1) \& \forall X_2 (u(X_2)=Y_2) \& \dots \& \forall X_n (u(X_n)=Y_n) R^{(n)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

для любых  $X_1, X_2, \dots, X_n \in U_i$  и  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n \in U_j$ . При отображении типа «эпиморфизм» эпиморфная КМ ПрО будет в определенном смысле проще исходной модели.

Таким образом, рассмотрены различные типы морфизмов между КМ ПрО: гомоморфизм, сильный гомоморфизм, изоморфизм, корреспонденция и эпиморфизм. Это позволяет математически определить взаимосвязанную совокупность КМ ПрО, используемых в БЗ ИСПР для решения различных функциональных задач пользователя.

### 5. Разработка категорной модели базы знаний о сложной предметной области.

Чтобы математически описать структуру морфизмов между различными КМ ПрО, определим категорию КМ ПрО. Сначала напомним математическое определение категории, принятое в теории категорий [9]. Каждая категория  $\square$  состоит из класса  $Ob \square$ , элементы которого называются объектами категории  $\square$ , и класса  $Mor \square$ , элементы которого называются морфизмами категории  $\square$ ; объекты и морфизмы категории связаны между собой следующими условиями:

Cat 1. Каждой упорядоченной паре объектов  $A, B$  категории  $\square$  сопоставлено некоторое множество  $H_{\square}(A, B)$  морфизмов категории  $\square$ ;

Cat 2. Каждый морфизм категории  $\square$  принадлежит одному и только одному из множеств  $H_{\square}(A, B)$ .

Cat 3. В классе  $Mor \square$  введена частичная бинарная операция умножения: произведение  $\zeta\eta$  морфизмов  $\zeta \in H_{\square}(A, B)$  и  $\eta \in H_{\square}(C, D)$  определено тогда и только тогда, когда объект  $B$  совпадает с объектом  $C$ , и в этом случае  $\zeta\eta \in H_{\square}(A, D)$ ; частичное умножение ассоциативно  $(\zeta\eta)\psi = \zeta(\eta\psi)$  для любых трех морфизмов  $\zeta \in H_{\square}(A, B)$ ,  $\eta \in H_{\square}(B, C)$ ,  $\psi \in H_{\square}(C, D)$ .

Cat 4. В каждом множестве  $H_{\square}(A, A)$ ,  $A \in Ob \square$ , содержится такой морфизм  $1_A$ , называемый тождественным или единичным морфизмом объекта  $A$ , что  $\zeta 1_A = \zeta$  и  $1_A \eta = \eta$  для любых морфизмов  $\zeta \in H_{\square}(X, A)$ ,  $\eta \in H_{\square}(A, Y)$ .

В качестве категории КМ ПрО  $\mathcal{C}$  рассмотрим класс КМ ПрО  $Ob \mathcal{C}$ , которые наделены структурой семантических отношений, и класс гомоморфизмов  $Mor \mathcal{C}$ , таких отображений, которые в определенном смысле сохраняют структуру КМ ПрО. При этом будем учитывать различные типы гомоморфизмов: обычный гомоморфизм, изоморфизм, сильный гомоморфизм и гомоморфизм, одновременно являющийся корреспонденцией. Классы  $Ob \mathcal{C}$  (концептуальных моделей) и  $Mor \mathcal{C}$  (морфизмов) действительно образуют категорию, поскольку выполняются следующие условия: 1) для каждого элемента  $M$  класса  $Ob \mathcal{C}$  тождественное отображение концептуальной модели  $M$  на себя сохраняет структуру данной модели; 2) суперпозиция любых двух отображений (гомоморфизмов) между КМ ПрО  $\zeta: A \rightarrow B$  и  $\eta: B \rightarrow C$ , сохраняющих структуру КМ ПрО, также сохраняет эту структуру, поскольку произведение гомоморфизмов является гомоморфизмом [9].

Теперь получим математическую модель базы знаний о сложной ПрО. Поскольку разработка БЗ ИСПР требует исследования системы знаний о сложной ПрО, то при построении математической модели базы знаний ИСПР будем учитывать такие существенные свойства систем знаний, как целостность, многоаспектность, иерархичность. Принцип многоаспектности означает существование различных способов декомпозиции ПрО на концептуальные классы объектов и семантических отношений между ними. При этом ка-

ждый отдельный способ декомпозиции (концептуальное представление) ПрО обуславливается выбранной точкой зрения на ПрО. Иными словами, возможным является целый класс представлений системы знаний о сложной ПрО.

Понимание системы знаний, как «целостности, определяемой некоторой организующей общностью этого целого» [7], требует целостного рассмотрения ее различных представлений, значит необходимо учитывать взаимосвязи между различными представлениями. Каждое отдельное представление системы знаний о сложной ПрО естественно соотносится с некоторой онтологией ПрО, для математического моделирования которой была предложена конструкция каркаса. Каждая онтология предполагает свое расширение до прикладной КМ ПрО, необходимой для решения функциональных задач пользователя. Таким образом, система знаний о ПрО предполагает существование класса онтологий ПрО, между концептуальными моделями которых заданы морфизмы.

Но в БЗ ИСПР может быть одновременно учтено только конечное множество представлений системы знаний о ПрО. Поэтому в качестве модели базы знаний о сложной ПрО ИСПР будем рассматривать множество онтологий ПрО, между прикладными концептуальными моделями которых заданы морфизмы. Следовательно, математической моделью базы знаний о ПрО будет являться малая категория КМ ПрО. Напомним, что категория называется малой, если ее объекты образуют множество [9]. Заметим, что это определение равносильно утверждению, что морфизмы категории образуют множество.

Таким образом, получена категорная модель базы знаний ИСПР, которая позволяет обеспечить многоаспектное концептуальное представление системы знаний о сложной ПрО; одновременно и согласованно учитывать онтологические и проблемные знания о ПрО; описывать структуру отношений между КМ ПрО, которые предназначены для решения различных функциональных задач пользователя.

### **Выводы.**

В статье предложено новое решение актуальной научной проблемы математического моделирования баз знаний ИСПР, что позволяет улучшить качество инструментальных средств поддержки баз знаний, повысить эффективность работы ИСПР. Получены следующие основные результаты.

1. Разработаны математические определения модели онтологии ПрО, онтологической модели и прикладной КМ ПрО и обеспечена формализация соотношения между онтологией, онтологической и прикладной КМ ПрО. Модель онтологии ПрО содержит концепты и семантические отношения между ними, характерные для ПрО, и формальные аксиомы, заданные на множестве концептов и отношений. Онтологическая модель ПрО определяет только часть семантики ПрО и предполагает возможность повторного использования в различных информационных системах. Расширение онтологической модели ПрО до прикладной КМ ПрО проводится под управлением аксиоматики, определенной в модели онтологии ПрО.

2. Определены возможные типы преобразований (морфизмов) между КМ ПрО, сохраняющие структуру этих моделей и позволяющие находить в них «сходные» части: изоморфизм, гомоморфизм, сильный гомоморфизм, корреспонденция, эпиморфизм. Разработана категория КМ ПрО, объектами которой являются КМ ПрО, а морфизмами – гомоморфизмы между КМ ПрО.

3. Разработана категорная модель БЗ ИСПР, которая предусматривает множество онтологий ПрО, между прикладными концептуальными моделями которых заданы морфизмы. Применение данной модели позволяет обеспечить многоаспектное концептуальное представление системы знаний о сложной ПрО, одновременно и согласованно учитывать онтологические и проблемные знания о ПрО, описывать структуру отношений между КМ ПрО, используемыми для решения функциональных задач ИСПР.

**Список литературы:** 1. *Полицук Ю.М., Хон В.Б.* Теория автоматизированных банков информации. М.: Высш. шк., 1989. 184 с. 2. *Цаленко М.Ш.* Моделирование семантики в базах данных. М.: Наука, 1989. 288 с. 3. *Гаверилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с. 4. *Левыкин В.М., Неофитная Т.М.* Синтаксис и семантика наследования в концептуальных моделях предметных областей // Сб. науч. трудов. Новые решения в современных технологиях. Харьков: НТУ «ХПИ». 2002. № 7. С. 6-11. 5. *Gruber T.R.* A translation approach to portable ontologies // Knowledge Acquisition. 1993. № 5(2). P. 199-220. 6. *Guarino N.* Formal ontology and Information Systems // Proceedings of International Conference on Formal Ontology in Information Systems // Ed. N. Guarino, Trento, Italy. June 6-8, 1998. Amsterdam: IOS Press. P. 3-15. 7. *Шрейдер Ю.А., Шаров А.А.* Системы и модели. М.: Радио и связь, 1982. 152 с. 8. *Математический энциклопедический словарь* / Гл. ред. Прохоров Ю.В. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 847 с. 9. *Цаленко М.Ш., Шульгейфер Е.Г.* Основы теории категорий. М.: Наука, 1974. 256 с.

*Поступила в редколлегию 14.09.03*

УДК 004.032.26:61

О.И. СОЛОВЬЕВА

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

### Введение.

Внедрение компьютерных технологий во все отрасли знаний привело к росту интереса врачей к использованию различных математических методов и средств принятия решения. Большой вклад при постановке диагноза, выборе оптимальной тактики лечения, идентификации каких-либо веществ и микроорганизмов оказывает использование различных экспертных систем (ЭС). Основой таких ЭС являются заложенные в них знания и методы принятия решений, которые позволяют выдавать надежные, точные, компетентные решения, приближающиеся к решениям врача. Наибольшую известность получили такие медицинские ЭС как MYCIN, PUFF, ABEL, ANNA, в которых знания представлены в виде логических правил, образующих причинно-следственную модель [1]. Процесс принятия решения в медицинской практике носит неоднозначный характер, тяжело поддается структурированию, формализации, выделению четких логических правил и методов. Медицинская диагностика зависит от большого количества неравнозначных факторов. Поэтому даже если удастся построить метод вывода, связывающий условия задачи с решением, часто он будет хорошо работать только на той группе объектов, на которой производились исследования. С одной стороны выбор оптимального метода принятия решения будет обусловлен особенностями медико-биологической информации, а с другой – характер и вид данной информации будет определять вид метода принятия решения. Существуют такие области в медицине, где диагноз ставится практически вручную, например, эндокринология.

### Основная часть.

Проанализируем достоинства и недостатки классических методов поддержки принятия решений, используемых в ЭС медицинской диагностики.

Так, методы слепого поиска в пространстве состояний предполагают полный просмотр всего пространства состояний, для задач медицинской диагностики такой просмотр невозможен из-за чрезвычайно большого пространства состояний. Возникает проблема т.н. комбинаторного взрыва, когда размер пространства состояний возрастает чрезвычайно быстро с ростом количества рассматриваемых альтернатив.

Эффективным средством борьбы с проблемой комбинаторного взрыва являются методы эвристического поиска, которые позволяют сократить количество просматриваемых вариантов при помощи введения эвристик (т.н. правил с потолка, основанных на эмпирическом опыте, догадках и интуиции эксперта). Эвристические методы удобны и просты в обращении, но не имеют строгого научного доказательства.

Вероятностные методы (метод Байеса, метод последовательного статистического анализа) предполагают представление исходной информации в вероятностной форме взаимосвязи симптомов и диагнозов. При этом возникает проблема определения вероятности любой комбинации симптомов, что затруднено ввиду сложной их взаимосвязи и невозможности проведения вычислительного эксперимента по определению той или иной вероятности.

Достоинство вероятностных методов заключается в том, что они дают возможность объективизировать имеющуюся информацию о диагнозах, но наряду с этим возникает проблема сбора, накопления, хранения, обработки данной диагностической информации.

Также возникает проблема пересчета всех вероятностей при внесении дополнительной информации.

Метод коэффициентов уверенности впервые был применен в ЭС MYCIN. Разработчики ввели шкалу коэффициентов уверенности, принимающих значение в диапазоне от  $-1$  до  $+1$ .

Коэффициент уверенности некоторого факта определялся как разность двух оценок: оценки, отражающей степень истинности данного факта, принимающей значение в диапазоне от  $0$  до  $+1$ , и оценки ложности данного факта, принимающей значение в диапазоне от  $0$  до  $-1$ . Значение коэффициента уверенности  $+1$  означало абсолютную истинность утверждения, а  $-1$  – ложность. Коэффициенты уверенности приписывались как фактам, так и правилам. К недостаткам данного метода относится сложность подбора коэффициентов уверенности, а также отсутствие теоретической базы.

Теория нечетких или расплывчатых множеств используется при формализации нечетких знаний врачей-экспертов, которые характеризуются лингвистической неопределенностью, т.к. многие данные о пациентах относятся к качественным признакам. Использование нечеткой логики при построении логических заключений обеспечивает общение с пользователем на профессионально-ориентированном языке, хранение, накопление и обработку качественной информации. Недостатком является использование количественных мер неопределенности, что по оценкам многих исследователей несвойственно человеку [4].

Рассмотренные методы принятия решения не позволяют интеллектуализировать процесс принятия решения, так как принятие окончательного решения остается за экспертом. Данные методы направлены на попытку моделирования высокоуровневого мышления человека. Поэтому, необходимо ориентироваться на методы интеллектуального анализа данных, необходимых эксперту в процессе принятия решения. Данные способы основаны на методах машинного обучения, которые лежат в основе современных технологий интеллектуальной обработки данных.

Существует несколько подходов к построению ЭС: логический, структурный, эволюционный, имитационный. На практике очень четкой границы между ними нет.

Основным источником знаний для ЭС логического типа будет являться формализованный опыт врача, выраженный в виде логических утверждений – правил и фактов, безусловно принимаемых системой, которая в отличие от врача не формирует своего индивидуального опыта. При попытке выделения ключевых понятий предметной области (ПО) и взаимосвязей между ними часто возникает настолько сложная система логических правил, которую тяжело осмыслить, не говоря уже о переносе в базу знаний экспертной системы. Еще более сложная проблема заключается в том, что может возникнуть ситуация, характерная для медицинской диагностики, когда процесс принятия решения нельзя выразить логическими правилами.

Структурный подход основан на моделировании структуры человеческого мозга. Основной моделируемой структурной единицей в таких системах является нейрон, а модели получили название нейронных сетей (НС).

Особенностью медицинских знаний является то, что они в основном принадлежат к мягким глубинным знаниям, а следовательно тяжело формализуются. Под глубинными знаниями понимают абстракции, образы, аналогии, отражающие понимание структуры ПО, они являются результатом обобщения первичных понятий ПО в абстрактные структуры, которые часто не имеют вербального описания, позволяющие опытным врачам принимать более квалифицированные решения. Под мягкими знаниями понимаются знания, допускающие множественные размытые рекомендации.

Проведенный анализ ЭС логического типа и нейросетевых ЭС позволил провести сравнительную характеристику, которая представлена в таблице.

Таблица

Параметры сравнения	ЭС	НС
Работа с мягкими знаниями	–	+
Работа с глубинными знаниями	–	+
Принятие компетентного решения на границах области применения	–	+
Расширение базы знаний без перестройки всей системы в целом	–	+
Использование неполных, противоречивых данных	–	+
Объяснительные способности	+	–

Как видно из таблицы, применение искусственных нейронных сетей, по сравнению с ЭС логического типа, обладает рядом преимуществ. Источником знаний будет являться не только опыт эксперта, отбирающего примеры для обучения, но и индивидуальный опыт обучающейся на этих примерах сети [3]. В данном случае время будет тратиться в основном на определение ключевых понятий предметной области, врачу не надо будет специально объяснять логику принятия решения, а только выделить, в общем случае несколько, наборов ключевых понятий предметной области, которые бы характеризовали определенные состояния системы.

Обобщенная структурно-логическая схема принятия решения, применяя искусственные нейронные сети представлена на рис. 1, где ИЗ – инженер по знаниям, ШФ – этап шкалирования и формализации, НС – нейронная сеть, СОИ – система отображения информации, БД НС – база данных нейронной сети.

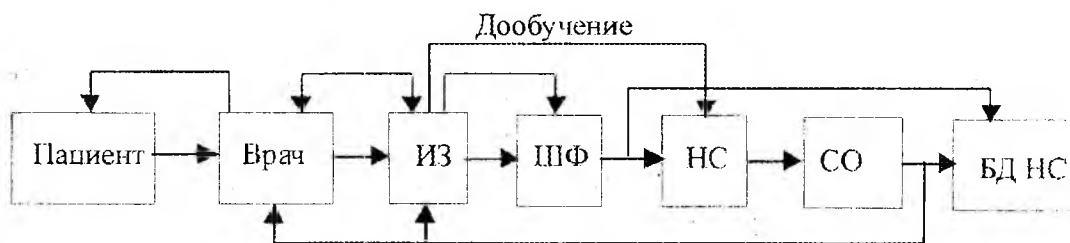


Рис. 1

В данном случае функции базы знаний (как набора заложенных механизмов вывода) и решателя (в смысле применения заложенных правил вывода к каждому конкретному случаю) выполняет обученная искусственная нейронная сеть, но при этом система будет неспособна объяснить полученное ею решение, т.к. решения, выдаваемые нейронной сетью логически непрозрачны. Приобретение новых знаний будет осуществляться при помощи дообучения сети.

Проанализируем объем знаний, используемый при принятии решения. Базой знаний традиционных экспертных систем являются формализованные знания эксперта, которые можно записать в следующем символическом виде:

$$\langle Z, O \rangle, \tag{1}$$

где  $Z$  – знания врача;  
 $O$  – опыт эксперта в предметной области;

$$Z = Z_{no} \cap Z_{zc}, \tag{2}$$

где  $Z_{no}$  – знания о предметной области;  
 $Z_{zc}$  – т.н. знания о здравом смысле, которые при разработке ЭС не рассматриваются ввиду трудности их формализации и переноса в БЗ ЭС.

$$O = Z_{cm} \cap I, \quad (3)$$

где  $Z_{cm}$  – знания о статистике, т.е. ранее встречавшиеся случаи тех или иных заболеваний;  $I$  – интуиция врача.

Перенос в БЗ такой составляющей знаний как  $Z_{cm}$  и в некотором роде  $I$ , которая основывается на неформализуемых, скрытых, глубинных знаниях врача можно осуществить при помощи нейронных сетей. Использование нейронных сетей позволяет обучить систему на примерах из предметной области. Повышение качества диагностики может достигаться за счет накопления опыта и интуиции, которая является синтезом накопленных практических знаний.

БЗ традиционных ЭС включает в основном  $Z_{no}$  в виде:

$$\langle D_{no}, C_{no}, R_{no} \rangle, \quad (4)$$

где  $D_{no}$  – множество диагнозов;

$C_{no}$  – множество симптомокомплексов;

$R_{no}$  – множество решающих правил, причем  $R_{no}: C_{no} \square D_{no}$ .

Статистические знания  $Z_{cm}$  можно записать в виде

$$\langle D_{cm}, C_{cm}, R_{cmn} \rangle, \quad (5)$$

Причем  $D_{cm} \supseteq D_{no}$ ,  $C_{cm} \supseteq C_{no}$ , но  $D_{cm}$ ,  $C_{cm}$  не включается в прямом виде в БЗ традиционной ЭС, т.к.  $R_{cmn}$  – неявные правила, которые не присутствуют в статистике, их надо выявить.

НС позволяют включить в рассмотрение  $Z_{cm}$ ,  $I$ , следовательно происходит расширение объема знаний, который используется при принятии решения, что повышает качество диагностики [4]. Увеличение объема знаний будет происходить также за счет появления новых знаний, которые не присутствовали в обучающей выборке, т.е. происходит формирование индивидуального опыта сети. Данная особенность объясняется способностью нейронных сетей к выявлению скрытых закономерностей, глубинных связей между обучающими данными. НС способны принять компетентное решение на границах области применения, а также при неполных, зашумленных, противоречивых входных данных.

Нейронные сети имеют существенное преимущество: они способны дообучаться в том случае, когда не удалось сразу собрать достаточное количество обучающих примеров либо появились новые знания, путем добавления необходимого количества примеров в обучающую выборку. Для правильного обучения сети необходимо предъявлять повышенные требования к обучающим примерам. Они должны быть представительны с точки зрения существа задачи, т.е. каждое состояние системы должно быть представлено набором наиболее характерных «симптомокомплексов» ключевых понятий предметной области. Основные трудности будут заключаться в выборе наилучшей архитектуры сети, ее типа и обучении.

В традиционных экспертных системах процесс дообучения осуществляется в виде добавления новых правил и фактов в базу знаний и часто ведет к перестройке всей системы в целом, не давая гарантии улучшения качества работы. Например, чтобы улучшить качество работы экспертной системы PUFF (диагностика заболеваний легких по результатам функциональных тестов легких) на 10 % потребовалось увеличить количество используемых правил со 100 до 400 [4].

На сегодняшний день остро стоит проблема диагностики патологий щитовидной железы. Заболевания щитовидной железы занимают по численности второе место после сахарного диабета среди всех эндокринных патологий [6]. По оценке ВОЗ и ЮНИСЕФ, более 1,5 млрд. (30%) жителей Земли имеют риск развития йоддефицитных заболеваний. Поскольку, гормоны ЩЖ оказывают существенное влияние практически на все органы и

системы организма, проблема диагностики патологий ЩЖ является актуальной задачей. Нами была реализована вероятностная НС для задачи диагностики аутоиммунного тиреоидита (АИТ) и нормы. В качестве вектора входных переменных были использованы результаты лабораторных исследований уровня антител к тиреоидной пероксидазе и к микросомальной фракции и наличие характерных ультразвуковых изменений структуры ЩЖ: диффузная гетерогенность и сниженная эхогенность. Тестовое множество состояло из 60 примеров, из которых диагноз АИТ был поставлен в 22 случаях. НС правильно классифицировала 21 пример.

*Выводы.* Возможности и достоинства нейронных сетей позволяют значительно сократить и упростить процесс построения экспертной системы, а также дают возможность моделировать ситуацию принятия решения [5], когда, варьируя наборы входных данных для сети, можно добиться необходимого отклика.

Освоить и применять технологию построения и обучения искусственных нейронных сетей значительно проще, чем изучать математическую статистику или нечеткую логику. Для создания нейросетевой медицинской экспертной системы требуются не годы, а месяцы при адекватном представлении обучающей выборки.

**Список литературы:** 1. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с. 2. *Воробьев С.А., Марьин С.А., Пономаренко О.С.* Теория принятия решений. Классические подходы. Харьков: ХТУРЭ, 2000. 196 с. 3. *Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И.* Основы теории нейронных сетей. Учебное пособие. Белгород: БИИММАП, 2001. 159 с. 4. Искусственный интеллект: Учеб. пособие для вузов/ *В.Н. Бондарев, Ф.Г. Аде.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. 615 с. 5. *Руденко О.Г., Бодянский Е.В.* Основы теории искусственных нейронных сетей. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2002. 317 с. 6. *Эшштейн Е.В., Божок Ю.М.* Диагностика заболеваний щитовидной железы. Лабораторная диагностика, № – 3, 1999. С. 63 – 66.

*Поступила в редколлегию 9.06.2003.*

УДК 621.383

Ж.М. СУПРУН

## **Si-ФОТОСТРУКТУРЫ КАК МОБИЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ИСТОЧНИК ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ**

### **Актуальность исследования.**

Общепризнанно [1] - [5], что основным фактором развития цивилизации является использование источников энергии. В основном мы используем традиционные энергоресурсы, такие как - нефть, уголь, природный газ. Однако, в последнее время [6] большое внимание уделяется так называемым возобновляемым источникам энергии, таким как энергия ветра, солнца, прилива и т.д. Всплеск интереса к фотоэнергетике во всем мире в последние годы и активная государственная поддержка ее развития во многих странах дают основание считать, что солнечная энергетика - реальный конкурент традиционным источникам электроэнергии в самом недалеком будущем. С одной стороны, научно-технический прогресс обусловил снижение стоимости оборудования фотоэлектрических систем до уровня их экономической жизнеспособности. С другой, активные действия мировой общественности в защиту окружающей среды делают солнечную энергетiku, обладающую целым набором "дружелюбных" по отношению к потребителю и окружающей среде качеств, весьма привлекательным источником электроэнергии. Приведенные выше соображения являются достаточно веским аргументом: проблему преобразования солнечной энергии необходимо решать сегодня, чтобы использовать эту энергию завтра.

Главным направлением работ в области преобразования солнечной энергии в настоящее время является фотоэлектрическое преобразование(ФЭП) солнечной энергии. Если в использовании солнечной энергии в промышленных масштабах еще много проблем, то в повседневный быт многих миллионов людей гелиосистемы вошли прочно и навсегда. Использование солнечных батарей в качестве источника электропитания малоэнергоёмких приборов: калькуляторов, часов – наиболее распространенное направление фотоэнергетики. Фотоэлектрические станции (ФЭС) могут быть осуществить заряд аккумуляторных батарей, что обеспечивает стабильное энергосбережение потребителей в любое время суток и вне зависимости от погодного изменения интенсивности солнечного излучения. Создание мобильных солнечных переносных батарей определило создание мобильных солнечных станций. Все переносные приборы, устройства и установки, питание которых осуществляются от аккумуляторов различного типа и различной емкости, приобретают новые потребительские качества – вместо использования стационарных зарядных устройств или комплектов сменных аккумуляторов появляется возможность использования мобильных зарядных устройств в так называемых полевых условиях. Сегодня затруднительно даже обозначить все сферы использования мобильных ФЭС – они могут использоваться как зарядное устройство портативных переносных компьютеров типа "ноутбук", переносной радио- и телевизионной аппаратуры, переносных системах освещения и даже подзарядки аккумуляторов транспортных средств.

Применяя солнечные элементы (СЭ) на космических аппаратах предъявляются ряд требований, связанных с общим весом и объемом системы, точностью позиционирования батареи относительно положения Солнца, временем жизни и скоростью деградации батарей. Актуальным также является решение проблемы достижения высокой эффективности и низкой стоимости СЭ. Снижение стоимости исходного кремния, разработка высокопроизводительных методов изготовления пластин из слитков и прогрессивных технологий изготовления солнечных элементов позволили в несколько раз снизить стоимость наземных солнечных батарей на их основе. Основными направлениями работ по дальнейшему снижению стоимости "солнечной" электроэнергии являются: получение элементов на ос-

нове дешевого, в том числе ленточного, поликристаллического кремния; разработка дешевых тонкопленочных элементов на основе аморфного кремния и других полупроводниковых материалов; осуществление преобразования концентрированного солнечного излучения с помощью высокоэффективных элементов на основе кремния и относительно нового полупроводникового материала алюминий-галлий-мышьяк. Эти требования инициировали разработки многопереходных батарей на основе InGaP/GaAs (КПД 22%), InGaP/GaAs/Ge (КПД 24%), InGaAlP/GaAs/InGaAsN/Ge с теоретической эффективностью преобразования до 42% [1]. Очевидно, что рост эффективности преобразования ведет к снижению габаритов солнечных батарей, а следовательно, и общего веса космического аппарата (рис. 1). В результате стоимость космических аппаратов снижается (табл. 1).

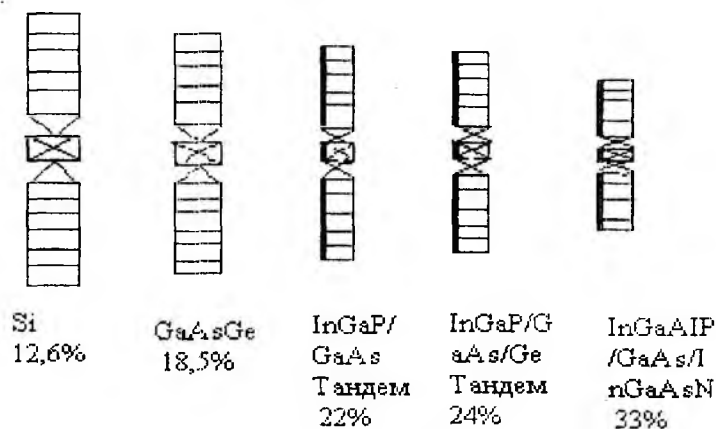


Рис. 1 Панелей солнечных батарей для космических аппаратов и их КПД

Таблица 1

Параметры	GaInP/GaAs/Ge	GaAs/Ge	Si
Удельная мощность, Вт/кг	22	19	14
Требуемая мощность, Вт	10000	10000	10000
Расчетная масса солнечной батареи, кг	455	526	714
Экономия средств запуска по сравнению с батареями на кристаллическом Si, долл.	5126128	3720896	0

Из сказанного выше следует вывод о перспективности фотоэлектрической солнечной энергетики. Растущий интерес к изделиям фотовольтаики для космонавтики, телекоммуникаций и портативных источников питания является ключевым фактором развития отрасли в целом. Основные усилия исследователей сосредоточены на повышении стабилизированной эффективности фотоэлектрического преобразования, снижении стоимости материалов и производства, повышении надежности приборов, внедрении новых тонкопленочных технологий вместе с развитием моно- и поликристаллических технологий, пока доминирующих на рынке. Продолжаются разработки по стандартизации качества и производительности изделий фотовольтаики, включая стандарты ISO9001 и ISO14001.

**Цель исследования.**

Работа посвящена проектированию и анализу основных достижимых параметров СЭ на основе Si-фотопреобразовательных структур: выходной мощности  $P_{max}$ , фототока  $I_f$ , и эксплуатационных параметров: напряжения холостого хода  $U_{х.х.}$ , ток короткого замыкания  $I_{к.з.}$ , КПД для максимальной мощности  $\eta$ , коэффициент заполнения вольтамперной харак-

теристики (ВАХ) FF на основе моделирования с применением современного компьютерного пакета Mathematica.

**Новизна исследования.** Новизна работы заключается в исследовании и оценке Si-фотоструктур с помощью моделирования их диодных параметров с целью достижения наибольшего КПД. Рассмотрен процесс работы СЭ учитывая их температурный режим.

**Практические результаты.** Качество Si-фотопреобразователей характеризуется удельной выходной мощностью фотогальванического преобразования и КПД определяется в соответствии [2]-[4].

Коэффициент преобразования солнечных элементов определяется:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{И}}} = \frac{I_{\max} \cdot U_{\max}}{P_{\text{И}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  - максимальная выходная мощность снимаемая с  $1\text{ м}^2$  согласно [5] равна:

$$P_{\text{м}} = I_{\max} \cdot U_{\max} = \text{FF} \cdot I_{\text{ф}} \cdot U_{\text{ХХ}}, \quad (2)$$

где  $I_{\max}, U_{\max}$  - значения тока и напряжения, при которых реализуется максимальная выходная мощность  $P_{\max}$ ;

$P_{\text{И}}$  - мощность падающего излучения;

$I_{\text{ф}}$  - фототок;

FF - коэффициент заполнения ВАХ;

$U_{\text{ХХ}}$  - напряжение холостого хода, которое имеет вид:

$$U_{\text{ХХ}} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{Н}}} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{Н}}}\right) \quad (3)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  - температура;

$q$  - заряд электрона,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$I_{\text{Н}}$  - ток насыщения.

Следовательно, при заданном токе  $I_{\text{ф}}$  напряжение холостого хода логарифмически во возрастает при уменьшении тока насыщения  $I_{\text{Н}}$ .

Коэффициент заполнения ВАХ FF показывает степень приближения ВАХ к прямоугольной и определяется из выражения:

$$\text{FF} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{I_{\text{ф}} U_{\text{ХХ}}} \quad (4)$$

Для преобразователей энергии светового потока в электрическую высокий КПД зависит от крутизны прямой ветви ВАХ которая описывается выражением:

$$I = I_{\text{Н}} \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{\text{ф}} \quad (5)$$

Моделирование проводилось с учетом реальных условий работы при  $25^{\circ}\text{C}$  в условиях энергетической светимости фронтальной поверхности  $P_{\text{И}} = 1360 \text{ Вт/м}^2$  (что соответствует одной солнечной постоянной в режиме облучения АМ0). Проводимое исследование нагрузочных световых ВАХ Si-фотоэлектрических преобразователей, выполнялось для режима импульсного облучения с помощью измерительной установки, с учетом материалов, предложенных в работе [5].

Результаты моделирования световых ВАХ СЭ представлены на рис.2.

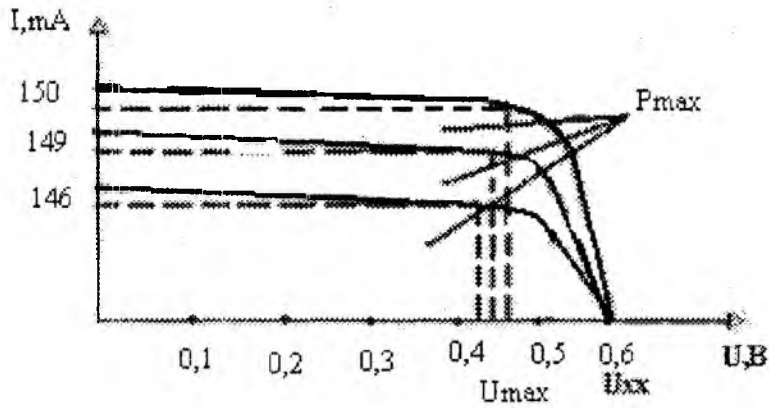


Рис.2. Световая ВАХ солнечного элемента.

Из представленных данных можно видеть, что исследуемые ФЭП на основе кристаллов кремния с площадью фронтальной поверхности  $3,6\text{ м}^2$  в условиях АМ0 характеризуются напряжением холостого хода  $U_{xx}=0,602-0,611\text{ В}$ , удельной выходной электрической мощностью  $P_{max}=178-183\text{ Вт/м}^2$ , током насыщения  $I_H=143-149\text{ мА}$ , фототоком  $I_\phi=150\text{ мА}$  и эффективностью преобразования  $\eta=13\%$ .

Вводя в модель элементы нагрузки, можно построить график зависимости выходной мощности от напряжения, изображенный на рис.3.

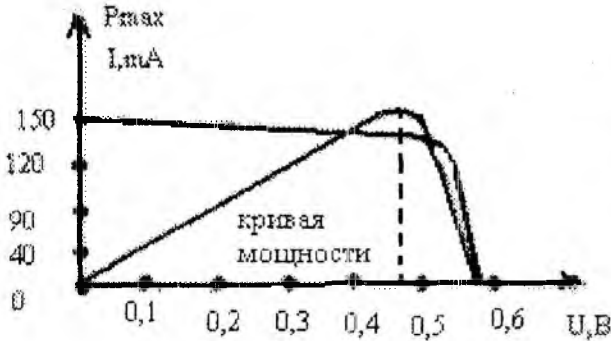


Рис.3 Зависимость величины мощности от величины напряжения

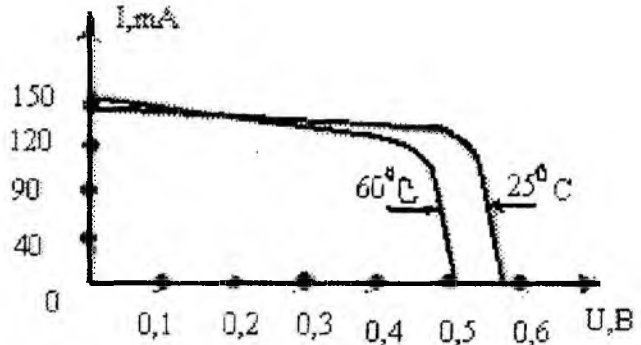


Рис.4 Семейство кривых ВАХ для различных температур

Пиковая мощность соответствует напряжению около  $0,47\text{ В}$ . Таким образом, чтобы правильно оценить качество солнечного элемента, а также ради сравнения элементов между собой в одинаковых условиях, необходимо нагрузить его так, чтобы выходное напряжение равнялось  $0,47\text{ В}$ .

Важным моментом работы солнечных элементов является их температурный режим. При нагреве элемента на один градус свыше  $25^\circ\text{С}$  он теряет в напряжении  $0,002\text{ В}$ , т.е.  $0,4\%/градус$ . На рис.4 приведено семейство кривых ВАХ для температур  $25^\circ\text{С}$  и  $60^\circ\text{С}$ .

В яркий солнечный день элементы нагреваются до  $60-70^\circ\text{С}$  теряя  $0,07-0,09\text{ В}$  каждый. Это и является основной причиной снижения КПД солнечных элементов, приводя к падению напряжения, генерируемого элементом.

**Выводы.** Как было показано выше, моделирование и обработка ВАХ – наиболее информативные методы для определения достижимых электрических параметров кремниевых ФЭП. Были исследованы и проанализированы диодные параметры Si- фотопреобразовательных структур, достигнут КПД=13%. При измерениях и оценке СЭ необходимо

учитывать их температурный режим, т.к. он оказывает влияние на коэффициент преобразования энергии. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений параметров ФЭП подтверждает справедливость предложенных математических моделей.

**Список литературы:** 1. *Kroll W.J., Thompson A.G., Armour E., Stal R.A., Brennan T., Hou H.* MOCVD Technology for Advanced Space Solar Cell Production. Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. 2. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М. Изд-во "Советское радио", 1971, 248с. 3. *Фаренбух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы: Теория и эксперимент. /Пер. с англ. Под ред. ММ. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280с., ил. 4. *Колтун М.М.* Солнечные элементы. М.: Наука, 1987. 192с., ил. 5. *Антонова В.А., Листратенко А.М., Слипченко Н.И.* Высокоэффективные солнечные элементы на основе жидкорастворной технологии //Радиотехника. 2000. Вып. 115. С.90-94.

*Поступила в редколлегию 10.09.03*

УДК 681.518:004.912

А.Л. ЕРОХИН, ВАЛ.Н. БУРЦЕВ, ВЛ.Н. БУРЦЕВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГНИТИВНОЙ ФУНКЦИИ ВНИМАНИЯ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

### Введение.

Психические процессы человека - это сложноорганизованные процессы, динамически изменяющие свои состояния под воздействием экзогенных и эндогенных факторов [1, 2], изменение которых носит случайный характер. Устойчивость психического состояния лица, принимающего решение (ЛПР) достигается только целенаправленным усилием, когда информация на этапах кратковременного и долговременного запоминания должна находиться в поле внимания [3, 4]. Для практической психологии процесс восстановления психических состояний для лица, принимающего решение (ЛПР) является чрезвычайно важным [5]. Сложность описания процессов смены и развития психических состояний представляет большую сложность в силу того, "что субстанция ощущений, которая делает его субъективным переживанием, не может быть описана в научных терминах" [6].

### 1. Постановка задачи.

Наиболее важными психологическими функциями ЛПР в процессе его оперативного дежурства являются когнитивные функции внимания, на которые сильное влияние оказывает стресс монотонии. Механизм развития стресса монотонии определяется феноменом фильтрации центральной нервной системы длительно повторяющихся стимулов разных модальностей [7].

В интеллектуальных системах технического зрения отсутствуют те психофизиологические особенности, которые характерны для человека-оператора, - в них не проявляется стресс монотонии. Это приводит к тому, что такая важная особенность человеческой психофизиологии, как указанный стресс монотонии, никаким образом не учитывается при разработках систем технического зрения. Полярной стрессу монотонии из всех функций ЛПР можно считать функцию внимания.

Для систем технического зрения важной становится рассмотрение и моделирование функции внимания. В первую очередь это связано с уменьшением избыточности визуальной информации, которая подлежит анализу последовательными механизмами обработки. Во вторых, реализация формализованной модели когнитивной функции внимания необходима системе технического зрения для прогноза нестандартных или аварийных ситуаций, локализованных в актуальном зрительном поле (АЗП) системы.

### 2. Актуальное зрительное поле .

В качестве формальной модели интеллектуальной системы технического зрения используем систему зрительного процесса, предложенную в [4]. У человека АЗП формируется и поддерживается психофизиологическими механизмами его зрительной системы [4]. На поверхности сетчатки глаза выделяются два непересекающихся дискретных подмножества, принадлежащие к классу  $T_2$  [8] топологического пространства. Эти подмножества топологически эквивалентны друг другу и отличаются метрикой фоторецепторов в зоне фавеа и в периферийной части сетчатки [9]. В виду дискретности нейронов мозга [10] его проекционные зоны возбуждения (торможения) также могут быть отнесены к классу  $T_2$  и они эквивалентны соответствующим возбужденным фоторецепторам сетчатки глаза. Главное отличие проекционных зон мозга заключается в механизмах обработки визуальной информации. Так, вся информация АЗП, спроецированная в зону фавеа, обрабатывается последовательно и медленно, остальная информация, спроецированная с периферии

АЗП – параллельно и мгновенно. В зону фавеа визуальная информация попадает при целенаправленном взгляде, если таковая со стороны ЛПП заслуживает внимания.

Таким образом, когнитивная функция внимания в интеллектуальной системе технического зрения может рассматриваться как одна из побудительных причин изменения направления визуального наблюдения на нестандартный объект для последующего анализа новой информации.

В рассматриваемой модели [4], кроме подсистем сенсорного (перцепторного) анализа, гештальт-синтеза и гештальт-анализа, включена подсистема, моделирующая функцию внимания. Основная задача этой подсистемы – это оценивание весовых характеристик важности визуальной информации. Например, такой весовой характеристикой может являться оценка фактора неожиданности, который содержится в самой информации.

### 3. Фактор неожиданности и его формализация.

Для оценивания фактора неожиданности введем три начальных условия [8]:

- фактор неожиданности определенным образом может быть выделен из двумерной копии предметной области;
- копия предметной области (образ), спроецированная на входы видеосенсоров, представима в виде дискретного множества из класса  $T_2$ , обладает счетной мощностью и топологическими инвариантами регулярности;
- дискретное множество копии предметной области может быть представлено в виде двух непересекающихся, топологически эквивалентных дискретных подмножеств, отличающихся метриками и мощностью носителей топологии.

Дискретность копии (образа) предметной области в системе технического зрения адекватна дискретной копии (образу) в зрительной системе человека. Для достижения такой адекватности в [8] было предложено использовать волоконно-оптический системный канал (ВОСК), моделирующий вход видеосистемы. ВОСК состоит из счетного множества элементарных световодов (ЭС) с разными диаметрами поперечных сечений. При этом входные поперечные сечения ЭС минимального диаметра располагаются в центре поля зрения и моделируют зону фавеа, все ЭС с большим диаметром – периферийную зону.

Все ЭС, расположенные в центральной зоне входа своими выходными поперечными сечениями оптически согласованы с видеоприемником, электрически связанные с процессором последовательной обработки видеосигналов. Все ЭС периферийной зоны ВОСК, в свою очередь, оптически согласованы, по крайней мере, с одним видеоприемником, электрически связанный с процессором параллельной обработки видеосигналов.

Рассмотрим дискретную структуру копии предметного мира на входе ВОСК. Для каждой точки  $(x, y)$  непрерывного (регулярного) изображения, заданного в двумерном континуальном пространстве, после ее проективного линейного преобразования, ставится в соответствие точечный элемент. Обозначим визуальную информацию и содержащейся в ней фактора неожиданности в виде многомерного вектора

$$F_{ij} = \bigcup_{i,j+1}^{m,n} f(\sum I_R, \sum I_G, \sum I_B, a_{ij}), \quad (1)$$

где  $\sum I_R, \sum I_G, \sum I_B$  - усредненные значения интенсивности трех основных цветов, спроецированных на вход  $(a_{ij})$  ВОСК с координатами  $(i, j)$ , заданных в локальной системе координат пространства  $T_2$ .

Для оценивания фактора неожиданности введем три начальных условия [8]:

$$F_{ij} = \bigcup_{i,j+1}^{m,n} f(\sum I_R, \sum I_G, \sum I_B, a_{ij}), \quad (2)$$

где -  $\sum I_R, \sum I_G, \sum I_B$  - усредненные значения интенсивности трех основных цветов, спроецированных на вход  $(a_{ij})$  ВОСК с координатами  $(i,j)$ , заданных в локальной системе координат пространства  $T_2$ .

Не теряя общности, можно рассмотреть монохроматическое изображение, тогда выражение (1) упростится

$$F^*_{ij} = \bigcup_{i,j+1}^{m,n} f^* \left( \sum I_a \cdot a_{ij} \right). \quad (3)$$

В качестве критерия наличия в АЗП фактора неожиданности в выражении (3) можно принять изменение интенсивности  $\sum I$  и скорости перемещения  $\Delta(a_{ij} - a_{kl}) / \Delta t$  некоторой визуальной составляющей АЗП проанализируем три множества с переменными аргументами

$$\begin{aligned} F^* &= \bigcup f^* \left( \sum I_a \neq I_c, a_{ij} = c, V = 0 \right) \\ F^* &= \bigcup f^* \left( \sum I = c, \Delta a / \Delta t = V \neq 0 \right) \\ F^* &= \bigcup f^* \left( \sum I_a \neq I_c, \Delta a / \Delta t = V \neq 0 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Предположим, что часть визуальной информации, содержащая фактор неожиданности, находится на периферии поля зрения блока визуализации системы технического зрения. Задачей системы технического зрения является распознавание по некоторым критериям фактора неожиданности, перемещение этой части АЗП с изображением в центр поля зрения и передача этой информации в процессор последовательной обработки для анализа и принятия адекватного решения.

#### 4. Проверка адекватности модели фактора неожиданности.

Для распознавания фактора неожиданности рассмотрим изменение интенсивности  $\sum I_R, \sum I_G, \sum I_B$  и скорости  $V$  перемещения анализируемого объекта АЗП на входной поверхности ВОСК. Например, в качестве критерия распознавания ФН по скорости изменения интенсивности возьмем ограничение ее “красной” составляющей в объекте изображения некоторым значением  $\sum I_R / \Delta t \leq c_1$ , а по скорости перемещения объекта изображения на входной поверхности значениями

$$V = \pi d_a / \Delta t \leq c_2; \quad S = V \Delta t \approx k \pi d_a \leq c_3. \quad (5)$$

При превышении этих значений система технического зрения будет квалифицировать эти объекты АЗП как нестандартные и требующие анализа.

Для оптических систем технического зрения, в отличие от бинокулярной системы зрения человека, остается высокой вероятностью того, что визуальная информация, содержащая фактор неожиданности, может не попасть в поле зрения.

Для решения вопроса оперативного распознавания фактора неожиданности введем в систему технического зрения волоконно-оптические “детекторы внимания”. Отличительной особенностью таких детекторов является наличие комбинаторной нерегулярности, посредством которой осуществляется преобразование двумерных изображений [11,12] в детерминированные хаотические процессы. Идея использования комбинаторной нерегулярности в детекторах внимания заключается в том, что малые линейные перемещения визуального объекта на входе ВОСК преобразовываются в хаотический процесс, который может быть обнаружен более простыми методами.

### 5. Практическая реализация моделей.

В качестве детектора внимания может быть предложен волоконно-оптический системный канал, представленный на рис. 1 и 2.

Предлагаемый ВОСК содержит волоконно-оптический жгут 1 с регулярной укладкой элементарных световодов, входные поперечные сечения которых расположены в центре его входной поверхности. Вокруг жгута 1 сформированы четыре входные поверхности, образующие четыре квадранта ориентации волоконно-оптических детекторов внимания 2-5 в пространстве визуализации.

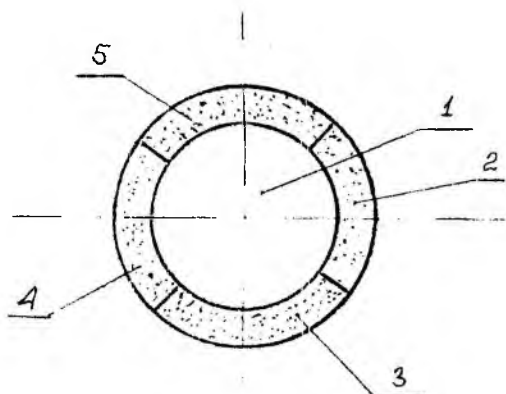


Рис. 1. Модель волоконно-оптического системного канала

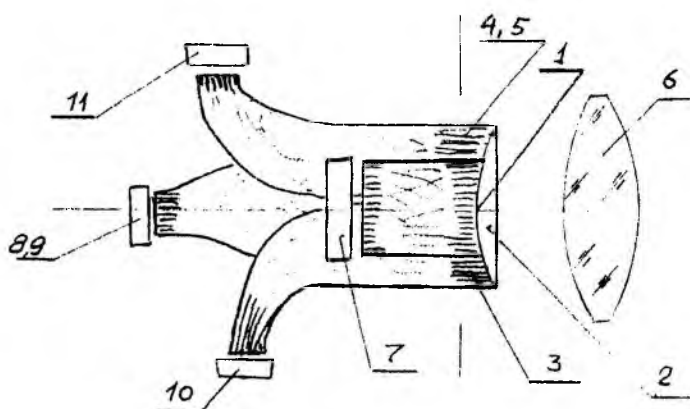


Рис. 2. Разрез модели волоконно-оптического системного канала

Входные поверхности 1-5 оптически согласованы с линзовой системой 6 и благодаря криволинейности ее формы компенсируются часть полевых aberrаций линзы. Выходные поверхности световодов 1-5, в свою очередь, оптически согласованы с соответствующими фотоприемниками 8-12. Входным поверхностям поперечных сечений ЭС жгута 1 и детекторов внимания 2-5 придана криволинейная форма с радиусом  $R$ .

В работе [10] было показано, что матрица квантора существования компактного и упорядоченного дискретного множества входа ВОСК размерностью  $(m \times n)$  будет иметь вид

$$\exists f_{ij} P(f_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

После комбинаторного преобразования  $K_2$  со значениями  $0 \ll K_2 \ll 1$  на выходе ВОСК квантор существования будет уже состоять из случайно распределенных единичных и нулевых значений предикатов, например,

$$\exists b_{ij} P(b_{ij}) \vee b_{kl} P(b_{kl}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При этом для всех единичных значений в матрице (7) фрагменты изображений сохраняют свою локальную регулярность на подмножестве выхода. Для нулевых значений матрицы (7) регулярность преобразованного изображения на выходе нарушается. Рас-

смотрим, к примеру, перемещение какой-либо точки  $(x, y)$ , спроецированной на вход ВОСК. В локальной системе координат расстояние, которое проходит указанная точка на входе за некоторое время  $\Delta t$ , равно  $l = id$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

Благодаря комбинаторным преобразованиям на выходе ВОСК прообраз указанной точки может случайным образом, скачком, переместиться на расстояние  $id \leq l^* \leq nd$ . Таким образом, при небольших перемещениях объекта на входе детектора внимания, на его выходе формируется фрагмент детерминированного хаотического процесса, который может рассматриваться системой технического зрения как визуальное вероятностное событие, которое может квалифицироваться как фактор настороженности.

#### **Выводы.**

1. Построена модель функции внимания в системе технического зрения, основанная на оценке фактора неожиданности.
2. Для исследования модели фактора неожиданности в систему введены волоконно-оптические детекторы внимания с комбинаторной нерегулярностью.
3. Для практической реализации моделей предложено использовать волоконно-оптический системный канал.

**Список литературы:** 1. *Бондаренко М.Ф., Бурцев В.Н., Бурцев Вл.Н., Ерохин А.Л.* Моделирование стохастических процессов и их применение в практической психологии // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник ХГПУ: Сборник научных трудов. 2000. Вып. 99. С. 11-14. 2. *Числин Н.И.* Эргодические свойства цепей Маркова с переменным числом состояний и модель устойчивого развития психики // Проблемы бионики. 1998. Вып. 49. С. 141-146. 3. *Абдусаматов Р.М., Беркенблит М.Б., Фельдман А.Г., Чернавский А.В.* Моторика и интеллект // Интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1987. С. 13-39. 4. *Зенкин Г.М., Петров А.П.* Функциональная организация зрительного процесса и принцип гельштата // Интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1987. С. 265-293. 5. *Корнелюк В.А., Давыдов Д.М.* Использование цветодинамических приборов для комнат психологической разгрузки персонала // Новые промышленные технологии. Минатом. Вып. 4 (279). 1997. С. 82-90. 6. *Колесников Д.О., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* О природе субъективных состояний // Проблемы бионики. - 1999. Вып. 50. С. 30-37. 7. *Федоров Л.И.* Эндогенные ритмы организма как факторы модуляции параметров стимуляции // Биофизика. 1996. Т. 41, Вып. 3. С. 718-724. 8. *Бурцев Вал. Н., Гнусов Ю.В., Ерохин А.Л.* Формализация модели оптического волоконного системного канала // Проблемы бионики. 2002. Вып. 56. С. 34-38. 9. *Капани Н.* Волоконная оптика. Принципы и применение. М.: Мир, 1969. 461 с. 10. *Бурцев Вал. Н., Бурцев Вл.Н., Ерохин А.Л.* Исследование стохастических процессов комбинаторно-топологического преобразования информации. Сообщение 1 // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 4(13). С. 44-48. 11. *Принцип комбинаторно-топологических преобразований первичной информации невербального типа в цветодинамические изображения и феномен их влияния на психофизиологическое состояние человека:* Свидетельство о регистрации авторских прав ПА №1240 от 25.06.1998. Госагентство Украины по авторским и смежным правам / В.Н. Бурцев, Вл.Н. Бурцев. 8 с. 12. *Патент № 2124747 России, МКИ G02В 6/04.* Волоконно-оптический преобразователь изображений / В.Н. Бурцев, Вл.Н. Бурцев; Опубл. 10. 01. 1999. Бюл. № 1. 14 с.

*Поступила в редакцию 15.09.2003.*

## АВТОРЫ ВЫПУСКА

- Безнос Максим Сергеевич** – ст. гр. АРТ-01-2, Харьковский национальный университет радиозлектроники (ХНУРЭ)
- Бодянский Евгений Владимирович** – д-р. техн. наук, проф., каф. ИИ, ХНУРЭ
- Бордюг Виктория Юрьевна** – ст. гр. ПОАС-00-2, ХНУРЭ
- Булавин Дмитрий Алексеевич** – аспирант. каф. СТ, ХНУРЭ
- Бурцев Валерий Николаевич** – научн. сотр., ЧПФ «Цветодинамика».
- Бурцев Владимир Николаевич** – гл. инж., ЧПФ «Цветодинамика».
- Бых Анатолий Иванович** – д-р. физ.-мат. наук, проф., зав. каф. БМЭ, ХНУРЭ
- Васильев Николай Дмитриевич** – научн. сотр., Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (ХНУ)
- Винокурова Елена Анатольевна** – аспирантка, каф. ИИ, ХНУРЭ
- Григорьева Наталья Николаевна** – канд. биол. наук, ХНУ
- Демидюк Мирослав Васильевич** – канд. физ.-мат. наук, вед. н.с., ИППМН НАН Украины, г. Львов.
- Дохов Александр Иванович** – канд. техн. наук, зам. проректора по научной работе, ХНУРЭ
- Евланов Максим Викторович** – канд. техн. наук., ст. преп., каф. ИУС, ХНУРЭ
- Ерохин Андрей Леонидович** – канд. техн. наук, доцент, ХНУРЭ
- Зима Иван Иванович** – д-р. техн. наук, проф., ХНУРЭ
- Калита Надежда Ивановна** – асс., каф. СТ, ХНУРЭ
- Качер Владимир Семенович** – зав. лаб., УкрНИИ протезирования, г. Харьков.
- Королькова Елена Евгеньевна** – аспирантка каф. ИИ, ХНУРЭ
- Ламонова Наталья Сергеевна** – ст. научн. сотр. ПНИЛ АСУ, ХНУРЭ
- Лапта Сергей Иванович** – канд. техн. наук, доц. каф. ВМ, ХНУРЭ
- Левыкин Виктор Макарович** – д-р. техн. наук, проф., директор института КИТ, ХНУРЭ
- Михаль Олег Филиппович** – канд. техн. наук, доц., докторант, каф. ЭВМ, ХНУРЭ
- Неофитная Татьяна Михайловна** – аспирантка, каф. ИУС, ХНУРЭ
- Носова Татьяна Витальевна** – аспирантка, ХНУРЭ
- Петров Эдуард Георгиевич** – д-р. техн. наук, проф., зав. каф. СТ, ХНУРЭ
- Письменецкий Виктор Александрович** – канд. техн. наук, проф., ХНУРЭ
- Полонский Александр Дмитриевич** – канд. техн. наук, доц., докторант, каф. ИИ, ХНУРЭ
- Репка Виктория Борисовна** – канд. техн. наук, доц., каф. ПО ЭВМ, ХНУРЭ
- Семенец Валерий Васильевич** – д-р. техн. наук, проф., проректор по учебно-методической работе, ХУРЭ
- Соловьева Ольга Игоревна** – аспирантка, каф. БМЭ, ХНУРЭ
- Стрельченко Владимир Иосифович** – научн. сотр. КВКП, ХНУРЭ
- Супрун Жанна Михайловна** – мл. научн. сотр., аспирантка, каф. МЭПУ, ХНУРЭ
- Усенко Елена Владимировна** – канд. биол. наук, ст. преп., каф. ОТ, ХНУРЭ
- Шило Наталья Сергеевна** – аспирантка, каф. СТ, ХНУРЭ

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бодянский Е.В., Королькова Е.Е., Ламонова Н.С.</i> Модифицированные алгоритмы самообучения самоорганизующихся карт Т. Кохонена .....	3
<i>Бодянский Е.В., Винокурова Е.А.</i> Адаптивный взвешенный нейронный предиктор .....	10
<i>Полонский А.Д.</i> Обучение классификаторов в условиях неопределенности .....	18
<i>Петров Э.Г., Калита Н.И.</i> Методы оценивания вектора предпочтений индивидуумов .....	27
<i>Петров Э.Г., Булавин Д.А.</i> Использование методов Чебышевской токи и генетических алгоритмов для нахождения структуры модели многофакторного оценивания .....	36
<i>Михаль О.Ф.</i> Организация систем распознавания слабо структурированных образов на локально-параллельных нечетких алгоритмах .....	45
<i>Липта С.И.</i> Математическая модель перорального теста толерантности к глюкозе с физиологической функцией абсорбции глюкозы в кишечнике и ее возможные клинические приложения .....	54
<i>Левыкин В.М., Евланов М.В.</i> Задача определения функторов между категориальными моделями информационной системы .....	62
<i>Усенко Е.В.</i> Биомониторинг водных объектов с помощью инфузорий <i>Tetrahymena pyriformis</i> как тест-системы .....	68
<i>Шило Н.С.</i> Анализ адекватности модели максимизации функции правильности выбора предпочтений ЛПР .....	73
<i>Григорьева Н.Н., Васильев Н.Д., Дохов А.И., Зима И.И., Стрельченко В.И.</i> Регистрация полевого воздействия люстры Чижевского на эпителиальные клетки человека .....	81
<i>Носова Т.В., Безнос М.С., Семенец В.В., Письменецкий В.А.</i> Поиск оптимальной модели функционирования нижних конечностей человека .....	86
<i>Репка В.Б., Бордюг В.Ю.</i> Нейросетевая модель генерации структуры предложения для автоматического формирования тестовых заданий в дистанционном обучении .....	91
<i>Бых А.И., Демидюк М.В., Качер В.С.</i> Механико-математическое моделирование силовой взаимосвязи в системе "кукса-гильза" протезов голени и бедра .....	98
<i>Неофитная Т.М.</i> Разработка категориальной модели базы знаний интеллектуальной системы принятия решений .....	108
<i>Соловьёва О.И.</i> Применение нейронных сетей в медицинской диагностике .....	116
<i>Супрун Ж.М.</i> Si-фотоструктуры как мобильный экологически чистый источник преобразования солнечной энергии в электрическую .....	121
<i>Ерохин А.Л., Бурцев Вал.Н., Бурцев Вл.Н.</i> Моделирование когнитивной функции внимания в системе технического зрения .....	126

## CONTENTS

<i>Bodyanskiy Ye., Korolkova O., Lamonova N.</i> Modified self-training algorithms of the self organizing T. Kohen Maps .....	3
<i>Bodyanskiy Ye.V., Vinokurova O.A.</i> Adaptive wavelet neural network predictor .....	10
<i>Polonsky A.D.</i> Teaching classificators under the conditions of indefiniteness .....	18
<i>Petrov E.J., Kalita N.I.</i> Methods of estimation of individuum's preferences vector .....	27
<i>Petrov E.G., Bulavin D.A.</i> Application of Chebyshev's dot and genetic algorithms' methods for determination the structure of multifactor estimation model .....	36
<i>Mikhal O.Ph.</i> Structured organization of recognition systems weakly outline images using local-parallel fuzzy algorithms .....	45
<i>Lapta S.I.</i> The mathematical model of the oral glucose tolerance test with the physiological function of intestine glucose absorption and it's possible clinical application .....	54
<i>Levykin V.M., Evlanov M.V.</i> The task of the functors defining between models of information system .....	62
<i>Usenko E.W.</i> Biomonitoring of aqueous plants with the help infusoria <i>Tetrahymena pyriformis</i> as the test-system .....	68
<i>Shilo N.S.</i> The adequacy analysis of the correctness decision maker's preferences selection function maximization model .....	73
<i>Grigoreva N.N., Vasilev N.D., Dohov A.I., Zima I.I., Strelchenko V.J.</i> Registration of field influence of a chandelier Chigevsky's on epithelial of a cell of the man .....	81
<i>Nosova T.V., Beznos M.S., Semenets V.V., Pis'menetsky V.A.</i> Search of optimum model of functioning of the bottom finitenesses of the person .....	86
<i>Repka V.B., Bordyug V.Y.</i> The neural network model of sentence structure generation for automatic forming of the tests in distance learning .....	91
<i>A.I. Buh, Demuduk M.V., Kacher V.S.</i> Mechanic – mathematical modeling of force interaction in a system « stump - socket » of prosthesis with the amputation below and above the knee .....	98
<i>Neophitnaya T.M.</i> Development of category model of knowledge base for intellectual decision making system .....	108
<i>Solovyova O.I.</i> Application neural networks for medical diagnostics .....	116
<i>Suprun Zh.M.</i> Si-photostructures as mobile ecology pure source for conversion solar energy in electrical .....	121
<i>Yerokhin A.L., Burtsev Val.N., Burtsev Vl.N.</i> Modelling of attention cognitive function in vision system .....	126

## РЕФЕРАТЫ

## РЕФЕРАТИ

## ABSTRACTS

УДК 519.7:007.2

**Модифицированные алгоритмы самообучения самоорганизующихся карт Т. Кохонена** / Е.В. Бодянский, Е.Е. Королькова, Н.С. Ламонова // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С 3–9.

В работе рассмотрены алгоритмы самоорганизации карт Т. Кохонена и их модификации, позволяющие повысить быстродействие обработки информации и точность кластеризации путем рационального выбора шага обучения и функции соседства, включая биполярную функцию, использующую ранжирование нейронного газа.

Ил. 2. Библиогр.: 17 назв.

УДК 519.7:007.2

**Модифіковані алгоритми самонавчання карт Т. Кохонена, що самоорганізуються** / Є.В. Бодяньський, О.Є. Королькова, Н.С. Ламонова // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С 3–9.

Розглянуто алгоритми самоорганізації карт Т. Кохонена та їх модифікації, що дозволяють підвищити швидкість обробки інформації та точність кластеризації шляхом раціонального вибору кроку навчання та функції сусідства, включаючи биполярну функцію, що використовує ранжування нейронного газу.

Іл. 2. Бібліогр.: 17 назв.

UDC 519.7:007.2

**Modified self-training algorithms of the self organizing T. Kohen Maps** / Ye. Bodyanskiy.

O. Korolkova, N. Lamonova, // Problems of Bionics. All-Urk. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P 3–9.

This paper considers algorithms of self-organization of T. Kohonen maps and their modification. The algorithms allows to increase the speed of information processing and accuracy of clusterization by choosing an appropriate step of training and the neighborhood function including the bipolar function, which uses a ranking of the neural gas.

2 fig. Ref.: 17 items.

УДК 519.7:007.52

**Адаптивный вэйвлет-нейронный предиктор** / Е. В. Бодянский, Е. А. Винокурова // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 10-17.

Предложен новый оптимальный по быстродействию алгоритм обучения вэйвлет-нейрона, отличающийся тем, что он обеспечивает настройку в реальном времени не только синаптических весов, но и параметров растяжения и сдвига дочерних вэйвлетов. Алгоритм обладает как следящими, так и сглаживающими свойствами, что позволяет эффективно использовать вэйвлет-нейроны как самостоятельно, так и в составе искусственных нейронных сетей для решения задач прогнозирования, фильтрации, компрессии и классификации нестационарных зашумленных сигналов произвольной природы.

Ил. 5. Библиогр.: 25 назв.

УДК 519.7:007.52

**Адаптивний вейвлет-нейронний предиктор** / Є. В. Бодяньський, О. А. Винокурова // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С 10-17.

У роботі запропоновано новий оптимальний за швидкістю алгоритм навчання вейвлет-нейрона, який відрізняється тим, що він забезпечує налаштування в реальному часі не тільки синаптических ваг, але і параметрів розтягання і зрушення дочірніх вейвлетів. Алгоритм має як слідкуючі, так згладжуючі властивості, що дозволяє ефективно використовувати вейвлет-нейрони як самостійно, так і в складі штучних нейронних мереж для розв'язання задач прогнозування, фільтрації, компресії і класифікації нестационарних зашумлених сигналів довільної природи.

Іл. 5. Бібліогр.: 25 назв.

UDC 519.7:007.52

**Adaptive wavelet neural network predictor** / Ye. V. Bodyanskiy, O. A. Vinokurova  
// Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P.10-17.

In the paper, an optimal online learning algorithm of a wavelet neuron is proposed. The algorithm provides not only the tuning of synaptic weights in real time, but also the tuning of dilation and translation factors of daughter wavelets. The algorithm has both tracking and smoothing properties, so the wavelet neurons trained with this algorithm can be efficiently used both individually and as a part of artificial neural networks for prediction, filtering, compression and classification of various non-stationary noisy signals.

5 fig. Ref.: 25 items.

---

УДК 681.5

**Обучение классификаторов в условиях неопределенности** / А. Д. Полонский  
// Проблемы бионики: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 18-26.

На множестве инвариантных преобразований случайных аналоговых сигналов построен метод распознавания отношений между элементами выборок наблюдений и адекватный элементный базис для обучения классификаторов в условиях неопределенности без применения традиционной цифровой вычислительной техники последовательного действия.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр.: 5 назв.

УДК 681.5

**Навчання класифікаторів в умовах невизначеності** / О. Д. Полонський  
// Проблеми біоники: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вип. 58. С.18-26

На множині інваріантних перетворень випадкових аналогових сигналів побудовано метод розрізнення відносин між елементами вибірок спостережень та адекватний елементний базис для навчання класифікаторів в умовах невизначеності без використання традиційної цифрової обчислювальної техніки послідовної дії.

Табл. 1. Іл. 3. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 681.5

**Teaching classifiers under the conditions of indefiniteness** / A. D. Polonsky  
// Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 18-26.

It is worked out the method to compare observations and the adequate element basis to teach classifiers under the conditions of indefiniteness without applying traditional digital computing equipment of consecutive operation.

1 tab. 3 Fig. Ref.: 5 items.

---

УДК 519.6

**Методы оценивания вектора предпочтений индивидуумов** / Э.Г. Петров, Н.И. Калита  
// Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 27-35.

Рассматриваются возможные подходы к оцениванию вектора предпочтений однородной группы индивидуумов, основанные на использовании субъективных и объективных методов в активных или пассивных экспериментах, отмечены особенности их проведения. Предложены процедуры формирования точечных и интервальных оценок при использовании экспертных методов и метода компараторной идентификации. Рассматриваются ситуации обработки экспертных оценок, заданных численно и в виде лингвистических переменных.

Ил. 3. Библиогр.: 16 назв.

УДК 519.6

**Методи оцінювання вектора переваг індивідуумів** / Е.Г. Петров, Н.І. Калита  
// Проблеми біоники: Всеукр. міжвід. наук.-техн. сб. 2003. Вип. 58. С. 27-35.

Розглядаються можливі підходи до оцінювання вектора переваг однорідної групи індивідуумів, що ґрунтуються на використанні суб'єктивних та об'єктивних методів в активних або пасивних експериментах, зауважено на особливості їх проведення. Запропоновані процедури форму-

вання точкових і інтервальних оцінок при використанні експертних методів і метода компараторної ідентифікації. Розглядаються ситуації обробки експертних оцінок, заданих чисельно та як лінгвістична змінна.

Ил. 3. Библиогр.: 16 назв.

УДК 519.6

**Methods of estimation of individuum's preferences vector** / E.J. Petrov, N.I. Kalita  
// Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 27-35.

The possible approaches to estimating of homogeneous group of individuum's preferences are considered, which are based on using subjective and objective methods in active or passive experiments. Features of them using are indicated. Procedures of formation point and interval estimations with using expert methods and comparatory identification are proposed. Situations treatment of expert estimations, which are set numerically and linguist variable, are considered.

3 fig. Ref.: 16 items.

УДК 519.81

**Использование методов Чебышевской точки и генетических алгоритмов для нахождения структуры модели многофакторного оценивания** / Э.Г. Петров, Д.А. Булавин  
// Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 36-44.

Рассмотрена постановка и методика решения задачи идентификации структуры модели многофакторного оценивания, которое базируется на применении генетических алгоритмов. Описан метод поиска весовых коэффициентов при помощи метода Чебышевской точки. Проанализированы результаты эксперимента, который проведен с 5 альтернативами и 4 частными критериями.

УДК 519.81

**Використання методів Чебишевської крапки та генетичних алгоритмів для знаходження структури моделі багатофакторного оцінювання** / Е.Г. Петров, Д.О. Булавін // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 36-44.

Розглянута постановка та методика розв'язання задачі ідентифікації структури моделі багатофакторного оцінювання, яка базується на застосуванні генетичних алгоритмів. Описано метод пошуку вагових коефіцієнтів за допомогою метода Чебишевської крапки. Проаналізовано результати експерименту, який проведено з 5 альтернативами та 4 приватними критеріями.

UDC 519.81

**Application of Chebyshev's dot and genetic algorithms' methods for determination the structure of multifactor estimation model.** / E.G. Petrov, D.A. Bulavin // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 36-44.

The statement and the methods for solving the multifactor estimation model comparatory identification problem based on the use of genetic algorithms are considered. The results received with 5 alternative and 4 private criteria during the experiment are analyzed.

УДК 519.87

**Организация систем распознавания слабо структурированных образов на локально-параллельных нечетких алгоритмах** / О.Ф. Михаль // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 45-53.

Изложены принципы организации многоуровневых нечетких систем распознавания слабо структурированных образов на локально-параллельных алгоритмах. Предложены методы построения наборов термов для лингвистических переменных, соответствующих распознавательным признакам. Реализован сокращенный вариант системы, при ограниченном числе распознавательных признаков. Отмечена возможность наращивания признаков и уровней обработки.

Ил.: 6. Библиогр.: 7 назв.

УДК 519.87

**Організація систем розпізнавання слабо структурованих образів за локально-паралельними нечіткими алгоритмами / О.П. Міхаль // Проблеми біоніки: Всеукр. Міжвід. наук.-техн. зб. 2006 Вип. 58. С. 45-53.**

Розглянуто принципи організації багаторівневих нечітких систем розпізнавання слабо структурованих образів за локально-паралельними алгоритмами. Запропоновано методи побудови множин термів для лінгвістичних змінних, що відповідають розпізнавальним ознакам. Реалізовано скорочений варіант системи, що містить зменшену кількість розпізнавальних ознак. З'ясовано можливість нарощування ознак і рівнів обробки.

Ил.: 6. Бібліогр.: 7 назв.

UDC 519.87

**Structured organization of recognition systems weakly outline images using local-parallel fuzzy algorithms / O.Ph. Mikhal // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 45-53.**

Structured organization principles have been stated of layered fuzzy systems of recognition of weakly outline images using local-parallel algorithms. Methods have been proposed for building of sets of terms for linguistical variables, in corresponding to recognition signs. Abbreviated version of system has been built using limited amount of recognition signs. Possibility has been noted of increasing of recognition signs amount and processing levels.

6 fig. Ref.: 7 items.

УДК 519.95:612.018

**Математическая модель перорального теста толерантности к глюкозе с физиологической функцией абсорбции глюкозы в кишечнике и ее возможные клинические приложения / С.И. Лапта // Проблемы бионики. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 54-61.**

Проведено уточнение математической модели перорального теста толерантности к глюкозе, разработанной автором ранее. В модифицированной модели, вместо ранее использованной гипотетической функции абсорбции глюкозы в кишечнике, применена новая функция всасывания, полученная при решении дополнительной задачи математического моделирования. Это усовершенствование повысило физиологическую адекватность модели и позволило численно проанализировать зависимость гликемических данных теста от величины дозы глюкозной нагрузки и максимально возможной интенсивности всасывания глюкозы в кишечнике. Новая модель может найти применение в клинической практике как для диагностики сахарного диабета и близких к нему состояний с нарушенной толерантностью к глюкозе, так и для диагностики нарушений всасывания глюкозы в кишечнике.

Ил. 4. Библиогр.: 14 назв.

УДК 519.95:612.018

**Математична модель перорального тесту толерантності до глюкози з фізіологічною функцією абсорбції глюкози у кишечнику та її можливі клінічні застосування / С.І. Лапта // Проблеми біоніки. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вип. 58. С. 54-61.**

Проведено уточнення математичної моделі перорального тесту толерантності до глюкози, що розроблена автором раніше. У модифікованій моделі замість раніш використаної гіпотетичної функції абсорбції глюкози у кишечнику застосовано нову функцію всмоктування, одержану при розв'язанні додаткової задачі математичного моделювання. Це вдосконалення підвищило фізіологічну адекватність моделі та дозволило провести чисельний аналіз залежності глікемічних даних тесту від величини дози глюкозного навантаження та максимально можливої інтенсивності всмоктування глюкози в кишечнику. Нова модель може знайти застосування в клінічній практиці як для діагностики цукрового діабету та близьких до нього станів з порушеною толерантністю до глюкози, так і для діагностики порушень абсорбції глюкози у кишечнику.

Ил. 4. Бібліогр.: 14 назв.

UDC 519.95:612.018

**The mathematical model of the oral glucose tolerance test with the physiological function of intestine glucose absorption and it's possible clinical application / S.I. Lapta // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 54-61.**

A more precise definition to the devised earlier mathematical model of the oral glucose tolerance test was carried out. In the modified model, instead of the earlier used hypothetical function of the intestine glucose absorption, the new function of absorption, received during the solution of the subsidiary problem of mathematical modelling, was applied. This improvement raised the physiological adequacy of the model and allowed to analyze numerically the dependence of glycemic data of the test on the level of glucose load dose and the highest possible intensity of the intestine glucose absorption. The new model can find the application in clinical practice as in the diagnosis of Diabetes mellitus and the close to it states with disturbing glucose tolerance as in the diagnosis of the intestine glucose absorption disturbances.

Fig. 4. Ref.: 14 items.

УДК 658.012.011.56

**Задача определения функторов между категорными моделями информационной системы / В.М. Левыкин, М.В. Евланов // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 62-67.**

В предлагаемой статье рассмотрено решения проблемы трансформации моделей проектируемой информационной системы. В качестве математического аппарата формализованного описания задачи предлагается использовать аппарат теории категорий. Сформулированы основные математические модели ковариантного функтора, описывающего переход между категорными моделями информационной системы.

Табл. 0. Ил. 1. Библиогр.: 6 назв.

УДК 658.012.011.56

**Задача визначення функторів між категорними моделями інформаційної системи / В.М. Левикин, М.В. Євланов // Проблеми біоніки. Всеукр. міжвід. науч.-техн. зб. 2003. Вип. 58. С. 62-67**

В статті, що пропонується, розглянуто вирішення проблеми трансформації моделей інформаційної системи, що проектується. Як математичний апарат формалізованого опису задачі пропонується використовувати апарат теорії категорій. Сформульовані основні математичні моделі коваріантного функтора, який описує перехід між категорними моделями інформаційної системи.

Табл. 0. Іл. 1. Бібліогр.: 6 назви.

UDC 658.012.011.56

**The task of the functors defining between models of information system / V.M. Levykin, M.V. Evlanov // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 62-67**

In this article the decision of developing information system models transformation problem is devoted. As mathematical apparatus for the task formalized describing the using of category theory apparatus is proposed. The base mathematical models of the covariant functor, which describe categorical information system models transformation are given.

0 tab. 1 fig. Ref.: 6 items.

УДК 574.64:593.17

**Биомониторинг водных объектов с помощью инфузорий Tetrahymena pyriformis как тест-системы / Е.В. Усенко // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. Науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 68-72.**

Для биомониторинга воды с помощью инфузорий Tetrahymena pyriformis проведены исследования по выбору условий билтестирования: оптимальной температуры, возраста тест-объекта и установления метрологических характеристик метода. На основании проведенной апробации на разных категориях вод метод рекомендовано для определения токсичности воды.

Табл. 3. Ил. 1. Библиогр: 9 назв.

УДК 574.64:593.17

**Біомоніторинг водних об'єктів за допомогою інфузорій *Tetrahymena pyriformis* як тест-системи / О.В. Усенко // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вип. 58. С. 68-72.**

Для біомоніторингу води за допомогою інфузорій *Tetrahymena pyriformis* проведені дослідження з вибору умов біотестування: оптимальної температури, віку культури та встановлення метрологічних характеристик методу. На підставі проведеної апробації на різних категоріях вод метод рекомендовано для визначення токсичності води.

Табл. 3. Ил. 1. Библиогр.: 9 назв.

UDC 574.64:593.17

**Biomonitoring of aqueous plants with the help infusoria *Tetrahymena pyriformis* as the test- system/ E.W. Usenko // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P. 68-72**

For biomonitoring water with the help of infusorians the examinations at a choice of requirements of biotesting optimal temperature, age of a test-object and installation of metrology performances of a method. Approbations performed on various categories of waters allow to recommend this method for determination of water toxicity.

3 tab. 1 fig. Ref.: 9 items.

УДК 519.81

**Анализ адекватности модели максимизации функции правильности выбора предпочтений ЛПР / Н.С. Шило // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. научно-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 73-80.**

Проведен анализ адекватности и точности модели максимизации функции правильности выбора предпочтений с помощью методики оценки адекватности результатов точечной идентификации предпочтений ЛПР. Для наглядности анализа были взяты также другие критерии точечной идентификации: Чебышевская точка, модель максимизации силы предпочтений ЛПР, средняя точка. Анализ адекватности и точности критериев проводился на примере идентификации предпочтений при выборе ЛПР модели бензиновой газонокосилки.

Табл. 4. Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

УДК 519.81

**Аналіз адекватності моделі максимізації функції правильності вибору переваг ОПР / Н.С. Шило // Проблеми біоніки: Всеукр. між від. наук.-техн. зб. 2003. Вип. 58. С. 73-80.**

Проведен аналіз адекватності та точності моделі максимізації функції правильності вибору переваг ОПР за допомогою методики оцінки адекватності результатів крапочної ідентифікації переваг ОПР. Для наочності аналізу були взяті також інші критерії крапочної ідентифікації: Чебишевська крапка, модель максимізації сили переваг ОПР, середня крапка. Аналіз адекватності та точності критеріїв проводився на прикладі ідентифікації переваг при виборі ОПР моделі бензинової газонокосарки.

Табл. 4. Ил. 2. Библиогр.: 4 назви.

UDK 519.81

**The adequacy analysis of the correctness decision maker's preferences selection function maximization model / N.S. Shilo // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P. 73-80.**

The adequacy and precision's analysis of the correctness decision maker's preferences selection function maximization model, that were made with the help of the decision maker's preferences pointed identification criterions adequacy evaluation methodic is considered in this article. To make analysis more demonstrative we also have taken another pointed identification criterions, like the Chebyshev point, the preference mutual strength maximization model, the midpoint. The adequacy and precision's pointed identification criterions analysis was held on decision maker's preferences identification example of a petrol lawn-mower model choosing.

4 tab. 2 fig. Ref.: 4 items.

УДК 538.00.00

**Регистрация полевого воздействия люстры Чижевского на эпителиальные клетки человека** / Н.Н. Григорьева, Н.Д. Васильев, А.И. Дохов, И.И. Зима, В.И. Стрельченко // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 81-85

Приведены результаты экспериментальных исследований электромагнитных роторных излучений люстры Чижевского и их воздействия на человека на клеточном уровне.

Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

УДК 538.000.000

**Реєстрація польового впливу люстри Чижевського на епітеліальні клітини людини** / Н.М. Григор'єва, М.Д. Васильєв, О.І. Дохов, І.І. Зима, В.Й. Стрільченко // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 81-85.

Наведені результати експериментальних досліджень електромагнітних роторних випромінювань люстри Чижевського та їх впливу на людину на клітинному рівні.

Табл. 2. Бібліогр.: 2 назви.

UDC 538.00.00

**Registration of field influence of a chandelier Chigevsky's on epithelial of a cell of the man** / N.N.Grigoreva, N.D. Vasilev, A.I. Dohov, I.I.Zima, V.J. Strelchenko // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P. 81-85.

Experimental researches of electromagnetic rotary radiations of a chandelier Chigevsky's and their influence on the man at a cell-like level are represented.

2 tab. 2 items.

УДК 615.47:617-089

**Поиск оптимальной модели функционирования нижних конечностей человека** / Т.В. Носова, М.С. Безнос, В.В. Семенец, В.А. Письменецкий // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 86-90.

Рассматривается задача аналитического описания опытных данных, полученных при исследованиях кинематической системы нижних конечностей человека на основе различных аппроксимирующих функций с минимальной среднеквадратичной погрешностью.

Табл. 0. Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.

УДК 615.47:617-089

**Пошук оптимальної моделі функціонування нижніх кінцівок людини** / Т.В. Носова, М.С. Безнос, В.В. Семенец, В.О. Письменецкий // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 86-90.

Авторы ставили перед собою задачу аналитического опису экспериментальных данных, полученных при исследованиях кинематической системы нижних конечностей человека на основе различных аппроксимирующих функций с минимальной среднеквадратичной погрешностью.

Табл. 0. Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.

UDC 615.47:617-089

**Search of optimum model of functioning of the bottom finitenesses of the person** / T.V.Nosova, M.S.Beznos, V.V.Semenets, V.A.Pis'menetsky // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P.86-90.

The problem of the analytical description of the skilled data received at researches of kinematic system of the bottom finitenesses of the person on the basis of various approximating functions with the minimal root-mean-square error.

0 tab. 6 fig. Ref.: 3 items.

УДК 519.7:007.52

**Нейросетевая модель генерации структуры предложения для автоматического формирования тестовых заданий в дистанционном обучении / В.Б. Репка, В.Ю. Бордюг // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 91-97.**

Рассмотрена возможность применения нейронных сетей в сфере дистанционного обучения, как мощного аппарата работы с нечеткими знаниями. Под нечеткими знаниями рассматривалось естественно языковое построение вопросов по известным определениям в русском языке. С помощью сети многослойный перцептрон был проведен эксперимент генерации общих вопросов на основе определений путем классификации семантических элементов определений и вопросов.

Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

УДК 519.7:007.52

**Нейромережева модель генерації структури речення для автоматичного формування тестових завдань у дистанційному навчанні / В.Б. Репка, В.Ю. Бордюг // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 91-97.**

Розглянуто можливість застосування нейронних мереж в галузі дистанційного навчання, як потужного апарату роботи з нечіткими знаннями. Під нечіткими знаннями розглядалося природно мовне побудування питань на підставі відомих визначень в російській мові. За допомогою використання мережі багаторівневий перцептрон було здійснено експеримент генерації загальних питань на підставі визначень шляхом класифікації семантичних елементів визначень та питань.

Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

UDC 519.7:007.52

**The neural network model of sentence structure generation for automatic forming of the tests in distance learning / V.B. Repka, V.Y. Bordyug // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. № 58. P. 91-97.**

The possibility of use the neural network in the area of distance learning was viewed as a powerful tool of processing with fuzzy knowledge. Fuzzy knowledge is a natural language constructing of questions on a base of well-known definitions in Russian language. The experiment of generation of common questions was realized on a base of definitions by the way of classification of semantic elements of definitions and questions.

5 fig. Ref.: 9 items.

УДК 004.942:685.382

**Механико-математическое моделирование силового взаимодействия в системе “культия - гильза” протезов голени и бедра / А.И. Бых, М.В. Демидюк, В.С. Качер // Проблемы бионики: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 98-107.**

Статья посвящена разработке упрощенных механико-математических моделей, предназначенных для использования в клинической практике протезирования инвалидов с ампутационными дефектами нижних конечностей. Внимание сосредоточено на наиболее важном месте протеза – культеприемной гильзе. Рассмотрены вопросы расчета давления взаимодействия между культей и гильзой протеза при опоре на протезированную конечность. Приведено постановку задачи вычисления сил взаимодействия в протезах голени и бедра, а так же алгоритмы их решения с использованием оптимизационного подхода и результаты тестирования моделей.

Ил. 4. Библиогр.: 6 назв.

УДК 004.942:685.382

**Механіко-математичне моделювання силової взаємодії в системі “кукса - гільза” протезів гомілки та стегна / А.І. Бих, М.В. Демидюк, В.С. Качер // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 98-107.**

Стаття присвячена розробці спрощених механіко-математичних моделей, призначених для використання в клінічній практиці протезування інвалідів з ампутаційними вадами нижніх кінцівок. Увагу зосереджено на найважливішому місці протеза – куксоприймальній гільзі. Розглянуто

питання обчислення тиску взаємодії між куксою і гільзою протеза під час опори на протезовану кінцівку. Приведено постановку задачі обчислення сил взаємодії в протезах гомілки та стегна і алгоритми їх розв'язання з використанням оптимізаційного підходу і результати тестування моделей.

Л. 4. Бібліогр.: 6 назв.

UDC 004.942:685.382

**Mechanic – mathematical modeling of force interaction in a system « stump - socket » of prosthesis with the amputation below and above the knee / A.I. Buh, M.V. Demuduk, V.S. Kacher // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2003. N 58. P. 98-107.**

This article is devoted to development of simplified mechanics-mathematical models intended for usage in clinical practice of a prosthetics of the invalids with amputating defects of the lower extremities. The attention is concentrated at the most important place of a prosthesis - socket. Problems of calculation of the interaction pressure between a stump and socket of a prosthesis are considered at a support extremity. The statement of problems of the interaction forces calculation in prostheses with an amputation above and below the knee, and algorithms of their solution with usage of the optimization approach and test results of models are described.

4 fig. Ref.: 6 items.

УДК 519.7

**Разработка категорной модели базы знаний интеллектуальной системы принятия решений / Неофитная Т.М. // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С.108-115.**

В работе на формальном уровне рассмотрено соотношение между онтологией и прикладной концептуальной моделью произвольной предметной области, что позволило учитывать разницу между онтологическими и проблемными знаниями. Разработана категория концептуальных моделей предметной области, которая была использована для математического моделирования базы знаний о сложной предметной области. Исследования проводились в рамках общей проблемы разработки баз знаний для интеллектуальных систем принятия решений.

Библиогр.: 9 назв.

УДК 519.7

**Розробка категорної моделі бази знань інтелектуальної системи прийняття рішень / Т.М.Неофітна // Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 108-115.**

У роботі на формальному рівні розглянуто співвідношення між онтологією та прикладною концептуальною моделлю довільної предметної галузі, що дозволяє урахувати різницю між онтологічними та проблемними знаннями. Розроблена категорія концептуальних моделей предметної галузі, яка була використана для математичного моделювання бази знань складної предметної галузі. Дослідження проводились у рамках загальної проблеми розробки баз знань для інтелектуальних систем прийняття рішень.

Бібліогр.: 9 назв.

UDC 519.7

**Development of category model of knowledge base for intellectual decision making system / T.M. Neophitnaya // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P. 108-115.**

The given work describes on a formal level the relation between ontology and conceptual model of arbitrary domains, what allows to take into consideration the difference between the ontological and problem knowledge. It was suggested to use the category of conceptual model for formal modeling of knowledge base. The research has been done within the framework of general problem of knowledge modeling for intellectual decision making/support systems.

Ref.: 9 items.

УДК 004.032.26:61

**Применение нейронных сетей в медицинской диагностике / О.И. Соловьёва**

// Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 116-120.

Рассмотрены вопросы формализации медицинских знаний и принятия решения при диагностике. Проведен сравнительный анализ классических методов принятия решения. Предложена структурно-логическая схема принятия решения в медицинской диагностике, применяя искусственные нейронные сети.

Табл. 1. Ил. 1. Библиогр.: 5 назв.

УДК 004.032.26:61

**Застосування нейронних мереж в медичній діагностиці / О.І. Соловйова**

// Проблеми біоніки: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2003. Вып. 58. С. 116-120.

Розглянуто питання формалізації медичних знань та прийняття рішення при діагностиці. Проведено порівняльний аналіз класичних методів прийняття рішення. Запропоновано структурно-логічну схему прийняття рішення в медичній діагностиці, використовую штучні нейронні мережі.

Табл. 1. Ил. 1. Библиогр.: 5 назви.

UDC 004.032.26:61

**Application neural networks for medical diagnostics / O.I. Solovyova // Problems of Bionics.**

All-Ukr. Sci. Interdep. Mag 2003. № 58. P. 116-120.

The problem of formalization medical knowledge and decisions acceptance in diagnostics are coincided. The comparative analysis of classical methods of decisions acceptance is done. The structural-logical scheme of decisions acceptance in medical diagnostics within artificial neural network is proposed.

Tables. 1. 1 fig. Ref.: 5 items.

УДК 621.383

**Si-фотоструктуры как мобильный экологически чистый источник преобразования****солнечной энергии в электрическую / Ж.М. Супрун // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 58. С. 121-125.**

В статье рассматриваются различные аспекты исследований, разработок и применения фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии: результаты исследований солнечных элементов, пути повышения их эффективности, снижения стоимости "солнечной" электроэнергии. Дается оценка развития этого перспективного направления альтернативной энергетики.

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.383

**Si-фотоструктури як мобільне екологічно – чисте джерело для перетворювання сонячної енергії в електричну / Ж.М. Супрун // Проблеми біоніки: Всеукр. Між від. наук.-техн. зб. 2003. Вип.. 58. С. 121-125**

У статті розглядаються різноманітні аспекти досліджень, розробка та удосконалення фотоелектричного методу перетворення сонячної енергії: результати досліджень сонячних елементів, шляхи підвищення їх ефективності, зниження вартості "сонячної" електроенергії. Приводиться оцінка розвитку цього перспективного напрямку альтернативної енергетики.

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.

UDC 621.383

**Si-photostructures as mobile ecology pure source for conversion solar energy in electrical**

/ Zh.M. Suprun // Problems of Bionics. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag.2003. № 58. P. 121-125.

The article considers different aspects of investigations, research and applications of photoelectrical methods of solar energy conversion: results of investigation of solar cells, ways of increasing their efficiency, lowering the cost of solar energy, photoelectrical conversion of concentrated solar radiation. Estimation of development of this perspective of this alternative trend is given.

Itab. 4 fig. Ref.: 5 items